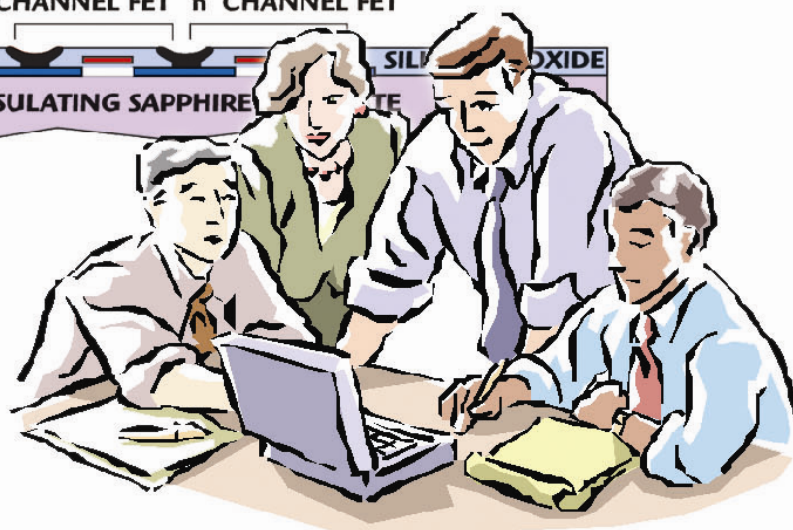
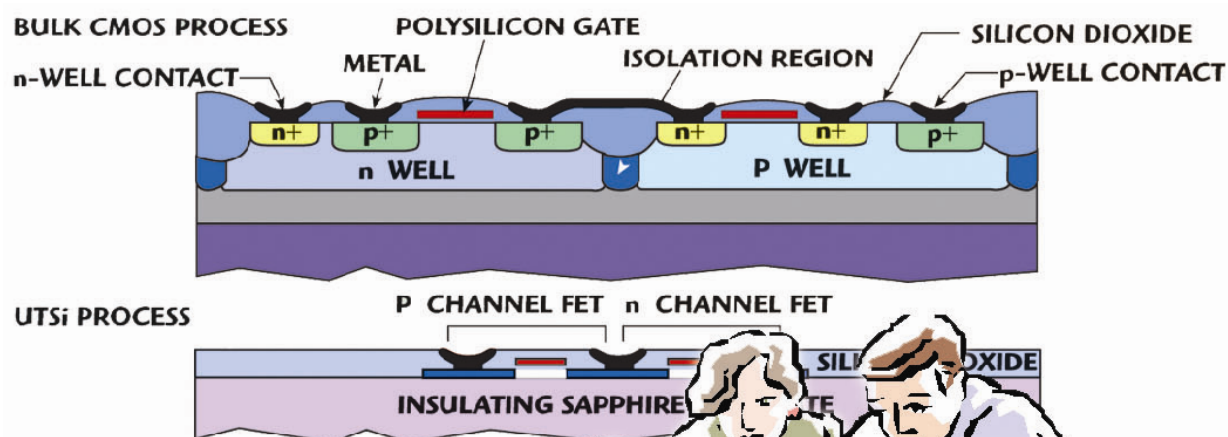


А.С. АДОНИН, К.О. ПЕТРОСЯНЦ

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СО СТРУКТУРОЙ КМОП «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»



Химия
Москва
2016

Адонин А.С., Петросянц К.О. Интегральные схемы со структурой КМОП «кремний на сапфире». М., «Химия», 2016, 305 с.

Книга посвящена интегральным схемам (ИС) со структурой КМОП «кремний на сапфире», которые являются стратегически важным направлением создания ИС для экстремальных и ответственных применений и одновременно быстро развивающимся перспективным направлением создания больших ИС (БИС) и систем на кристалле (СнК) для мобильных систем связи. В книге рассмотрены следующие вопросы: специфика интегральных схем со структурой КМОП КНС; требования к исходным материалам и КНС структурам; базовые технологические процессы изготовления приборов и схем; типовые конструкции элементов КМОП КНС интегральных схем различных поколений, их электрические характеристики и параметры; методы приборно-технологического и схемотехнического моделирования приборных структур и типовых цифровых и аналоговых схемных фрагментов; основные характеристики и параметры радиационно-стойких КМОП КНС микросхем и БИС отечественных и зарубежных производителей; элементная база и особенности оптоэлектронных ИС со встроенным источником питания.

Книга предназначена для инженеров и специалистов, занимающихся разработкой и применением ИС и БИС, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Табл. 37, рис. 142, библиограф. 114 назв.

Рецензенты: академик РАН, д.т.н., президент МИРЭА А.С. Сигов
профессор НИУ МИЭТ, д.т.н., М.А. Королев

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СО СТРУКТУРОЙ КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ	21
1.1 Особенности технологии создания гетероэпитаксиальных структур кремния на сапфире-----	21
1.2. Методы исследования параметров глубоких уровней в структурах КНС-----	32
1.3. Результаты исследования глубоких уровней в структурах КНС, подвергнутых различным видам внешних воздействий -----	39
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КМОП БИС СО СТРУКТУРОЙ КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ	55
2.1. Разработка и исследование технологических процессов формирования радиационно-стойких МОП-структур -----	55
2.2. Базовый технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС SOS2 (длина канала до 4 мкм) -----	73
2.3. Технологический маршрут изготовления КМОП БИС SOS-3 (длина канала 2 мкм) -----	79
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ КМОП БИС КНС С КОРОТКИМ КАНАЛОМ	89
3.1. Короткоканальные эффекты в КМОП КНС транзисторах -----	89
3.2 Поиск путей совершенствования технологического маршрута с помощью методов математического моделирования -----	100

3.3 Технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС (SOS-4) с длиной канала до 1.5-1.25 мкм -----	107
3.4 SOS-5 двухкарманная технология с самосовершенными затворами на ультратонком кремнии с длиной канала $\leq 0,5$ мкм (UTSi-технология) -----	119
ГЛАВА 4. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КМОП БИС КНС	130
4.1N- и p-канальные МОП КНС транзисторы, КМОП-ячейки-----	131
4.2 Фотоэлектрические преобразователи на КНС-структурах-----	144
4.3. Стабилитрон, изготовленный по технологии КНС -----	152
4.4 Пассивные RC-цепочки и сенсоры-----	161
ГЛАВА 5. ПОДСИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КМОП БИС КНС	169
5.1. Пятиуровневая методика моделирования радиационно-стойких КМОП/КНС БИС -----	170
5.2 Методика оценки чувствительности исходных КНС – структур к высокотемпературным обработкам и радиационным воздействиям. ---	171
5.3 Приборно-технологическое моделирование с помощью пакета Synopsys TCAD -----	176
5.4. Схемотехнические модели МОП-транзисторов на изолирующей подложке, учитывающие влияние радиационных эффектов -----	191
5.5. Моделирование КМОП КНС БИС с использованием библиотек стандартных ячеек и функциональных схемных блоков -----	233

ГЛАВА 6. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СО СТРУКТУРОЙ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»	243
6.1. Радиационно-стойкие КМОП БИС, изготовленные по самосовмещенной технологии на структурах КНС 0,6 мкм (SOS-2) -----	245
6.2. Радиационно–стойкий КМОП КНС базовый матричный кристалл-----	250
6.3 Радиационно-стойкие КМОП БИС, изготовленные по самосовмещенной технологии со «спейсерами» (SOS3)-----	262
6.4 Радиационно-стойкие КМОП БИС КНС, изготовленные по двухкарманной технологии с использованием высокоомного кремния (SOS-4)-----	268
ГЛАВА 7. ЗАРУБЕЖНЫЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СО СТРУКТУРОЙ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»	274
ГЛАВА 8. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ БИС СО ВСТРОЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ.	288
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ ВВЕДЕНИЯ	294
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ ГЛАВ 1-8	296

ВВЕДЕНИЕ

Создание и освоение в производстве стратегически важной для России радиоэлектронной аппаратуры для ядерной энергетики, аэрокосмической техники, радиолокации, связи и телекоммуникаций, систем вооружения и военной техники, ликвидации последствий радиационных и других экологических катастроф, утилизации ядерных и химически агрессивных отходов, а также для специальной аппаратуры гражданского назначения немислимо без создания и промышленного освоения высокоэффективной и высоконадежной микроэлектронной элементной базы. Основу этой элементной базы составляют специализированные большие интегральные схемы (БИС) и системы на кристалле (СнК). При создании БИС и СнК гражданского и военного назначения имеет место устойчивая тенденция возрастания сложности устройств за счёт интеграции на одном кристалле функций приема и передачи сигналов радио- и СВЧ-диапазонов, цифровой обработки, промежуточного хранения и накопления информации, внутреннего контроля, диагностики, управления и других функций. Причем, эта тенденция особенно заметно усилилась в последние годы в связи с бурным развитием средств беспроводной мобильной связи и телекоммуникаций. Помимо высокой функциональной гибкости (т.е. способности одновременно в одной конструкции реализовывать цифровые, аналоговые, сенсорные и др. функции), специализированные БИС и СнК должны обладать высокой производительностью и быстродействием, умеренным потреблением энергии, приемлемыми массогабаритными показателями, а также высокой надежностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, в первую очередь температуры и радиации [1-3].

В настоящее время сформировались три основных направления в разработке и промышленном производстве таких схем: на основе технологии арсенида галлия, кремний-германиевой БикМОП технологии и КМОП-технологии «кремний на диэлектрике».

Арсенид-галлиевые (GaAs) интегральные схемы традиционно используются в

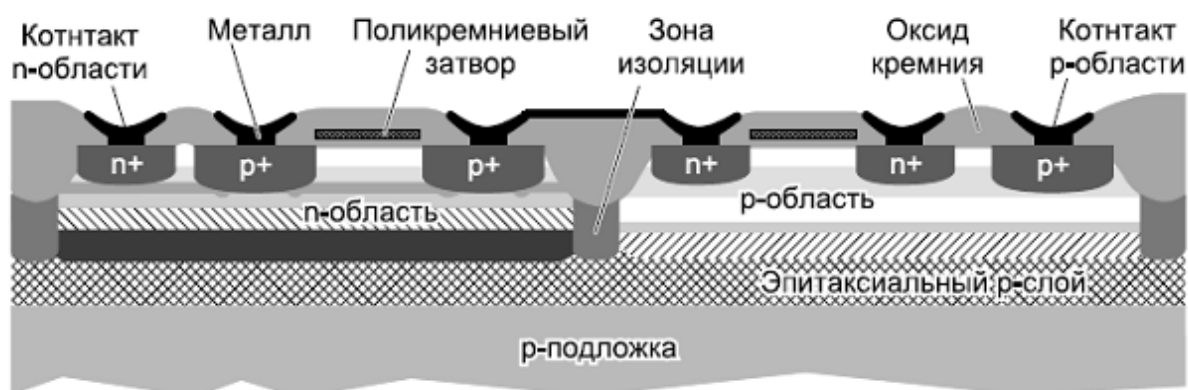
специальной радиоэлектронной аппаратуре СВЧ-диапазона вследствие их высокого быстродействия и стойкости к воздействию радиации и температуры [4, 5]. Однако, по стоимости они в 3-7 раз дороже схем на основе кремния, потребляют гораздо большую мощность и уступают кремниевым микросхемам в части удобства и качества реализации на одном кристалле цифровых функций и пассивных компонентов.

Технология кремний-германиевых БиКМОП БИС интегрирует на одном кристалле аналоговые устройства на гетеропереходных биполярных транзисторах (ГБТ), обладающих очень высоким быстродействием, с цифровыми функциями КМОП-транзисторов и пассивными R, L, C элементами. В плане быстродействия, реализации аналого-цифровых функций и отчасти радиационной стойкости они являются в определенной степени альтернативой схемам на основе GaAs, но и при этом обладают гораздо меньшей стоимостью из-за практически полной совместимости с традиционной кремниевой КМОП технологией [6-8]. Однако, ГБТ, хотя и имеют очень высокое быстродействие, но потребляют достаточно большую мощность по сравнению с КМОП элементами. Кроме того, ни одна из разновидностей SiGe БиКМОП технологии не может интегрировать на кристалле пассивные элементы также эффективно, как технология, использующая полностью изолирующую (диэлектрическую) подложку.

Интерес к использованию тонких плёнок кремния на изолирующей подложке возник, практически, одновременно с развитием МОП-технологии, поскольку появилась возможность реализовать технологический маршрут создания КМОП БИС близкий к “идеальному”.

На рис.1 приведены схематические изображения разреза КМОП элементов, изготовленных на объемном кремнии (верхний рисунок) и на изолирующей сапфировой подложке (нижний рисунок).

КМОП-транзисторы, изготовленные по технологии на объемном кремнии



КМОП-транзисторы, изготовленные по технологии на ультратонком кремнии

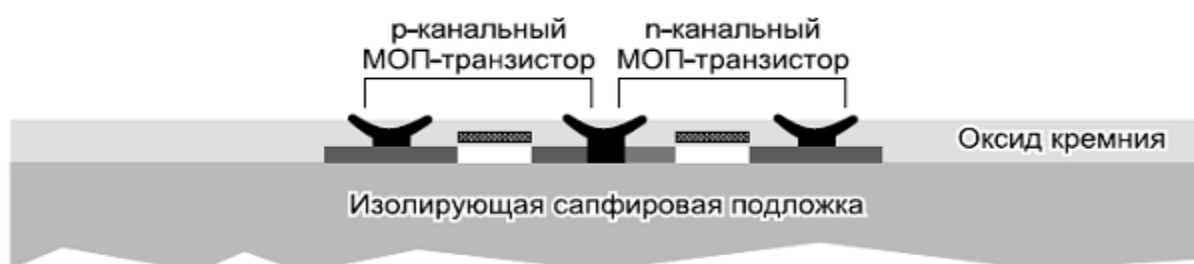


Рис. 1. Структура кристалла КМОП-элемента, изготовленного по объемной и КНС технологии на ультратонких слоях кремния.

Диэлектрическая подложка обладает целым рядом важных преимуществ перед подложкой на объемном кремнии. Она позволяет:

- ✓ увеличить плотность размещения элементов;
- ✓ практически исключить токи утечки;
- ✓ исключить тиристорный эффект;
- ✓ резко снизить паразитные емкости;
- ✓ повысить быстродействие;
- ✓ повысить радиационную и температурную стойкость микросхем;
- ✓ повысить помехоустойчивость и надежность.

Кроме того, важным преимуществом технологии изготовления КМОП БИС на диэлектрической подложке является ее практически полная совместимость с

технологией КМОП БИС на объёмном кремнии и, как следствие, возможность использования одной технологической линии для обоих процессов.

В настоящее время отработаны и промышленно освоены две разновидности технологии КМОП на диэлектрике: КНИ – кремний на изоляторе (оксиде кремния SiO_2) и КНС – кремний на сапфире (Al_2O_3).

Технология КМОП на КНИ подложках является сегодня наряду с технологией КМОП на объёмном кремнии базовой промышленной технологией изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) с субмикронными и глубоко субмикронными топологическими размерами КМОП элементов. Этой технологией владеют ведущие зарубежные компании – производители СБИС: Intel, IBM, AMD, STMicroelectronics, TSMC, NEC и др., а также ведущие отечественные предприятия, освоившие массовый выпуск схем микропроцессоров, памяти, цифровой логики, для которых основными параметрами являются высокая степень интеграции элементов на кристалле, высокое быстродействие и производительность, малое потребление мощности. Благодаря стремительному прогрессу в области полупроводниковых субмикронных технологий, сегодня промышленно изготавливаются КМОП КНИ СБИС с минимальными размерами элементов 65-25 нм.

Важным преимуществом КМОП КНИ СБИС перед аналогичными СБИС на объёмном кремнии, является их более высокая радиационная стойкость к воздействию суммарной поглощенной дозы и одиночных ядерных частиц (ОЯЧ), что чрезвычайно важно при их использовании в аэрокосмической и другой специальной технике.

Физика, технология, характеристики элементов и микросхемотехника КМОП КНИ СБИС в достаточной степени исследованы; им посвящено большое количество публикаций в специализированных журналах и целый ряд серьезных монографий [9-13].

Технология структур «кремний на сапфире» (КНС) была впервые предложена в 1960 году компанией Rockwell исключительно с целью создания материала, обеспечивающего высокое быстродействие и малую мощность потребления ИС на основе комплементарных структур металл-окисел-полупроводник (КМОП) [14].

Практически одновременно эта технология начала создаваться и у нас в стране [15].

Тем не менее, большие потенциальные возможности, заложенные в конструкции и технологии КМОП БИС на КНС, до недавнего времени не были реализованы в массовом производстве из-за трудностей с изготовлением высококачественных исходных КНС - структур. Высокая стоимость исходных КНС структур (на мировом рынке - до 1,5 дол/см²) и, следовательно, более высокая цена КМОП БИС КНС определили в дальнейшем преимущественно специальные применения этой технологии в аэрокосмической и военной технике.

О высокой надежности компонентов на основе структур КНС свидетельствуют следующие факты. Самым далеко находящимся в настоящее время от планеты Земля рукотворным объектом является космический аппарат «Вояджер1» (Voyager1) [16], на котором работает бортовой компьютер на базе микропроцессора, выполненного по КНС технологии фирмы RCA. Космический аппарат «Вояджер1» стартовал 05.09.1977 года и покинул нашу Солнечную систему в 2003 г. В 2006 г. он находился в 14-ти миллиардах километров от Земли. Спутник продолжает функционировать по настоящее время [17]. Современное поколение микроэлектронных компьютеров со структурой КНС используется в бортовой электронной аппаратуре космических аппаратов, создаваемых в рамках крупных международных космических программ, таких как Globalstar, EхoMars, Glanass, Gallileo и др.

В начале 2000-х годов компания Peregrine Semiconductor Corp. (США) совместно с фирмой Asaki Kasei Microsystems Corp. (Япония) разработала усовершенствованную версию КНС технологии на ультратонком кремнии “Ultra Thin Silicon – UTSi”. В очень тонком кремниевом эпитаксиальном слое (до 0,1 мкм) кристаллические дефекты сведены практически к минимуму, что позволило создавать качественные КМОП КНС СБИС с высокими объемами выпуска и низкой ценой [20, 21].

Резкий технологический прогресс, достигнутый в 2000-2002 г.г. фирмой Peregrine (США) совместно с фирмой АКМ Asahi Kasei Microsystems Corp. (Япония), позволил создавать тонкие (до 0,1 мкм) слои кремния на сапфировой

подложке, по качеству практически не уступающие объёмному кремнию.

При этом, благодаря сокращению цикла изготовления, стоимость КМОП схем, изготовленных по UTSi технологии, удалось снизить практически до стоимости схем на объёмном кремнии. Достижения фирмы Peregrine резко изменили отношение к КНС технологии. За короткое время она стала технологией массового производства и вышла на передовые позиции на мировом коммерческом рынке, сохранив при этом свои позиции в области радиационно-стойких схем для аэрокосмической и военной промышленности.

Решить проблемы по разработке устойчиво воспроизводимых параметров элементной базы БИС КМОП КНС под силу только ведущим фирмам-изготовителям микроэлектронных изделий. Поэтому в 2010 г. Peregrine совместно с компанией IBM – мировым лидером в области микроэлектроники и вычислительной техники, приступила к созданию коммерческой Ultra CMOS технологии СБИС на 200 мм КНС пластинах, которую запланировано последовательно реализовать в несколько этапов. На настоящий момент реализованы СБИС с проектными топологическими нормами 250 нм, в ближайшем будущем ожидается создание микросхем с минимальными топологическими размерами 180 нм, 130 нм и 90 нм. [22, 23] Процесс совершенствования технологической платформы (STeP – Semiconductor Technology Platform) фирмы Peregrine по годам представлен на рис.2. Ожидается, что ключевой параметр, характеризующий собственную задержку переключения МОП-транзисторов – постоянная времени $R_{on} C_{off}$, по мере уменьшения топологических проектных норм будет в среднем уменьшаться на 23% в год [24]. Результатом реализации этой программы является создание нового поколения аналого-цифровых СБИС и систем на кристалле не только для традиционных применений в аэрокосмической и военной технике [25], но и в других важных областях: беспроводной связи и телекоммуникациях, мобильной телефонии, цифровом телевидении, спутниковых системах, промышленной и автомобильной электронике и целом ряде других применений [26-28].

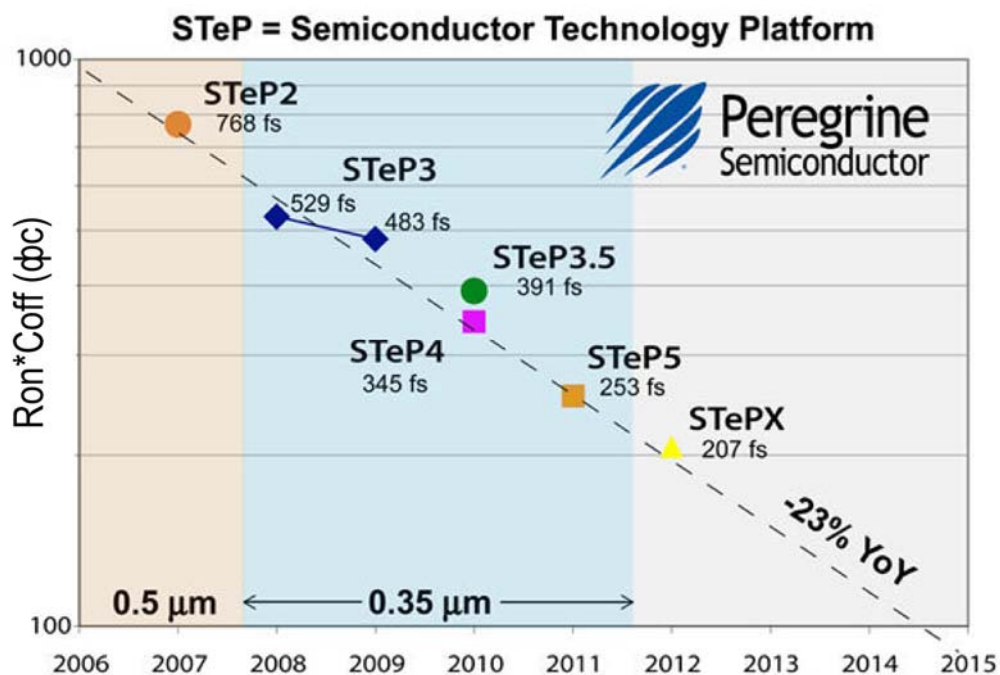


Рис. 2. Совершенствование технологической платформы фирмы Peregrine по годам

В вышеперечисленных устройствах в полной мере проявляется ряд важных преимуществ полностью диэлектрической (сапфировой) подложки. Преимущества КНС структур перед КНИ структурами вытекают из наличия так называемого «эффекта полупроводниковой (Si) подложки», присущего КНИ структурам. В КНИ-структурах промежуточный слой изолятора SiO_2 отделяет верхний активный слой, в котором расположены МОП транзисторы, от кремниевой подложки, которая является основой конструкции и располагается снизу. Такая конструкция, во-первых, заметно ограничивает уровень защиты от электростатического заряда (ESD) и, как следствие, верхний предел рабочих напряжений. Во-вторых, через кремниевую подложку возникают паразитные электрические связи между элементами, токи утечки и т.д., что ограничивает верхний предел рабочих частот. В-третьих, теплопроводность изоляционного слоя SiO_2 в КНИ-структурах ($\lambda_{\text{SiO}_2} = 0,2 - 1,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$) на два порядка меньше, чем у кремния ($\lambda_{\text{Si}} = 84 - 126 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$), что затрудняет отвод тепла из внутренних областей активных приборов и способствует их нагреву. Известно, что эффект «саморазогрева» ограничивает рабочие мощности и частоты КМОП КНИ приборов и негативно сказывается на их надежности. В КНС-структурах эта проблема ощущается гораздо слабее, поскольку

разница в значениях коэффициента теплопроводности сапфира ($\lambda_{\text{Sph}} = 46 \text{ Вт/(м}^* \text{град)}$) и кремния (см. выше) не столь существенна.

Кроме того, на структурах КНС, по сравнению со структурами КНИ, удается изготавливать активные элементы с более высокой линейностью характеристик и усилением, а также пассивные элементы (резисторы, емкости, индуктивности) с очень высокой добротностью, что чрезвычайно важно при создании высококачественных радиочастотных и СВЧ микросхем. Испытания и практика эксплуатации аппаратуры показывают, что приборы на КНИ уступают приборам на КНС не только по предельным частотам усиления f_T и f_{max} , но и по показателям температурной и радиационной стойкости и надежности.

Для любых технологий и в первую очередь для технологий массового производства, очень важное значение имеют факторы обеспечивающие снижение стоимости. Большим преимуществом Ultra CMOS перед другими технологиями является то, что микросхемы изготавливаются на тех же самых фабриках, на которых используются обычные кремниевые пластины. Однако, благодаря преимуществам полностью диэлектрической (сапфировой) подложки один и тот же уровень функциональных параметров микросхем достигается на менее продвинутом, а, следовательно, и менее дорогом оборудовании и технологическом процессе. Например, 0,25 мкм технология КНС обеспечивает такой же уровень электрических параметров КМОП микросхем, как 0,13 мкм технология объемного кремния. Снижение издержек от использования технологии не самого последнего и передового уровня огромно. Экономия складывается не только за счет более дорогого технологического оборудования и амортизационных затрат, связанных с более поздней и совершенной, но менее освоенной технологией производства, а также за счет существенно более низких затрат на проведение самих технологических процессов. Хотя очевидно, что подложки КНС всегда будут более дороги, чем подложки на основе материалов $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, обеспечивающих подобную производительность.

Благодаря тому, что в рамках UTSi-технологии достигается почти идеальная интеграция на сапфировой подложке пассивных (резисторов, конденсаторов,

индуктивностей) и активных элементов, открываются отличные перспективы для создания суперсовременных БИС на КНС для сбора и обработки данных, а также схем радиочастотного и СВЧ-диапазона. За разработку UTSi-технологии в 2011 г. Марк Бургенер (Mark Burgener) и Рональд Риди (Ronald Reedy), основатели компании Peregrine Semiconductor, получили премию международной некоммерческой ассоциации IEEE, которая присуждается за вклад в развитие технологий. Основатели компании считают, что КНС – наиболее успешная разновидность технологии КНИ, предназначенная для совершенствования рабочих характеристик и интеграции в радиочастотных устройствах. Спрос на эту технологию возрастает с 1990-х гг., когда появились коммерческие беспроводные сети. К настоящему времени совокупный объем коммерческих изделий, изготовленных по технологии Ultra CMOS, составил более 700 млн. шт. Стоимость сапфировых подложек также быстро снижается, благодаря огромному спросу на светодиоды белого свечения, где потребление этих подложек составляет десятки миллионов штук, и это дает дополнительные преимущества КНС технологии. Ultra CMOS технология оказалась более мощной, чем поначалу казалось. По мере появления в сотовых телефонах цифровых устройств беспроводной связи параметр «линейность» стал весьма востребованным. Благодаря этому, UTSi технология вышла на передовые позиции на рынке сотовой телефонии (на рынке самой жесткой конкурентной борьбы).

Благодаря оптической прозрачности сапфировой подложки, оптоэлектронные чипы на основе КНС также являются перспективной элементной базой для создания оптоэлектронных модулей.

Таким образом, решение научно-технических задач создания и внедрения КНС технологии и организации производства высоконадёжных БИС на её основе является актуальной проблемой.

Принципиально, что элементная база важнейших радиоэлектронных систем, имеющих оборонное значение, может создаваться отечественной промышленностью.

Поэтому российскими учеными поставлена и решена задача создания

отечественной КНС технологии, которая позволяет реализовать отмеченные выше возможности и обеспечить потребности страны в БИС КНС военного и специального назначения, не прибегая к услугам зарубежных производителей.

У нас в стране технология КМОП КНС интегральных схем была разработана и промышленно освоена в 70-х годах прошлого столетия [15]. Работы шли практически параллельно с разработками зарубежных компаний RCA, Harris, GEC-Plessey.

В течение более чем 40 лет КНС технология обеспечивала, и сегодня продолжает обеспечивать потребности страны в радиационно-стойких микросхемах аэрокосмического и военного назначения, не прибегая к услугам зарубежных производителей и решая задачи импортозамещения в таких важных областях как безопасность и обороноспособность страны. В частности, функционально-полный микропроцессорный комплект микросхем, изготавливаемых по отечественной КМОП КНС технологии, многие годы используется в бортовых вычислительных системах управления баллистических ракет стратегического назначения, составляющих основу оборонительного щита Российской Федерации [18, 19].

Что касается гражданских применений, то БИС и СнК на КНС подложках, изготовленные по Ultra CMOS технологии, являются перспективной элементной базой для отечественных систем мобильной связи и телекоммуникаций, поскольку обеспечивают высокое быстродействие, высокую добротность и линейность характеристик, малый уровень собственных шумов в сочетании с высокой надежностью и помехоустойчивостью при эксплуатации в реальных условиях космического пространства.

Значительный вклад в развитие и становление отечественной КМОП КНС технологии внесли работы Александрова П.А., Романова А.А., Чумака В.Д., Яромского Я.П., Яшанина И.Б. и др.

Элементная база и схемотехника КМОП КНС развивалась благодаря работам Деревянкина В.М., Машевича П.Р., Новожилова Е.А., Полякова И.В., Сенникова И.А., Улановой А.В., Черного А.И., Яненко А.В. и др.

Большой вклад в область системотехники и аппаратурного использования

КМОП КНС ИС и БИС Антимиров В.М., Синегубко Л.А., Сметанов А.Ю., Тропезников М.Б., Усов Н.Н. и др.

К сожалению, у нас в стране и за рубежом КНС технология по количеству научно-технических публикаций и по степени освещения в других информационных источниках значительно уступает КНИ технологии. Материал по текущим разработкам приборов и схем на основе КНС представлен в немногочисленных журнальных статьях и трудах профильных конференций. Из имеющихся крупных работ, посвященных КНС технологии, следует в первую очередь отметить обзоры [31, 32] и монографии [15, 19, 33, 34].

Работа [31] представляет собой обзор методов создания ультратонких слоев КНС без детального их рассмотрения. Монография [33] посвящена физическим, химическим, механическим и электрическим свойствам сапфира, как материала электронной техники. В монографии [15] описаны первые отечественные результаты, полученные в середине 1970-х годов по созданию эпитаксиальных КНС структур и МОП-транзисторов на их основе. В более поздней монографии 2006 года [19] приведена архитектура, электрические и др. характеристики отечественных цифровых и аналого-цифровых БИС, изготовленных по КМОП КНС технологии ультратонких слоев КНС. Современные КМОП КНС приборы и интегральные схемы, изготовленные на базе UTSi технологии, наиболее полно на сегодняшний день представлены в зарубежной монографии [34], изданной в 2010 году.

Приходится, к сожалению, констатировать, что российские книги и публикации не освещают в должной степени современное состояние работ в области технологии, элементной базы и схемотехники КМОП КНС. Зарубежные монографии и обзоры труднодоступны российским специалистам и не отражают ряд важных вопросов. Журнальные публикации и труды конференций носят, как правило, узконаправленный характер.

Очевидно, что область применения КМОП КНС интегральных схем будет неуклонно расширяться. Кроме того возможно появление новых типов БИС и СнК со структурой КНС.

В связи с вышеизложенным, возникла потребность обобщить имеющиеся в этой

области научно-технические сведения и разработки. В этом состоит главная задача настоящей книги.

Книга написана на основании материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной печати, кроме того она в значительной степени базируется на теоретических и практических результатах авторов, в течении многих лет работающих в этой области.

В книге рассмотрены следующие вопросы: специфика интегральных схем со структурой КМОП КНС; требования к исходным материалам и КНС структурам; базовые технологические процессы изготовления приборов и схем; типовые конструкции элементов КМОП КНС интегральных схем различных поколений, их электрические характеристики и параметры; методы приборно-технологического и схемотехнического моделирования приборных структур и типовых цифровых и аналоговых схемных фрагментов; основные характеристики и параметры радиационно-стойких КМОП КНС микросхем и БИС отечественных и зарубежных производителей; элементная база и особенности оптоэлектронных ИС со встроенным источником питания.

На всех уровнях изложения: от выбора исходного материала до контроля и тестирования выходных параметров и характеристик изготовленных микросхем, особое внимание в книге уделяется такому важному для этого класса микросхем показателю, как радиационная стойкость.

В главе 1 рассмотрены особенности создания гетероэпитаксиальных структур кремния на сапфире, приведены параметры, характеризующие качество границы раздела сапфир-полупроводник, описаны результаты исследования глубоких уровней в структурах КНС методом термостимулированного раздела конденсатора (ТРК).

В главе 2 описана промышленная технология создания радиационно-стойких КМОП КНС интегральных схем первых поколений. Маршрут SOS2 с длиной канала МОП-транзисторов 4-3 мкм и маршрут SOS3 с длиной канала 2 мкм. Подробно рассмотрены основные технологические операции эпитаксии кремниевых слоев n- и p-типа, термического окисления, микроциклы формирования активной МОП или

МНОП-структуры, областей стока и истока. Приведены экспериментальные результаты для зарядов в оксиде и на границе раздела Si/SiO₂, результаты измерения ВАХ МОП-транзисторов, токов утечки, пороговых напряжений и напряжений пробоя МОП-структуры и рп-переходов.

В главе 3 описана промышленная технология изготовления радиационно-стойких КМОП КНС ИС с коротким каналом. Рассмотрены короткоканальные эффекты в МОП КНС транзисторах и особенности их влияния на основные параметры: пороговое напряжение, ток утечки, подвижность, кинк-эффект и др. Приведен технологический маршрут изготовления КМОП КНС ИС (SOS4) с отдельным легированием карманов n- и р-канальных транзисторов с длиной канала 1,5-1,25 мкм. Показано, что ограничения технологии SOS4 связаны с большой толщиной гетероэпитаксиального слоя кремния.

В рамках технологии SOS4 при уменьшении толщины поликремниевых слоев рассмотрены приемы шунтирования поликремниевых затворов тугоплавкими металлами (вольфрамом) или их силицидами (силицидом титана).

Рассмотрена наиболее совершенная в настоящее время технология создания КМОП КНС БИС на ультратонких слоях кремния (~0,1 мкм) с длиной канала 0,5 мкм и менее – UTSi-технология фирмы Peregrine. Показаны основные отличия UTSi-технологии от двухкарманной технологии SOS4.

Глава 4 посвящена элементам ИС и БИС, которые реализуются в рамках промышленной КНС-технологии. Рассмотрены структуры и электрические характеристики (ВАХ и ВФХ) и параметры $U_{пор}$, $I_{нас}$, $I_{утечки}$, $U_{проб}$ и др. следующих элементов: 1) n- и р-канальных МОП-транзисторов и КМОП-ячеек; 2) фотовольтаических преобразователей; 3) стабилитронов; 4) пассивных RC-цепочек и сенсоров со структурой МОП, изготовленных по различным вариантам КНС-технологии: SOS2, SOS3, SOS4.

В главе 5 рассмотрена подсистема моделирования элементов радиационно-стойких КМОП КНС ИС и БИС. Описана 5-ти уровневая методика моделирования, которая включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор исходных КНС-структур, в наименьшей степени чувствительных к

высокотемпературным обработкам и радиационным воздействиям;

2) приборно-технологическое моделирование физической структуры прибора с помощью пакета Synopsys TCAD;

3) разработка схмотехнических SPICE-моделей МОП КНС транзисторов, учитывающих радиационное воздействие;

4) разработка макромоделей типовых аналоговых и цифровых ячеек и фрагментов ИС с учетом радиационных воздействий; анализ их радиационной стойкости;

5) SPICE моделирование функционально законченных ИС и БИС с учетом радиационных воздействий; анализ их радиационной стойкости.

В главе 6 приведены описания и основные параметры радиационно-стойких КМОП КНС ИС и БИС, выпускаемых отечественными производителями: ОАО НПП «Сапфир», ОАО «Ангстрем», ФГУП ФНПЦ НИИ ИС им. Ю.Е. Седакова, ОАО «НПО ИТ».

В главе 7 приведены основные показатели КМОП КНС и БИС, выпускаемых зарубежными фирмами: Peregrine Semiconductor Corp. (США), Dynex Semiconductor (США), Intersil Corp. (бывшая HARRIS) (США), GEC PLESSY Semiconductor (Великобритания), АВВ НАFO (Швеция), SMARTECH (Финляндия) для военных и космических применений.

Глава 8 посвящена оптоэлектронным ИС и БИС со встроенным источником питания, а также микромощным высоковольтным фотоэнергетическим модулям для автономного питания электронных устройств. Описана структура и основные характеристики базового элемента – фотодиода с увеличенной *i*-базой и управляющим затвором. Приведен ряд схмотехнических решений для отдельных фрагментов оптоэлектронных ИС и фотовольтаических преобразователей. В отличие от материалов, приведенных для фоточувствительных ИС со структурой КНС в известной зарубежной монографии E. Culurciello [34], в главе рассмотрено другое направление развития оптоэлектронных ИС на КНС-структурах, базирующееся исключительно на оригинальных отечественных разработках.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам рукописи: академику, доктору технических наук А.С. Сигову и профессору, доктору технических наук М.А. Королеву за полезные замечания, учтенные при ее доработке.

Монография подготовлена в результате проведения исследования (№ проекта 15-01-0165) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) в 2015-2016 г.г. и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

ГЛАВА 1. Особенности интегральных схем со структурой кремний на сапфире

1.1 Особенности технологии создания гетероэпитаксиальных структур кремния на сапфире

Расширение областей применения КМОП БИС КНС, используемых в настоящее время для создания аэрокосмической и специальной аппаратуры связано, прежде всего, с совершенствованием и развитием базового процесса изготовления КМОП БИС КНС, который включает большой объем работ по созданию исходных структур кремния на сапфире, а также выращиванию монокристаллов сапфира и изготовлению подложек, удовлетворяющих требованиям гетероэпитаксии кремния. На сегодняшний день имеется широкий спектр информации о сапфире и областях его применения. Технологические особенности выращивания монокристаллов сапфира и исследования его характеристик достаточно подробно отражены в работе [18]. При разработке структур КНС и электронных компонентов по технологии КМОП БИС КНС разработчикам и технологам важна и интересна информация о состоянии границы раздела $Al_2O_3 - Si$, критериях оценки ее качества, а также путях уменьшения влияния переходного слоя на границе раздела $Al_2O_3 - Si$ на качество электрически активного слоя кремния.

При изготовлении и подготовке сапфировых подложек для гетероэпитаксии кремния можно выделить два этапа.

На первом этапе обеспечиваются кристаллографические, геометрические параметры, а также требования по чистоте обработки и другие (табл. 1.1, 1.2).

Таблица 1.1. Требования, предъявляемые к монокристаллам лейкосапфира.

1.1. Механические характеристики	
Параметры решетки	a=4.763E c=13.003 E
Плотность	397 г/см ³
Твердость по Моосу	9
Твердость по Виккерсу	2300
Прочность при растяжении	230 кгс/мм ²
Прочность при сжатии	300 кгс/мм ²
Модуль Юнга	4.8 10 ⁶ кгс/мм ²
Предел прочности при изгибе	7000 кгс/мм ²
Точка плавления	2053°C
1.2 Физические характеристики	
Коэффициент линейного термического расширения	5.3 10 ⁻⁶ /°C (параллельно оси C)
	4.5 10 ⁻⁶ /°C (перпендикулярно оси C)
Коэффициент теплопроводности	0.1 кал/см с °C (25 °C)
Удельная теплоемкость	0.18 кал/г с °C (25 °C)
Излучательная способность	менее 0.02
	λ=2.6 до 3.7 мкм (880°C)
1.3 Электрические характеристики	
Удельное сопротивление	1 10 ¹⁶ Ом см
Диэлектрическая постоянная	11.5 (параллельно оси C)
	9.3 (перпендикулярно оси C)
Электрическая прочность	480 000 В/см
Тангенс угла диэлектрических потерь	0.000030 (плоскость C, 10 ¹⁰ Гц)
	0.000086 (плоскость A, 10 ¹⁰ Гц)
1.4 Оптические характеристики	
Коэффициент преломления	n _o =1.768 n _c =1.760

Таблица 1.2. Требования, предъявляемые к подложкам сапфира

1	Диаметр пластин, мм	60-100
2	Ориентация поверхности пластин	(1012)
3	Толщина, мкм	450 - 550
4	Прогиб, мкм	33 - 60
5	Шероховатость по ГОСТ 2789-73	0.05
	рабочей поверхности R _z , мкм	
	нерабочей поверхности R _a , мкм	
		0.63

Фирмы-изготовители сапфировых подложек часто владеют и технологией изготовления гетероэпитаксиальных структур кремния, т.к. экономически выгодно предлагать на рынок готовые гетероструктуры кремния на сапфире (KHC) или нитрида галлия на сапфире (GaN/Al₂O₃).

На втором этапе - подготовка сапфировой подложки перед эпитаксией полупроводникового материала выходит за рамки требований технических условий на продукцию (сапфировую подложку), поэтому в этот этап практически всегда остается “за кадром”, является “ноу-хау” фирмы изготовителя гетероструктур. Технология характеризуется умением управлять качеством границы раздела сапфир-полупроводник, которая определяет стабильность поведения переходного слоя при последующих температурных воздействиях в технологическом цикле изготовления КМОП БИС, а также при специальных внешних воздействиях на готовую продукцию и др. испытаниях.

В процессе изготовления БИС КНС используются исходные гетероэпитаксиальные структуры кремния на сапфире с различной толщиной слоя кремния (0,6; 0,3; 0,1 мкм). Улучшение функциональных возможностей БИС, а также их отдельных характеристик для эксплуатации микросхем с повышенными требованиями по радиационной стойкости в открытом космосе предусматривает применение структур КНС с меньшей толщиной слоя кремния и высокой однородностью свойств.

Минимальная толщина эпитаксиального слоя кремния во многом определяется величиной переходного слоя на границе раздела $Al_2O_3 - Si$. Считается, что переходный слой – слой повышенной дефектности, состоящий из сложных соединений кремния, алюминия и кислорода, возникает из-за несоответствия параметров решеток подложки Al_2O_3 и пленки Si , различия их термических коэффициентов расширения, а также вследствие автолегирования кремниевой пленки алюминием. Плотность дефектов уменьшается при увеличении расстояния от границы раздела. На первых этапах роста кремния с ориентацией (100) на сапфире (1012) образуются островки кремния с ориентацией (110). В работе [19] при помощи “просвечивающей” электронной микроскопии удалось показать, что плотность зародышей кремния с ориентациями (100) и (110) в начальный период времени резко изменяется. Плотность зародышей (100) уменьшается от величины $1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ через 0.5 секунды от начала роста до $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ 5 секунды роста эпитаксиального слоя.

Столь резкое уменьшение количества зародышей является, возможно, результатом коалесценции зародышей. В то же время плотность зародышей с ориентацией (110) на протяжении первых 2.5 секунд роста остается постоянной ($4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), а в течение следующей секунды уменьшается вдвое. Такая зависимость свидетельствует о том, что зародыши с ориентацией (110) стабильны, по крайней мере, когда их размеры малы. В то же время изменение площади, занятой зародышами кремния ориентацией (100) и (110) через одну секунду роста, отличается практически на два порядка (рис.1.1).

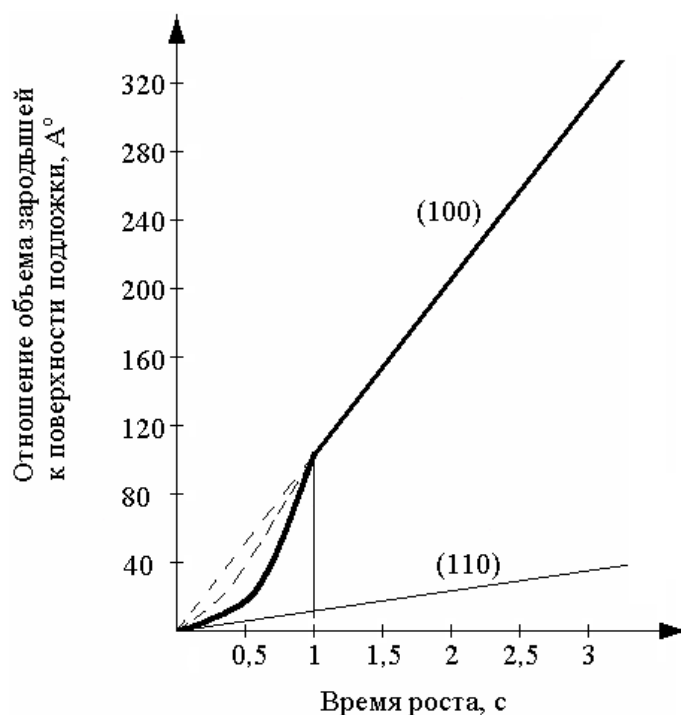


Рис. 1.1.

Нарушение порядка расположения атомов, следующих за ближайшими соседями, приводит к образованию двойниковой конфигурации. Энергия двойников относительно мала, т. к. имеет место лишь незначительное изменение в диагональном расположении атомов.

Движения атомных слоёв, в результате которых образуется двойник, похоже на движение при скольжении. Поскольку накопленная энергия деформации при образовании двойников мала, то не следует ожидать значительных изменений электронной зонной структуры.

Действительно, в случае ненарушенных двойников не было обнаружено значительных электрических эффектов даже при измерении времени жизни неосновных носителей. Этот наиболее чувствительный к структурным нарушениям электронный параметр почти не зависит от двойников, находящихся на пути движения носителей, если отсутствует градиент концентрации примесей. Это происходит потому, что процесс двойникования является естественным путем поглощения избытка энергии, выделяющегося при росте эпитаксиального кремния. Однако, если кристалл содержит много двойников, то им всегда сопутствуют дефекты упаковки, заканчивающиеся на частичных дислокациях. Кроме того, скольжение двойниковых осей во многих случаях может создавать ненасыщенные связи (свободная валентность решетки), которые притягивают свободные электроны и образуют области пространственного заряда. При рассмотрении более сложных двойниковых конфигураций с их повышенной концентрацией с учетом боковых двойниковых границ показано [20], что боковые двойниковые границы оказывают влияние на структурно-чувствительные параметры, такие, как подвижность и время жизни носителей заряда. Однако, большие области пространственного заряда, обусловленные р-п-переходами, менее подвержены влиянию двойников. Гетероструктура КНС с заметным числом двойниковых границ может, тем не менее, рассматриваться как электрически “хороший” материал. Присутствие большого количества двойников в структурах КНС не препятствовало изготовлению воспроизводимых диодов и диодных матриц. Однако, при изготовлении воспроизводимых МОП структур такой материал использовать не следует, т.к. при приложении электрического напряжения смещения возможны необратимые изменения р-п-перехода и неоднородное распределение объемного заряда при формировании инверсионного канала проводимости.

Разориентация или целенаправленное отклонение от ориентации подложки сапфира (1012) может приводить к перераспределению соотношения между зародышами кремния ориентации (100) и (110) и образованию зародышей с другими ориентациями, что возможно при блочном сапфире. Это может приводить к образованию участков с повышенной дефектностью и разбросу электрофизических

параметров. Исходя из вышеизложенного, при выработке требований к подложке сапфира отклонение от заданной ориентации должно быть не более $1 \div 2^\circ$.

Изучение морфологии гетероэпитаксиальных слоёв кремния показало, что финишная полировка сапфировых подложек является одним из ключевых моментов при получении качественных структур КНС. Прямые методы контроля чистоты поверхности сапфировой подложки затруднены, последующее же гетероэпитаксиальное наращивание кремния позволяет декорировать нарушенные участки, которые хорошо заметны при боковом освещении.

Гетероэпитаксиальное наращивание кремния проводят при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ разложением моносилана в атмосфере водорода по реакции:



Известно, что атомы кремния осаждаются преимущественно на узлах, занятых алюминием. Имеет место также реакция взаимодействия сапфира с газообразным водородом. Присутствие также SiOи SiO₂ может приводить к реакциям:



В начальной стадии роста по реакции (1.1) может идти и автолегирование алюминием растущего кремниевого слоя. Автолегирование может также идти от взаимодействия островков кремния с сапфировой подложкой:



Обратная сторона сапфировой подложки также может взаимодействовать с карбидизированным нагревателем по реакции (1.5), поэтому к подготовке и качеству нагревателя предъявляются повышенные требования.

Одним из путей снижения эффекта автолегирования растущего эпитаксиального слоя кремния алюминием является уменьшение или связывание кислорода на поверхности сапфира. В работе [21] по гетероэпитаксии *GaAsiGaN* были найдены такие решения путём наращивания на поверхности *Al₂O₃*буферных слоёв *AlN*.

При гетероэпитаксии кремния возможно также проведение прямого азотирования сапфировой подложки. Обычно в технологии эпитаксиального наращивания кремния используются карбидизированные графитовые нагреватели. Работы по прямому азотированию и модернизации установки эпитаксии заключались в использовании нагревателя из молибдена. Перед процессом эпитаксии сапфировую подложку обрабатывали при температурах $1100 \div 1500^\circ\text{C}$ аммиаком в атмосфере инертного газа или водорода. По реакции:



частично замещая атомы кислорода на азот, наблюдали образование твёрдых растворов $\text{AlN} - \text{Al}_2\text{O}_3$, что заметно снижало эффект автолегирования и улучшало структурное совершенство наращиваемого слоя. Оценка структурного совершенства проводилась по полуширине кривой дифракционного отражения.

Наличие подслоя нитрида алюминия позволяет уменьшить различие температурных коэффициентов линейного расширения подложки сапфира с кремнием.

Величина механических напряжений в структурах КНС может быть определена по формуле:

$$\sigma = E_{Si} (\alpha_C - \alpha_{Si}) \Delta T, \quad (1.7)$$

где E_{Si} — модуль упругости кремния;

α_C — коэффициент теплового расширения сапфира;

α_{Si} — коэффициент теплового расширения кремния;

ΔT — изменение температуры

При $\alpha_C = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и $\alpha_{Si} = 4,24 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и значительной толщине пленки кремния напряжения в плёнке могут достигать до 108 Н/м^2 . Значение $\alpha_{\text{AlN}} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, что позволяет уменьшить различие в коэффициентах теплового расширения, поэтому применение буферного слоя из нитрида алюминия оправдано.

Обеспечение качества растущего эпитаксиального слоя представляет комплексную задачу. Наряду с подготовкой подложки (некоторые приёмы изложены выше) очень важно также выбрать параметры процесса эпитаксии,

которые обеспечивают требуемые структурные и электрофизические параметры гетероэпитаксиального слоя. На рис. (1.2, 1.3, 1.4) приведены качественные зависимости свойств эпитаксиального слоя от параметров процесса эпитаксии. Введение, на первой стадии эпитаксии в состав газовой среды, наряду с основным носителем кремния – моносиланом (SiH_4), добавок тетрахлорида кремния ($SiCl_4$) или дихлорсилана (SiH_2Cl_2) позволяет:

улучшить коалесценцию зародышей кремния ориентации (100);

подавить гомогенный процесс разложения моносилана в газовой фазе;

уменьшить дефектность выращиваемых слоёв, а также управлять величиной и типом заряда на поверхности раздела $Al_2O_3 - Si$

с помощью температуры процесса выращивания, охлаждения структур и скорости роста эпитаксиального слоя.

Для обеспечения радиационной стойкости р-канального транзистора необходимо, чтобы тип электропроводности кремниевого слоя на границе $Al_2O_3 - Si$ был электронным.

При этом для уменьшения загрязнения наращиваемых слоев продуктами реакции, процесс наращивания стараются проводить в две стадии:

- ✓ на первой стадии обеспечивается быстрое осаждение сплошной пленки кремния на поверхности сапфира для исключения взаимодействия водорода с сапфиром за счет пересыщения кремнийсодержащим компонентом и уменьшения температуры эпитаксии;
- ✓ на второй стадии выполняется более медленное наращивание кремниевого слоя до требуемой толщины с более совершенной структурой.

Дополнительным резервом улучшения качества гетероэпитаксиальных слоев кремния является, безусловно, повышение качества исходных компонентов, используемых в процессе гетероэпитаксии, прежде всего по содержанию кислорода, остатков паров воды, примесей металлов, образующих глубокие уровни в запрещенной зоне Si.

Моносилан целесообразно использовать в смеси с аргоном, т.к. последний легче подвергается очистке. Необходимо исключить натекание в газовых линиях и эпитаксиальном оборудовании, также целесообразен предварительный прогрев газовых линий подачи моносилана до 450°C для “осушки” силана и окисления SiO до (SiO_2) с последующим улавливанием образующегося порошка фильтрами. Соблюдение требуемого режима нагрева и охлаждения структур КНС важно не только в процессе изготовления эпитаксиальных структур, но и во всем цикле изготовления КМОП интегральных схем для исключения термоударов.

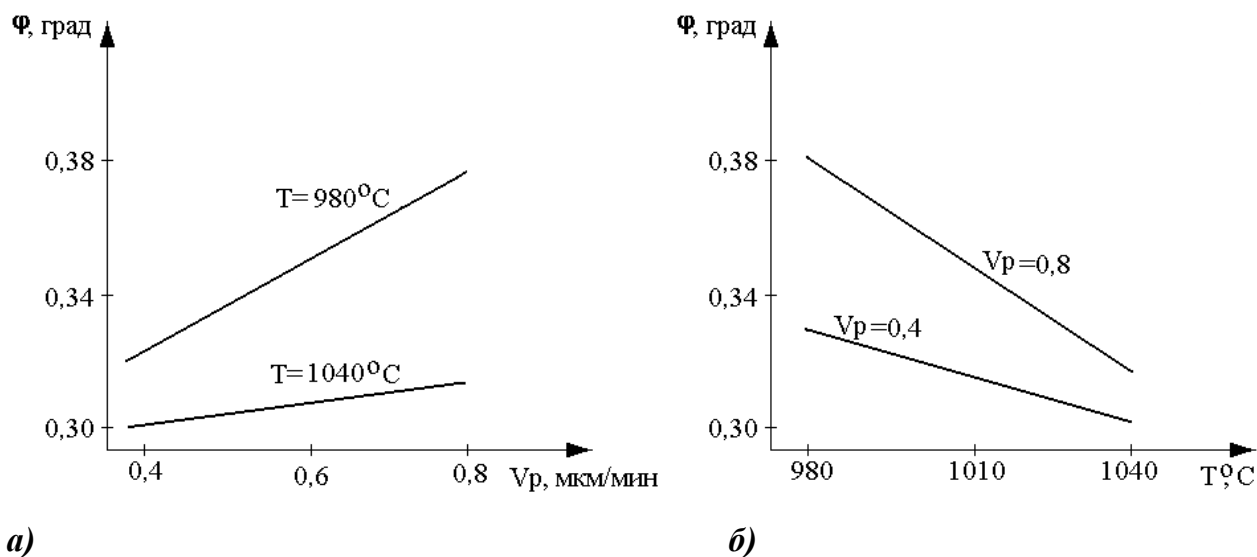


Рис. 1.2. Зависимости ширины кривой качания от скорости а) и температуры б) эпитаксиального наращивания слоя кремния.

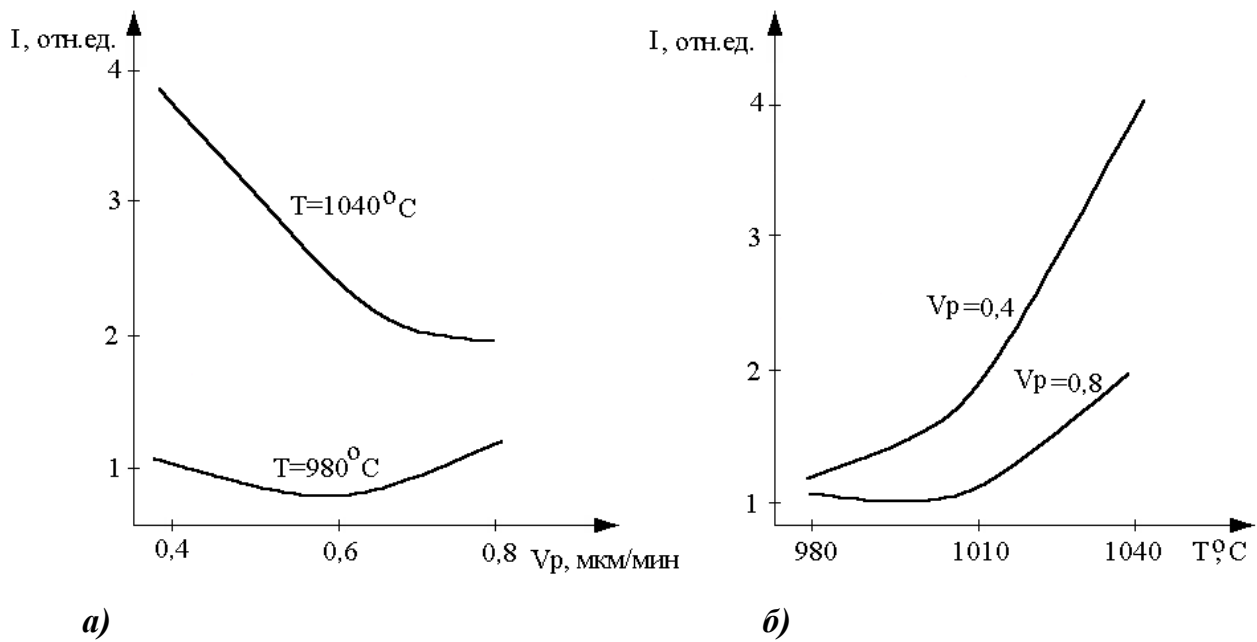


Рис. 1.3. Зависимости интенсивности рассеяния УФ-излучения поверхностью слоя КНС от скорости а) и температуры б) эпитаксиального наращивания слоя кремния.

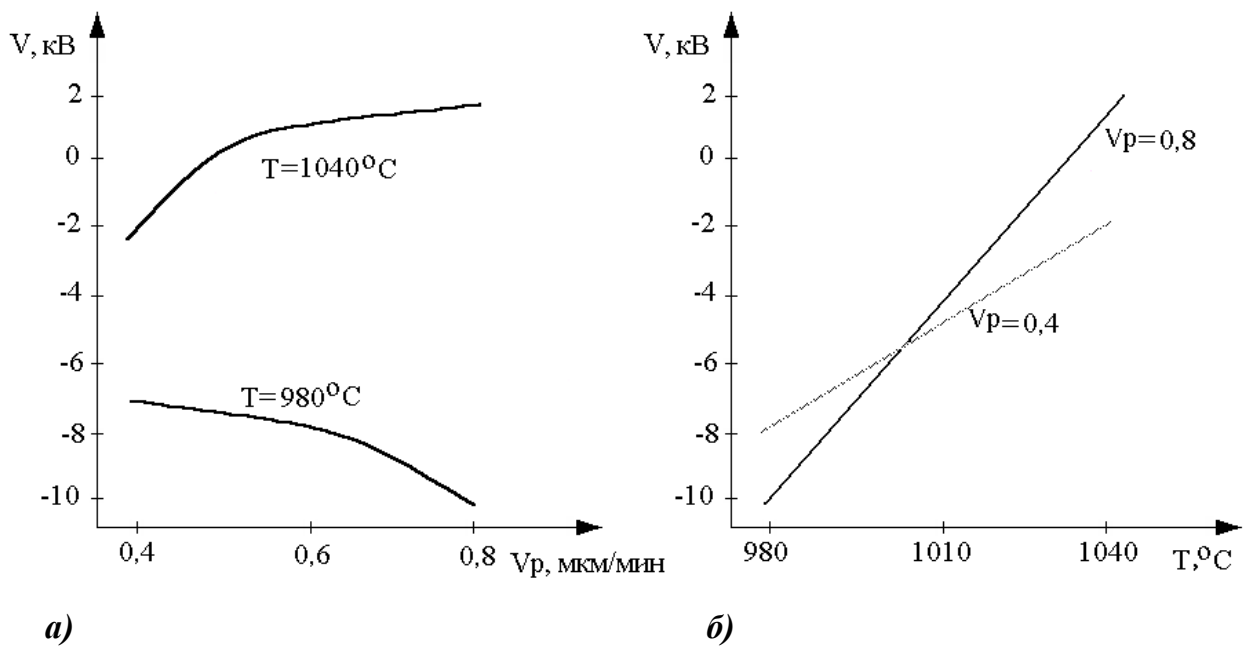


Рис 1.4. Изменение величины прикладываемого внешнего напряжения со стороны сапфира для обеспечения минимальной проводимости слоя КНС от скорости а) и температуры б) эпитаксиального наращивания слоя кремния.

Основные параметры структур КНС приведены в табл. 1.3, 1.4.

Таблица 1.3. Общие параметры пластин КНС

№№	Наименование параметра	Тип А и Б			
		А		Б	
1	Диаметр, мм	76		100	
2	Отклонение от плоскости не более, мкм	20	7	25	10

Таблица 1.4. Параметры гетероэпитаксиального слоя (ГЭС) кремния

№№	Наименование параметра	Тип А/Б			
		Мин	Номинал	Макс	
1	Толщина ГЭС в центре структуры, мкм	0,6	0,54	0,60	0,66
		0,3	0,27	0,30	0,33
2	Отклонение толщины ГЭС по площади структуры КНС от номинала, мкм	0,6	0,09		
		0,3	0/0,05		
3	Удельное электрическое сопротивление ГЭС кремния, Ом*см	0 диапазон	50,0		
		1 диапазон	2,5		15,0/7,5
4	Интенсивность рассеяния УФ излучения ГЭС, отн. ед.	0,6			1,5
		0,3			0/≤3,0
5	Плотность дефектов, см ⁻²	0,6			20/3
		0,3			3

Уровень легирования и толщина гетероэпитаксиального слоя непосредственным образом влияют на область применения структуры КНС.

Области применения отдельных групп структур кремния на сапфире

1) Структуры КНС с толщиной слоя Si-0,6 мкм

а) диапазон (n-тип, $\rho \sim 5$ Ом см)

(однокарманная технология с перекомпенсацией p-кармана)

для цифровых КМОП БИС с повышенной радиационной стойкостью, базовый матричный кристалл с проектными нормами 3-4 мкм

б) диапазон (i-тип, $\rho = 30-50$ Ом см)

для оптоэлектронных КМОП БИС и фото-энергетических модулей

2) Структуры КНС с толщиной слоя Si -0,3 мкм

а) 1 диапазон (n-тип, $\rho \sim 5 \text{ Ом см}$)

для цифровых, аналого-цифровых и специальных БИС с повышенным уровнем бессбойной работы с проектными нормами 2-3 мкм.

б) диапазон (i-тип, $\rho = 30-50 \text{ Ом см}$)

(двухкарманная технология) для цифровых, аналого-цифровых КМОП БИС и специальных ОЗУ с повышенным уровнем бессбойной работы с проектными нормами 2 мкм.

1.2. Методы исследования параметров глубоких уровней в структурах КНС

Известно, что свойства кристаллических твердых тел во многом определяются кристаллической структурой и ее дефектами. Дефекты кристаллической структуры нарушают периодичность потенциала кристаллической решетки, и в запрещенной зоне полупроводника появляются локальные разрешенные состояния.

Мелкие уровни, энергетическое положение которых описывается водородно-подобной моделью, в основном, определяют проводимость материала, а более глубокие – время установления стационарного состояния и время жизни неравновесных носителей заряда в кристалле. Для характеристики локальных уровней используются такие параметры, как E_t – энергетическое положение в запрещенной зоне, N_t – концентрация, S_t – сечение захвата.

Во всех полупроводниках и полупроводниковых соединениях (в частности, в кремнии, гетероэпитаксиальных слоях кремния на сапфире, а также в широкозонных соединениях группы $A^{III}B^V$) всегда присутствуют в значительной степени неконтролируемые примеси и дефекты кристаллической решетки, причем их наличие обусловлено не только специальным легированием, но и недостатками и особенностями технологии изготовления материалов и приборов. Как правило, в

полупроводнике присутствуют несколько неконтролируемых примесей, образующих целую систему уровней. Наблюдаемые уровни могут быть также связаны с ассоциацией примесей и с различными комплексами типа <примесь-вакансия> и т.д., причем определяющее влияние на параметры материала или прибора могут оказывать примеси или дефекты кристаллической решетки, не обязательно присутствующие в кристалле в максимальной концентрации. Поэтому метод исследования глубоких уровней должен обладать высокой чувствительностью, не зависящей от природы и глубины залегания уровней, и определять все основные параметры данных уровней.

Для изучения глубоких центров предложены различные экспериментальные методики, в числе которых определение локальных энергетических уровней по температурной зависимости коэффициента Холла, измерение фотопроводимости, фотолюминесценции и фотоемкости р-п переходов, фото-и катодолюминесценции однородных полупроводников и электролюминесценции р-п переходов и др.

Однако, существующие методики являются недостаточно эффективными. В частности, информацию о группе уровней в одном образце из температурной зависимости равновесной концентрации носителей заряда можно получить только в том случае, когда для каждого уровня имеется свой не перекрывающийся интервал температур, где осуществляется его ионизация, что обычно не выполняется для близко расположенных уровней. Чувствительность метода определения параметров глубоких уровней по спектрам фото- и катодолюминесценции различна для разных уровней, метод не позволяет изучать уровни безизлучательной рекомбинации, которые во многом определяют параметры материала и приборов и т.д.

Методы термостимулирования занимают особое место при изучении примесных центров и имеют целый ряд достоинств [22].

В экспериментальном отношении методы термостимулирования достаточно просты и не требуют применения дорогого или уникального оборудования; в теоретическом отношении они достаточно обоснованы.

Методы термостимулирования – это методы наблюдения сигнала на образце,

который с помощью возбуждения переводится в неравновесное состояние, которое сохраняется при охлаждении до низкой температуры. Затем при монотонном увеличении температуры образец переходит из возбужденного неравновесного состояния в равновесное и регистрируется сигнал, вызванный релаксационным процессом этого перехода – например, ток или люминесценция. Таким образом, на первом этапе создается неравновесное заполнение уровней, например, освещением в методе термостимулированного тока (ТСП) или электрическим полем в методе термостимулированного разряда конденсатора (ТРК). А на втором этапе, осуществляемом после снятия возбуждения при нагреве, происходит регистрация наблюдаемого сигнала.

Методами термостимулирования определяются:

- ✓ энергетическое положение;
- ✓ концентрация начальных уровней в запрещенной зоне полупроводника;
- ✓ сечение захвата.

Причём могут быть изучены уровни любой природы, независимо от того, связаны они с примесными атомами или дефектами кристаллической структуры или комплексами, включающими и то и другое. Методами термостимулирования могут быть изучены как акцепторные, так и донорные уровни, играющие в полупроводнике роль как уровней прилипания, так и уровней рекомбинации.

Методы термостимулирования являются неразрушающими методами. Поскольку вид кривых термостимулирования воспроизводится при воспроизведении условий эксперимента, то методами термостимулирования можно получить достоверную (многократно проверенную) и весьма детальную информацию.

Метод термостимулированного разряда конденсатора (ТРК) обладает высокой чувствительностью, что позволяет изучать примесные уровни не только в объеме, но и на поверхности.

В методе ТРК посредством эффекта поля в полупроводниковый слой вводится заряд (рис. 1.5, переключатель в положении $\langle a \rangle$), локализуемый при достаточно низкой температуре на ловушках. Затем конденсатор закорачивается и регистрируется ток во внешней цепи. При последующем нагревании полупроводника с постоянной скоростью концентрация захваченных носителей заряда будет изменяться вследствие термического освобождения ловушек и ухода носителей заряда на металлическую обкладку, имитирующую рекомбинационный канал, и во внешней цепи регистрируется ток. Повторный захват, в основном, отсутствует из-за быстрого ухода освободившихся носителей заряда во внешнюю цепь и имеет место лишь для уровней прилипания с весьма большим сечением захвата.

Рассмотрим полупроводник n-типа, заряженный отрицательно. При охлаждении системы до достаточно низкой температуры T_0 , избыточные электроны, введенные в полупроводник посредством эффекта поля, будут захвачены ловушками, присутствующими в полупроводнике. При медленном охлаждении заполнение уровней можно считать термически равновесными (квазиравновесие).

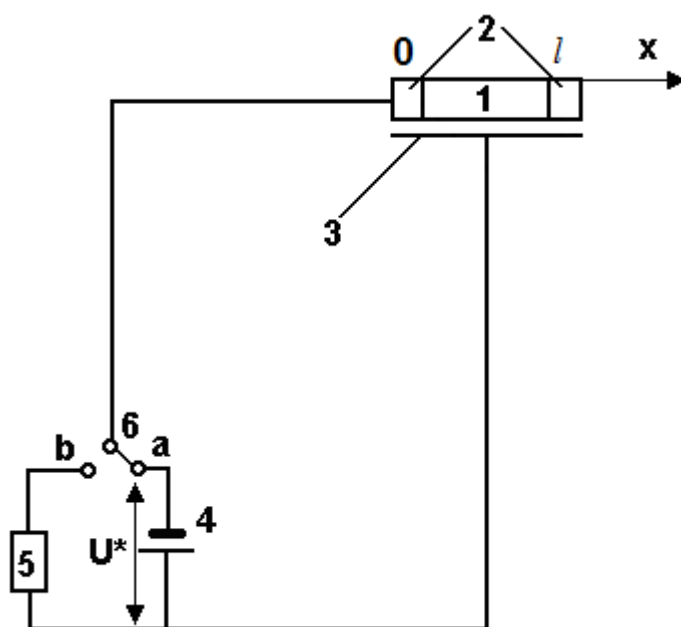


Рис. 1.5. Схема метода ТРК: 1- полупроводник; 2 - омические контакты; 3- металлическая обкладка; 4 - батарея; 5 - эффективное входное сопротивление

*электрометра с динамическим конденсатором; б -
переключатель.*

В этом состоянии замкнем пластины конденсатора (рис. 1.5., переключатель в положении). Тогда после частичной разрядки конденсатора, соответствующей уходу свободных электронов на металлическую обкладку, в полупроводнике останутся лишь электроны, локализованные на центрах захвата. Это состояние с напряжением на конденсаторе $U_0 < U^*$ при $T = T_0$ будем рассматривать как исходное. Затем полупроводник нагревается по линейному закону:

$$T = T_0 + \beta t, \quad (1.8)$$

где t – время; T_0 - исходная температура полупроводника (до начала нагрева);

β – скорость нагрева.

При нагреве полупроводника концентрация свободных электронов будет изменяться вследствие термического освобождения ловушек и ухода носителей на металлическую обкладку, имитирующую рекомбинационный канал, во внешней цепи появится разрядный ток. Пусть обкладкой конденсатора является тонкий плоскопараллельный слой полупроводника длиной l . Предположим, что в полупроводнике однородно распределены моноэнергетические электронные ловушки с концентрацией N_t и глубиной залегания E_t . Допустим, что избыточный заряд, введенный в слой проводника с помощью эффекта поля, заполнит ловушки однородно по всему объему полупроводника. В исходном состоянии ловушки заполнены электронами до концентрации

$$n_{t0} = CV_0/ql, \quad (1.9)$$

где C - емкость конденсатора;

q - абсолютная величина заряда электрона;

d - поперечное сечение полупроводника;

V_0 – напряжение зарядки полупроводника.

Тогда процесс разряда конденсатора при нагревании описывается в

одномерном приближении следующей системой уравнений:

1. Выражение для плотности тока j в полупроводнике, учитывающее наличие дрейфовой и диффузионной составляющей:

$$j = qn\mu E + D_n q \frac{dn}{dx} \quad (1.10)$$

2. Выражение для потенциала полупроводниковой обкладки:

$$\Delta U = U(l) - U(0) = -\frac{qld}{C} n_t \quad (1.11)$$

3. Уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial j}{\partial x} = -q \frac{\partial}{\partial t} (n + n_t) \quad (1.12)$$

где: n - концентрация свободных электронов,

D_n - коэффициент диффузии свободных электронов,

n_t - концентрация электронов на ловушках.

4. Уравнение кинетики термического освобождения электронов из ловушек:

$$\frac{dn}{dt} = -n_t \nu \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) + S_t V_n (N_t - n_t) \quad (1.13)$$

где: $\nu = S_t \Delta U N_c$ - частотный фактор;

S_t - сечение захвата ловушек;

V_n - тепловая скорость электрона;

N_c - эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

В правой части выражения (1.13) первый член соответствует тепловому забросу электронов из ловушек в зону проводимости, второй описывает повторный захват ловушками свободных электронов. Граничные условия задачи: $U(0,t) = 0$; $j(l,t) = 0$.

Считаем, что в области $0 < x < l$ потенциал U постоянен и $n \ll n_{t0}$.

Проинтегрируем (1.12) по координате x , получим:

$$j(x) = q \beta (x - L) \frac{dn_t}{dt} \quad (1.14)$$

Ток во внешней цепи равен полному току через полупроводник при $x=0$

$$I = -q l \omega \beta \frac{dn_t}{dt} \quad , \quad (1.15)$$

где: $\beta = V_n S_t$.

Используя (1.13), и пренебрегая повторным захватом свободных электронов на ловушках, получим для тока во внешней цепи:

$$I = q l d v n_t \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right), \quad (1.16)$$

где $n_t = n_{t0} \exp\left[-\frac{v}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) dT\right]$,

следовательно

$$I = q l d v n_{t0} \exp\left[-\frac{E_t}{kT} - \frac{v}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) dT\right] \quad (1.17)$$

Выражение для термостимулированного тока ТРК (1.17) не зависит от подвижности носителей заряда и от времени жизни в процессе рекомбинации.

Однако ТРК зависит от таких очень важных для определения дефектности КНС слоев параметров, как сечение захвата ловушек через S_t частотный фактор $\nu = S_t \Delta U N_c$, энергетический уровень ловушек E_t и концентрация заполненных ловушек N_t через выражение

$$N_t = n_{t0} + \frac{U_0}{U^* - U_0} N_c \exp\left(-\frac{E_t}{kT_0}\right).$$

КНС является удобным объектом для такого метода исследования, из-за наличия идеальной изолирующей подложки из сапфира. В качестве обкладок конденсатора используются исследуемые образцы гетероэпитаксиальных слоев кремния с одной стороны и металлический контакт с другой. Как было отмечено в п. 1.1, основными причинами наличия глубоких уровней в структурах КНС является большое различие между параметрами решеток (Δa) и коэффициентами термического расширения ($\Delta \alpha$) подложки и пленки. Различия в параметрах решеток подложки и пленки при температуре осаждения приводят к интенсивному образованию в наращиваемом слое дислокаций несоответствия, лежащих вблизи поверхности раздела пленка/подложка и достигающих величин $> 10^8 \text{ см}^{-2}$. Большие значения Δa обуславливают существование микро- и макронарушений,

возникающих в гетероструктуре при охлаждении после окончания роста пленки, т.к. температура структуры оказывается недостаточной для снятия возникающих напряжений путем пластической деформации. Наличие этих дефектов приводит к появлению в запрещенной зоне полупроводника глубоких центров, во многом определяющих качество исходного материала и параметры изготовленных на его основе приборов.

Измерение спектров ТРК проводилось в интервале температур от 80 К до 500 К, скорость нагрева менялась от 0,12 град/с до 0,4 град/с. Заполнение центров осуществлялось за счет приложения напряжения положительной и отрицательной полярности. Напряжение зарядки варьировалось от 40В до 450В. В ряде случаев для выделения элементарных максимумов тока ТРК применялся метод термической расчистки. Вследствие малого времени жизни носителей заряда в гетероэпитаксиальных слоях кремния на сапфире ($\tau < 10^{-8}$ с), расчет параметров глубоких центров проводился в предположении отсутствия захвата носителей на ловушки.

1.3. Результаты исследования глубоких уровней в структурах КНС, подвергнутых различным видам внешних воздействий

Параметры глубоких центров захвата в монокристаллах кремния изучались достаточно подробно. В частности, обзор свойств глубоких примесных центров в монокристаллах кремния представлены в монографии Милнса [23].

Технология получения гетероэпитаксиальных структур КНС предусматривает разложение гидрида кремния (SiH_4), что определяет название гидридной технологии. Для уменьшения дефектности структур КНС и улучшения их структурного совершенства, иногда используют добавки тетрахлорида кремния (SiCl_4), в таких случаях принято говорить об использовании гидридно-хлоридной технологии.

Ниже приведены результаты исследований образцов структур КНС с толщиной слоя кремния 0,6 мкм, полученных по гидридной и гидридно-хлоридной технологиям.

Весьма интересны спектры тока ТРК для образца, полученного гидридно-хлоридным методом. Как видно, при низких значениях приложенного напряжения зарядки конденсатора $U_3 = -350 В$ и $160 В$ в спектре наблюдается один и высокотемпературный максимум тока ТРК (рис. 1.6, кривые 1 и 2), увеличение напряжения зарядки до значения $U_3 = +350 В$ приводит к появлению максимума тока ТРК в области низких температур (рис. 1.6, кривая 4). Характерной особенностью высокотемпературного максимума является то, что его интенсивность практически не изменяется при увеличении напряжения зарядки.

Аналогичная картина наблюдается для данного образца и при отрицательном напряжении зарядки. При увеличении напряжения зарядки интенсивность высокотемпературного максимума слабо меняется, а интенсивность низкотемпературного значительно увеличивается. Отсутствие насыщения максимума ТРК при увеличении напряжения зарядки свидетельствует о том, что приведенные значения концентрации наблюдаемых уровней занижены.

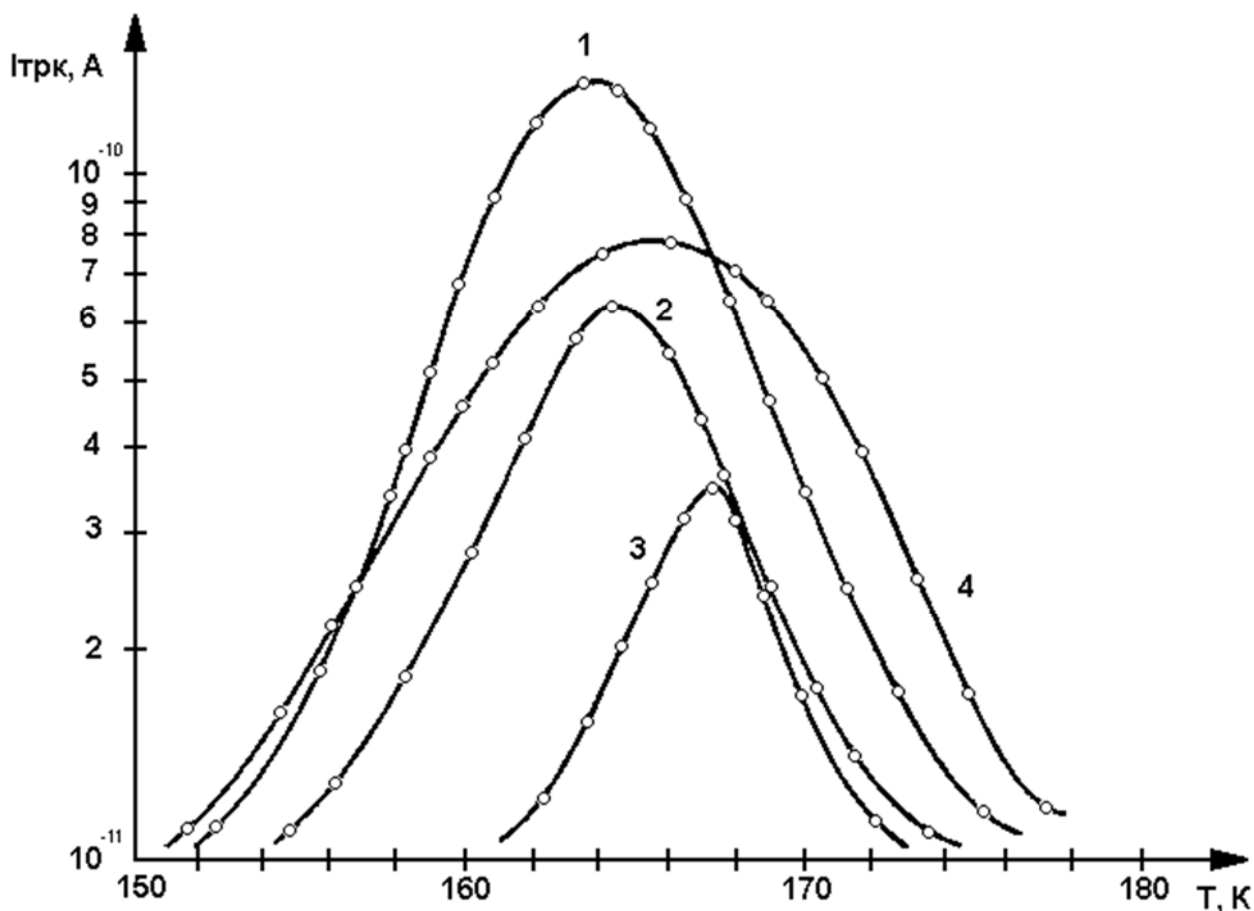


Рис. 1.6. Температурная зависимость тока ТРК для образца КНС ИХ ХГ 15(5).

Кривая 1 $U_3=-350В$

Кривая 2 $U_3=-160В$

Кривая 3 $U_3=-80В$

Кривая 4 $U_3=+350В$

При приложении отрицательного напряжения зарядки наблюдается широкий максимум тока ТРК, который, видимо, является суперпозицией нескольких близкорасположенных максимумов. Выделить элементарный максимум не позволяет даже увеличение напряжения зарядки до значений $U_3= -350 В$.

Параметры рассчитанных глубоких центров представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Параметры глубоких центров захвата в образцах КНС, полученных гидридно-хлоридным и гидридным методами

№ пластин	Метод получения	$U_3, В$	$T_{max1}, К$	$E_{t1}, эВ$	$N_{t1}, см^{-3}$	$S_{t1}, см^2$
3		+160	155.	0.44÷0.46	10^{14}	10^{-14}
		+440	269.	0.13	$8 \cdot 10^{15}$	10^{-25}
		-100	-305			
4	Гидридный	+120	165.	0.46	$1:210^{14}$	10^{-14}
		+350	159.	0.46	10^{15}	10^{-14}
		-100	310			
5		+100	298.	0.13	$4 \cdot 10^{15}$	$1 \div 2 \cdot 10^{-24}$
		-100	298.	0.18	$4 \cdot 10^{15}$	$1 \div 3 \cdot 10^{-24}$
6	Гидридно - хлоридный	+100	361.	0.12	$2 \cdot 10^{15}$	$6.4 \cdot 10^{-25}$
		-100	360.	0.17	$1 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{-25}$
1		-80	167.	0.42÷0.44		$1-2 \cdot 10^{-14}$
		-160	164.	0.44÷0.42		10^{-14}
		-350	163.	0.44÷0.42		10^{-14}
		+350	165.	0.12÷0.18		10^{-14}
				0.4÷0.5		
		+120	186.	0.4-0.5	$6.4 \cdot 10^{-14}$	-
		-350	250.	-	-	-

Таким образом, при исследовании гетероэпитаксиальных слоев КНС n-типа проводимости легированных фосфором со стабилизированной поверхностью, полученных как разложением моносилана, так и гидридно-хлоридным методом, при положительном напряжении зарядки обнаружены глубокие центры со следующими параметрами:

$$E_{t1}=0,44 : 0,46 \text{ эВ}, S_{t1}=10^{-14} \text{ см}^2, N_{t1}= 10^{14}:10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$E_{t2}=0,12: 0,13 \text{ эВ}, S_{t2}= 10^{-24} \text{ см}^2, N_{t2} = 10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Большой разброс в значениях энергии активизации центра (0,12 -0,18) эВ связан с трудностью точного определения температуры максимума. Предполагается, что широкий максимум тока ТРК в области высоких температур является суперпозицией нескольких близко расположенных максимумов. Низкотемпературный максимум, вероятно, объясняется наличием кислородосодержащих комплексов в кремниевом слое. Центр с энергией активации 0,12-0,14 эВ наблюдается при исследовании образцов, отожженных в атмосферах аргона и кислорода.

При отрицательном напряжении зарядки проявляется глубокий центр с энергией активации $E_t = 0,42 - 0,44$ эВ ($T_{max} \sim 160-170$ К). При исследовании спектров тока ТРК гетероэпитаксиальных слоев КНС, с повышенной подвижностью ($\mu_n > 500$ см² В⁻¹с⁻¹) в работе [24] наблюдались только низкотемпературные максимумы тока ТРК с близкими параметрами соответствующих глубоких центров. Можно предположить единую природу соответствующих центров.

В работах [25,26] исследованы параметры глубоких центров захвата слоев КНС, неотожженных и подвергнутых высокотемпературному отжигу в атмосфере аргона и кислорода.

Статистический анализ спектров ТРК показал, что в большинстве случаев в слоях КНС имеется следующая система уровней : на образцах п-типа при положительном напряжении зарядки конденсатора был выявлен центр с энергией активации 0,36 эВ, сечением захвата $S_t = (10^{-17}-10^{-18}$ см²) и концентрацией - $10^{14} - 10^{15}$ см⁻³. При отрицательном напряжении зарядки конденсатора обнаружен центр с энергией активации - 0,4 эВ и близкими параметрами. Для одного из образцов при отрицательной полярности напряжения зарядки обнаружен центр с энергией активации : $E_v + 0,39$; $E_v + 0,37$; и $E_v + 0,27$ эВ.

На образцах п-КНС, отожженных в атмосфере аргона, при положительном напряжении зарядки наблюдается два уровня;

$$E_{t1} = 0,11 - 0,13 \text{ эВ}, S_{t1} = 10^{-26} - 10^{-25} \text{ см}^2, N_{t1} = 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$E_{t2} = 0,22 - 0,23 \text{ эВ}, S_{t2} = 10^{-18} - 10^{-17} \text{ см}^2, N_{t2} = 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Уровень с энергией активации 0,36 эВ, характерный для неотожженных образцов,

не наблюдался.

Аналогичные центры были получены и при отрицательной полярности напряжения зарядки. Термообработка структур КНС в атмосфере кислорода привела к тому, что в спектрах ТРК при отрицательной полярности напряжения зарядки проявились те же центры, что и при отжиге в атмосфере аргона; однако при положительной полярности приложенного напряжения зарядки не проявляется уровень с энергией активации 0, 11 эВ, и возникает дополнительный уровень с энергией активации 0,5 эВ, концентрацией - $N_t=10^{15} \text{ см}^{-3}$ и сечением захвата $S_t = 10^{-22}-10^{-23} \text{ см}^{-2}$.

Как отмечалось выше, улучшение функциональных возможностей БИС связано с применением структур КНС с меньшей толщиной эпитаксиального слоя кремния и повышением однородности его свойств. Высокая однородность свойств позволяет использовать структуры КНС не только в разработках цифровых БИС, но и для аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, эксплуатирующихся в условиях внешних специальных воздействий. Реализация предельных потенциальных возможностей КНС технологии ограничивается рядом факторов, в том числе недостаточной контролируемостью состояния границы раздела эпитаксиальный кремний- $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$, наличием на поверхности микродефектов, обусловленных фоновыми примесями или загрязнениями, которые не удаляются даже при многочисленных технологических отмытках структур. Резкое увеличение низкочастотного шума при низких температурах в МДП КНС транзисторах при достижении обедненной областью пограничного слоя свидетельствуют о высокой концентрации генерационно-рекомбинационных центров у границы раздела сапфир-кремний.

Для оценки влияния внешних воздействий на границу раздела проводились исследования методом ТРК образцов структур с толщиной слоя кремния 0.3 и 0.1 мкм, проведен анализ влияния температурно-временных операций с имитацией температурно-временной экспозиции, которой подвергаются структуры КНС в технологическом маршруте изготовления КМОП БИС КНС. Исследовались образцы, прошедшие: высокотемпературную обработку при температурах 890 и 950°C (время

воздействия высокотемпературной обработки было эквивалентно суммарному времени термообработок в реальном технологическом маршруте); лазерный отжиг аргоновым лазером с длиной волны $\lambda=0.53$ мкм; радиационную обработку γ -облучением: мощность дозы при длительности импульса ~ 20 нс составляла 5×10^3 рад/с, 5×10^{12} рад/с, 5×10^{10} рад/с, а суммарная доза γ -облучения составляла от 10^5 рад до $1.2 \cdot 10^6$ рад; нейтронному облучению (поглощенная доза составила $\Phi n=1.3 \cdot 10^{12}$; $1.25 \cdot 10^{14}$ и $1.4 \cdot 10^{15}$ нейтрон/см²).

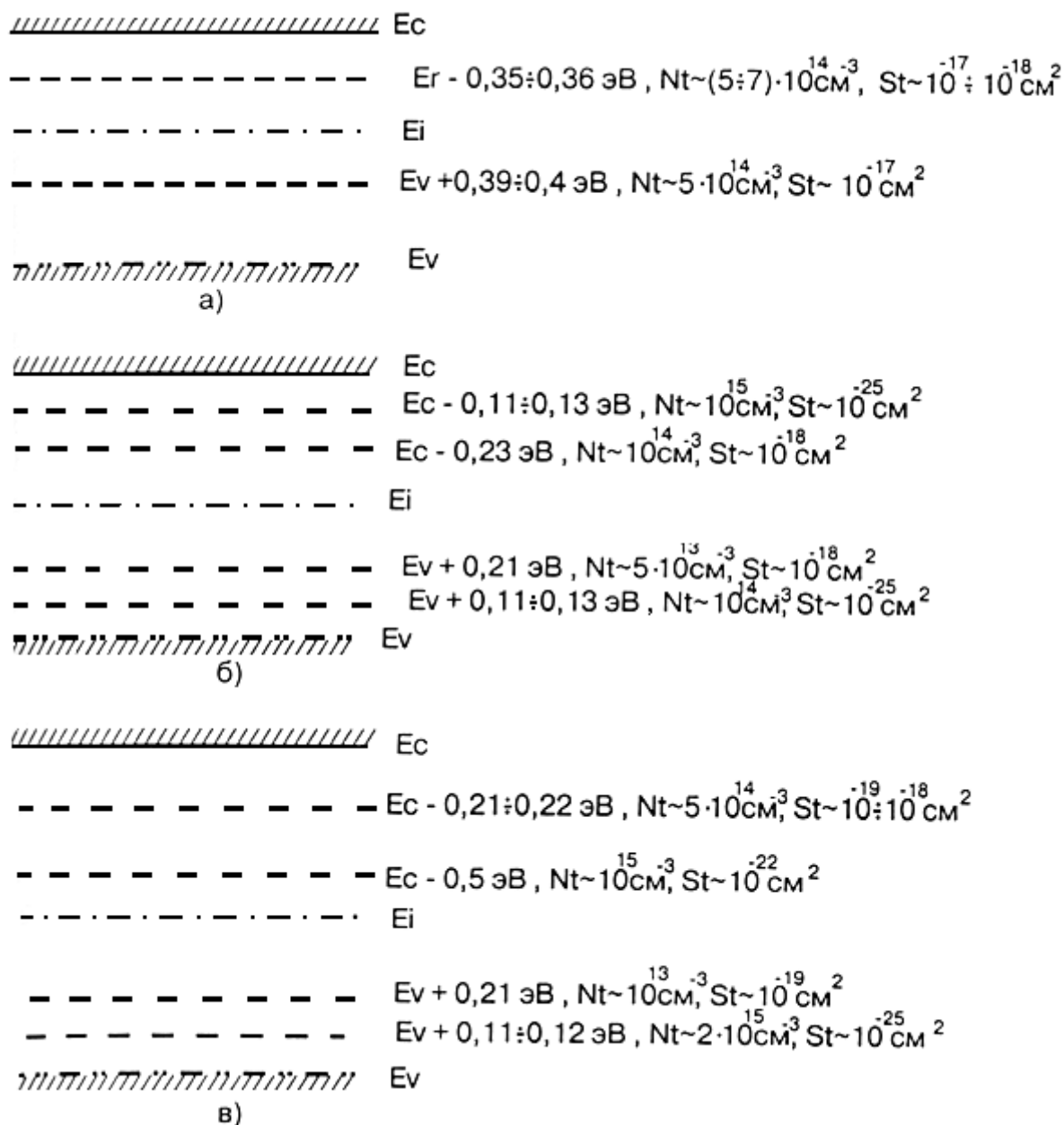


Рис. 1.7. Зонная диаграмма гетероэпитаксиальных структур КНС
 а) неотожженные б) отожженные в атмосфере аргона
 в) отожженные в атмосфере кислорода

Исследования исходных гетероструктур КНС с толщиной кремниевого слоя 0.1 мкм. (рис. 1.8, кривая 1) и 0.3 мкм. (рис. 1.9, кривая 1) показали, что в спектрах тока ТРК как при положительной, так и при отрицательной полярности напряжения зарядки наблюдается два максимума - узкий, явно выраженный максимум, амплитуда которого значительно увеличивается при увеличении напряжения зарядки, и широкий максимум в области высоких температур. Для образца КНС с толщиной слоя кремния 0,1 мкм при положительном напряжении зарядки нами были получены следующие значения параметров глубокого центра, определяющего появление низкотемпературного максимума тока ТРК : $T_{\max}=220-240$ К; $E_t=E_c=(0.52 - 0,55)$ эВ; $S_t \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ см²; $N_t \sim 2-4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ Аналогичная картина наблюдается и при отрицательном напряжении зарядки; параметры соответствующего глубокого центра: $E_v = + 0,55$ эВ; $N_t \sim 1-2 \cdot 10^{14}$ см⁻³; $S_t \sim 1-2 \cdot 10^{-16}$ см².

В структурах с большей толщиной слоя кремния (0,3 мкм) низкотемпературный максимум наблюдается при более низкой температуре (190-200 К), проявляется также широкий максимум тока ТРК в высокотемпературной области спектра.

Низкотемпературный лазерный отжиг структур с толщиной слоя кремния 0,1 мкм приводит к появлению дополнительных максимумов тока при температурах $T_{\max 1} \sim 160$ К, $T_{\max 2} \sim 185-200$ К, $T_{\max 3} \sim 270-290$ К . В области высоких температур проявляется более четкий максимум и становится возможным определить его параметры .

Высокотемпературный отжиг при температуре 890 °С (рис. 1.8, кривая 3) приводит к появлению одиночного явно выраженного высокотемпературного максимума, намечается также максимум в области температур 270-290 К, низкотемпературный максимум остается без изменения.

При повышении температуры отжига ($T_{отж} \sim 950^\circ\text{C}$) интенсивность высокотемпературного максимума существенно увеличивается, дополнительно появляются низкотемпературный максимум ($T = 180-190$ К) и максимум в области

температур 270-290 К, который лишь намечается при меньшей температуре отжига.

При проведении низкотемпературного лазерного отжига образцов с толщиной слоя кремния 0,3 мкм (рис. 1.9, кривая 2) интенсивность низкотемпературного максимума уменьшается и появляются максимумы при температурах 170-180 К и 280-300 К. Высокотемпературный максимум становится явно выраженным (таблица 1.9). Высокотемпературный отжиг при температуре 890° С (рис. 1.9, кривая 3) приводит к появлению максимумов тока ТРК при температурах 280-300 К и 170-180 К; максимум при температуре 190-200 К не наблюдается. Исследование параметров дырочных ловушек проводилось аналогичным методом при подаче на металлическую обкладку конденсатора отрицательного потенциала ($U_{\text{зар}} = -350 \text{ В}$). Результаты исследований представлены в таблицах 1.7 и 1.8. В этих же таблицах приведены результаты исследования параметров глубоких центров захвата в структурах КНС с толщиной слоя кремния 0,1 мкм (таблица 1.7) и 0,3 мкм (таблица 1.8), подвергнутых γ -облучению и облучению нейтронами. Из таблиц видно, что для образцов КНС с толщиной слоя кремния 0,1 мкм увеличение мощности дозы γ -облучения практически не изменяет концентрацию центра, проявляющегося при температуре 230-240 К, и она совпадает с концентрацией этого центра для исходного образца ($N_t \sim 1-2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). При воздействии γ -импульса мощностью дозы более 10^9 рад/с появляется центр, наблюдаемый при комнатной температуре ($T = 280-300 \text{ К}$). При мощности дозы $5 \cdot 10^9 \text{ рад/с}$, также как и для необработанного образца высокотемпературный максимум ($T_{\text{max}} = 370-380 \text{ К}$) является широким, его интенсивность и температура меняются от измерения к измерению.

$I_{\text{трк}}, \text{A}$ Толщина слоя Si 0,3 мкм ($U=-350 \text{ В}$)

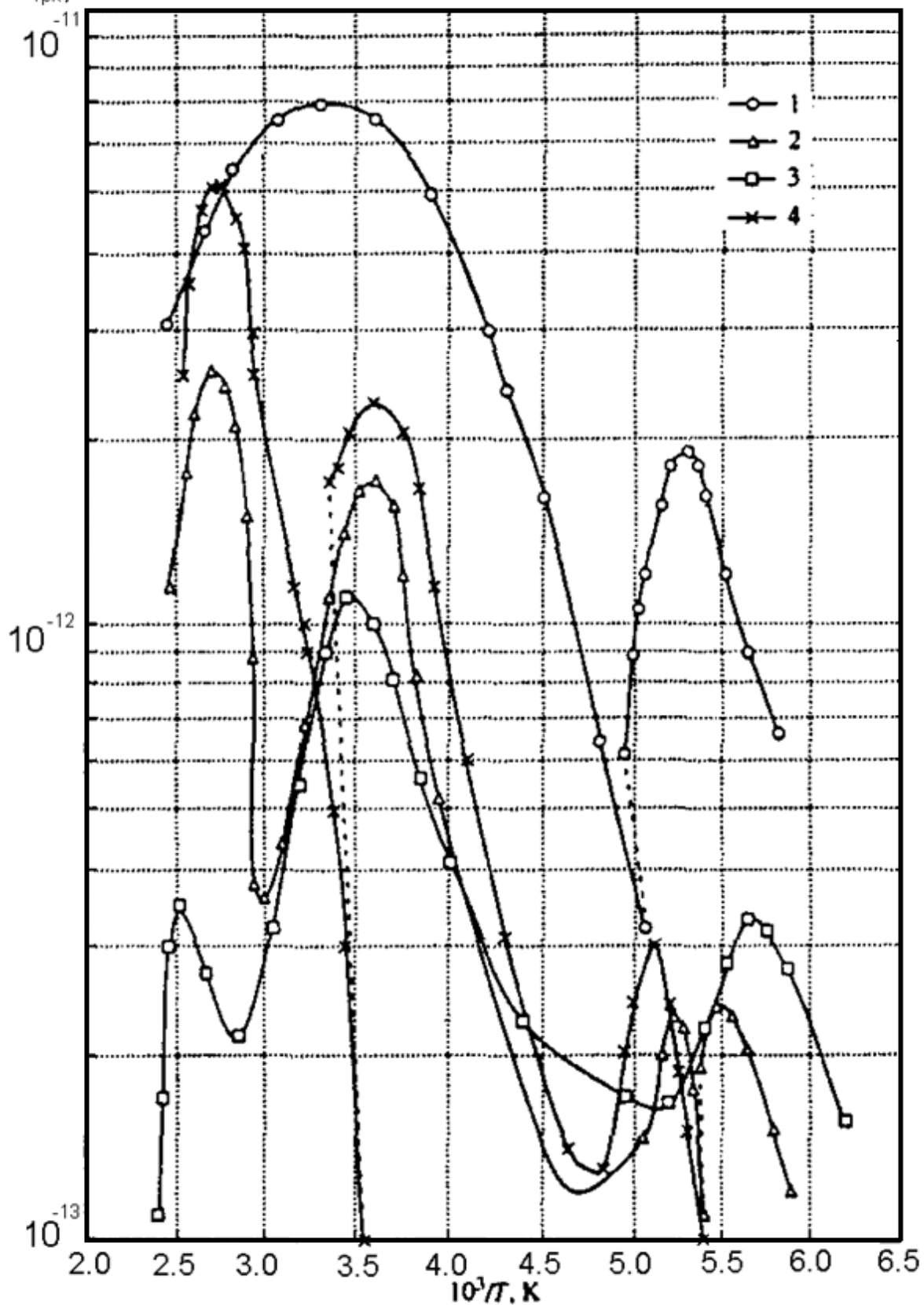


Рис 1.8. Спектры тока ТРК для образцов КНС с толщиной кремниевого слоя 0,3 мкм (1 - без обработки; 2 - лазерный отжиг, 3 - 890 °С, 4 - 950 °С)

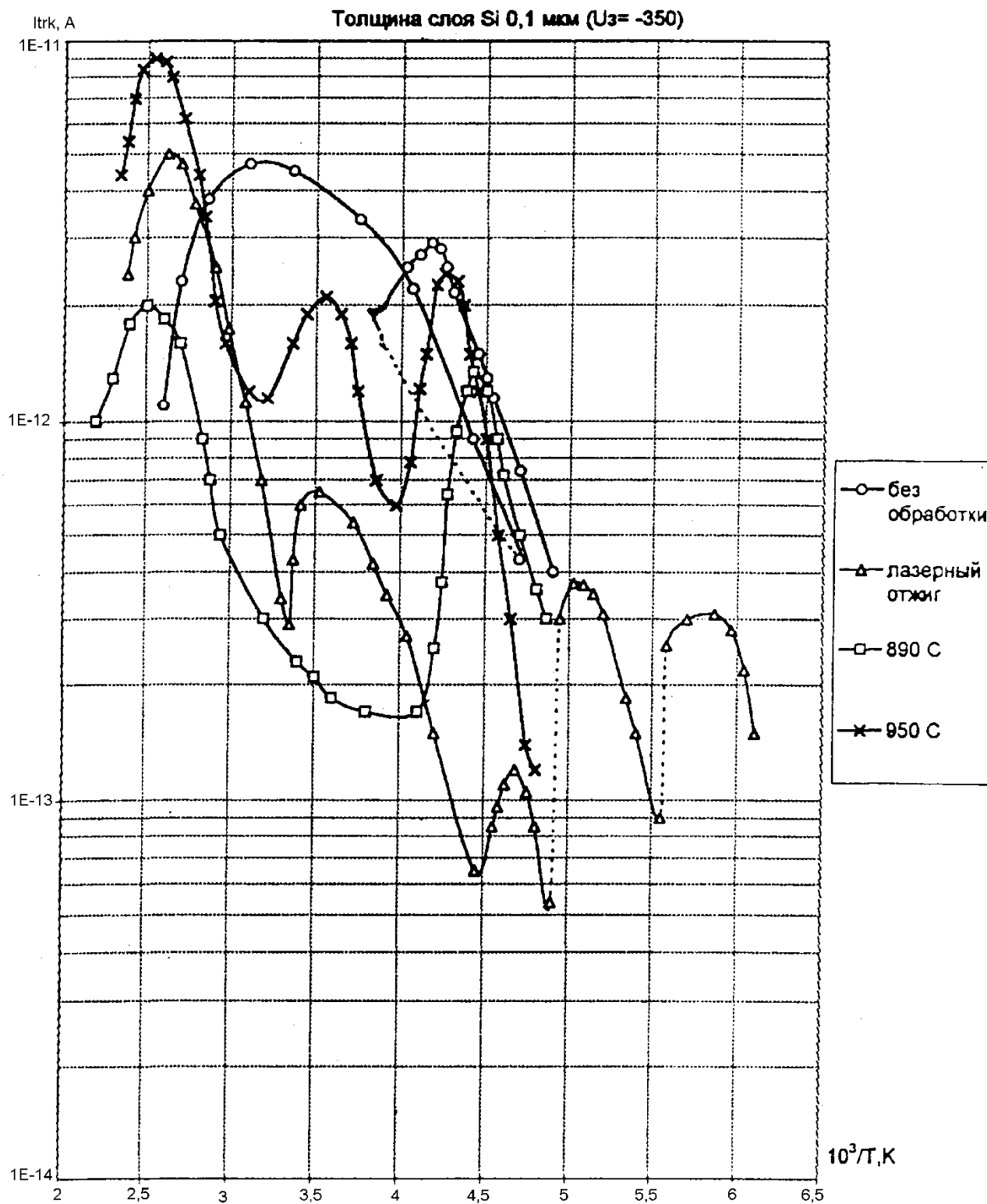


Рис. 1.9. Спектры тока ТРК для образцов КНС с толщиной кремниевого слоя 0,1 мкм (1- без обработки; 2-лазерный отжиг, 3 - 890 °С, 4 - 950 °С)

Таблица 1.7. Параметры глубоких центров захвата в гетероэпитаксиальных слоях КНС (толщина слоя Si - 0.1 мкм)

	Et, эВ	T max, К	St, см ²	Nt, см ⁻³
Необработанные образцы	Ec-0,53 ÷ 0,55	220 ÷ 240	10 ⁻¹⁵	(2 ÷ 4) · 10 ¹⁴
	-	350 ÷ 380	-	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁵
	Ev+0,55	230 ÷ 240	10 ⁻¹⁶	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	-	340 ÷ 380	-	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁵
Лазерный отжиг	Ec-0,24 ÷ 0,26	160 ÷ 170	10 ⁻¹⁹	5 · 10 ¹²
	Ec-0,46	190 ÷ 200	10 ⁻¹⁵	(1 ÷ 3) · 10 ¹³
	Ec-0,55	230 ÷ 240	10 ⁻¹⁵	(1 ÷ 2) · 10 ¹³
	Ec-0,3	270 ÷ 290	10 ⁻²²	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	Ec-0,46 ÷ 0,5	360 ÷ 380	10 ⁻²²	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁵
	Ev+0,24	170 ÷ 175	10 ⁻²⁰	2 · 10 ¹³
	Ev+0,49 ÷ 0,5	183 ÷ 185	10 ⁻¹³	2 · 10 ¹³
	Ev+0,45 ÷ 0,46	196 ÷ 198	10 ⁻¹⁶	4 · 10 ¹²
	Ev+0,44	210 ÷ 214	10 ⁻¹⁷	2 · 10 ¹⁴
	Ev+0,55	235 ÷ 240	10 ⁻¹⁶	2 · 10 ¹⁴
	Ev+0,28	280 ÷ 285	10 ⁻²³	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁵
	Ev+0,46 ÷ 0,49	375 ÷ 380	10 ⁻²²	
Отжиг 890 ⁰	Ec-0,55	220 ÷ 240	10 ⁻¹⁵	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	Ec-0,31	270 ÷ 290	10 ⁻²²	10 ¹³
	Ec-0,4 ÷ 0,5	380 ÷ 390	10 ⁻²¹	(7 ÷ 9) · 10 ¹⁴
	Ev+0,5	220 ÷ 230	10 ⁻¹⁶	10 ¹⁴
Ev+0,46 ÷ 0,48	380 ÷ 400	10 ⁻²²	2 · 10 ¹⁵	
Отжиг 950 ⁰	Ec-0,55	220 ÷ 240	10 ⁻¹⁵	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	Ec-0,31	280 ÷ 300	10 ⁻²²	3 · 10 ¹⁴
	Ec-0,49 ÷ 0,52	370 ÷ 390	10 ⁻²¹	2 · 10 ¹⁵
	Ev+0,55	235 ÷ 240	10 ⁻¹⁶	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	Ev+0,28 ÷ 0,29	280 ÷ 285	10 ⁻²³	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	Ev+0,46 ÷ 0,49	390 ÷ 400	10 ⁻²²	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁵
γ-облучение	Ec-0,24 ÷ 0,26	160 ÷ 170	10 ⁻¹⁹	10 ¹³
	Ec-0,53 ÷ 0,55	230 ÷ 240	10 ⁻¹⁵	(1 ÷ 2) · 10 ¹⁴
	Ec-0,3	280 ÷ 300	10 ⁻²²	(3 ÷ 4) · 10 ¹⁴
	Ec-0,5	370 ÷ 390	10 ⁻²¹	(1 ÷ 3) · 10 ¹⁵
	Ev+0,24	160 ÷ 170	10 ⁻²⁰	(1 ÷ 3) · 10 ¹³
	Ev+0,55	230 ÷ 240	10 ⁻¹⁶	(1 ÷ 5) · 10 ¹⁴
	Ev+0,28 ÷ 0,29	290 ÷ 300	-	(4 ÷ 5) · 10 ¹⁴
	Ev+0,48 ÷ 0,5	370 ÷ 380	10 ⁻²³	7 · 10 ¹⁴
n-облучение	Ec-0,52 ÷ 0,55	230 ÷ 260	10 ⁻¹⁵	2 · 10 ¹⁴
	Ec-0,31	300	10 ⁻²²	2 · 10 ¹⁴
	Ec-0,26 ÷ 0,28	350 ÷ 380	10 ⁻²⁵	2 · 10 ¹⁵
	Ec-0,48 ÷ 0,5	420	10 ⁻²²	(1 ÷ 3) · 10 ¹⁵
	Ev+0,45	190 ÷ 195	10 ⁻¹⁶	2 · 10 ¹³
	Ev+0,29	300	10 ⁻²³	1 · 10 ¹⁴
	Ev+0,35	360 ÷ 380	10 ⁻²⁴	(5 ÷ 6) · 10 ¹⁴

Таблица 1.8. Параметры глубоких центров захвата в гетероэпитаксиальных слоях КНС (толщина слоя Si - 0.3 мкм)

	Et, эВ	Tmax, К	St, см ²	Nt, см ⁻³
Необработанные образцы	Ec-0,48	190÷200	10 ⁻¹⁵	(2÷3)·10 ¹³
	-	360÷390	-	(1÷2)·10 ¹⁴
	Ev +0,46	190÷200	10 ⁻¹⁵	10 ¹³
	-	370÷380	-	3·10 ¹³
Лазерный отжиг	Ec-0,23÷0,26	170÷180	10 ⁻¹⁹	(6÷8)·10 ¹²
	Ec-0,46÷0,48	190÷200	10 ⁻¹⁴	(2÷3)·10 ¹²
	Ec-0,3	280÷300	10 ⁻²²	(3÷6)·10 ¹³
	Ec-0,5	370÷390	10 ⁻²¹	(5÷8)·10 ¹³
	Ev+0,35÷0,36	180	10 ⁻²⁴	(5÷6)·10 ¹²
	Ev+0,45÷0,46	190	10 ⁻¹⁵	2·10 ¹²
	Ev+0,28÷0,30	290	10 ⁻²³	(5÷6)·10 ¹³
	Ev+0,5÷0,52	390÷400	10 ⁻²¹	8·10 ¹³
Отжиг 890 ⁰	Ec-0,46÷0,48	180÷190	10 ⁻¹⁴	(5÷6)·10 ¹²
	Ec-0,31÷0,32	290÷300	10 ⁻²²	(2÷3)·10 ¹³
	Ec-0,5÷0,52	380÷400	10 ⁻²¹	(1÷3)·10 ¹³
	Ev+0,36	180÷185	10 ⁻¹⁷	(5÷6)·10 ¹²
	Ev+0,28÷0,3	290	10 ⁻²³	(5÷6)·10 ¹³
	Ev+0,53	390÷400	10 ⁻²¹	(1÷2)·10 ¹³
Отжиг 950 ⁰	Ec-0,48	190÷200	10 ⁻¹⁴	(3÷4)·10 ¹³
	Ec-0,3	270÷290	10 ⁻²²	(4÷5)·10 ¹³
	Ec-0,5÷0,55	360÷390	10 ⁻²⁰	(1÷3)·10 ¹³
	Ev+0,45÷0,48	190÷200	10 ⁻¹⁵	(3÷4)·10 ¹²
	Ev+0,28÷0,3	280÷285	10 ⁻²³	(3÷6)·10 ¹³
	Ev+0,53	360÷385	10 ⁻²¹	(2÷4)·10 ¹⁴
γ-излучение	Ec-0,46÷0,48	190÷200	10 ⁻¹⁵	(2÷5)·10 ¹³
	Ec-0,3	280÷300	10 ⁻²²	(4÷5)·10 ¹³
	Ec-0,5÷0,53	350÷370	10 ⁻²⁰	(3÷5)·10 ¹⁴
	Ev+0,23÷0,26	160÷170	10 ⁻²⁰	(2÷3)·10 ¹³
	Ev+0,46÷0,48	190÷200	10 ⁻¹⁵	(2÷3)·10 ¹³
	Ev+0,3	280÷290	10 ⁻²³	(2÷4)·10 ¹³
	Ev+0,55	350÷370	10 ⁻²¹	8·10 ¹³
	Ev+0,5	420	10 ⁻²³	(3÷4)·10 ¹⁴
n-облучение	Ec-0,48÷0,5	190÷200	10 ⁻¹⁴	(2÷5)·10 ¹³
	Ec-0,28÷0,3	290÷300	10 ⁻²²	(5÷7)·10 ¹³
	Ec-0,26÷0,28	360÷390	10 ⁻²⁵	(1÷2)·10 ¹⁵
	Ev+0,48	190÷195	10 ⁻¹⁵	(2÷3)·10 ¹³
	Ev+0,28÷0,3	280÷290	10 ⁻²³	5·10 ¹³
	Ev+0,34÷0,36	370÷390	10 ⁻²⁴	-10 ¹⁵

Можно предположить, что этот максимум является суперпозицией нескольких близкорасположенных максимумов, разделить которые не удастся даже при использовании многократной термической очистки. Однако, при увеличении мощности дозы ($5 \cdot 10^{10}$ рад/с и $5 \cdot 10^{12}$ рад/с) в высокотемпературной области спектра появляется одиночный максимум. Концентрация этого центра при мощности дозы $5 \cdot 10^{12}$ рад/с существенно меньше, чем при мощности дозы $5 \cdot 10^{10}$ рад/с. При суммарной дозе γ облучения 10^5 и $1.2 \cdot 10^6$ рад низкотемпературный центр не наблюдается. Концентрация центра, дающего максимум при температуре 230-240 К в образцах с дозой облучения $1.2 \cdot 10^6$ рад уменьшается вдвое по сравнению с образцами с дозой облучения 10^5 рад. При суммарной дозе облучения 10^5 рад в области высоких температур выявляет широкий интенсивный максимум при температуре 420 К, который при увеличении суммарной дозы пропадает. Центр с максимумом в области комнатной температуры наблюдается как при одной, так и при другой дозе облучения. При повышении дозы облучения его концентрация значительно уменьшается.

Для гетероэпитаксиальной структуры КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм (таблица 1.8) при воздействии γ -импульса с любой мощностью дозы наблюдается максимум тока ТРК при температуре 190-200 К; причем его концентрация практически не отличается от концентрации этого центра в необработанном образце ($N_t \sim 2-3 \cdot 10^{13}$ см⁻³). Кроме того при облучении появляется центр ($T_{\max} = 280-300$ К), который не наблюдается для необработанных образцов, а его концентрация практически не зависит от мощности дозы облучения и составляет $2-5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Характер зависимости $I_{ТРК}(T)$ в высокотемпературной области для образцов с мощностью дозы $5 \cdot 10^9$ и $5 \cdot 10^{10}$ рад/с и суммарной дозой 10^5 рад изменяется по сравнению с необлученным образцом; при повышении мощности дозы и суммарной дозы высокотемпературный центр не наблюдается.

- В спектрах тока ТРК структур КНС с толщиной слоя кремния 0,1 и 0,3 мкм, подвергнутых нейтронному облучению при всех значениях накопленной дозы нейтронов $\Phi_n = 1,3 \cdot 10^{13}$ н/см²; $1,25 \cdot 10^{14}$ н/см² и $1,4 \cdot 10^{15}$

$n/\text{см}^2$ наблюдается низкотемпературный максимум тока ТРК, при этом концентрация соответствующего центра практически не зависит от дозы облучения и совпадает с концентрацией аналогичного центра для необработанного образца. Кроме того, по сравнению со спектром для необработанных структур, дополнительно появляется максимум при комнатной температуре. При максимальной накопленной дозе нейтронов $\Phi_n=1.4*10^{15}$ н/см² для структур с толщиной слоя кремния 0,1 мкм в высокотемпературной области спектра на фоне широкого максимума тока ТРК дополнительно появляется максимум при температуре 420 К. При той же накопленной дозе нейтронов для образцов с толщиной слоя кремния 0,3 мкм в спектре тока ТРК наблюдается одиночный высокотемпературный максимум, причем концентрация соответствующего центра на порядок превышает концентрацию того же центра при меньшей накопленной дозе нейтронов (таблицы 1.7 и 1.8).

Для образцов кремния на сапфире с толщиной слоя Si 0,1 мкм концентрация глубоких центров более чем на порядок превышает аналогичную концентрацию в образцах КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм, причем концентрация глубоких центров захвата ($N_t > 10^{15}$ см⁻³) сопоставима с концентрацией легирующей примеси. Поэтому обнаруженные центры могут снижать подвижность носителей заряда в КНС и являться причиной аномальных токов утечки в БИС КМОП КНС.

На рисунках 1.10 и 1.11 приведена схема уровней дефектов в необработанных образцах кремния на сапфире; в структурах, подвергнутых низкотемпературному лазерному и высокотемпературным отжигам; схема уровней радиационных дефектов в структурах КНС, облученных быстрыми нейтронами и γ -квантами.

Как видно из приведенных рисунков, имеется довольно большое число центров захвата, являющихся общими для необработанного образца и для образцов, подвергавшихся облучению и термической обработке. Несмотря на то, что в запрещенной зоне полупроводника имеется целая система энергетических уровней, многие из которых могут быть рекомбинационными, параметры материала,

в частности время жизни носителей заряда, определяются лишь одним-двумя доминирующими рекомбинационными центрами. В нашем случае в гетероэпитаксиальных образцах КНС с толщиной слоя кремния 0,1 и 0,3 мкм таковыми являются глубокие центры, энергия активации которых располагается вблизи середины запрещенной зоны, имеющие максимальные значения сечения захвата: $E_c = 0.55$ ($E_v + 0,55$); $E_c - 0,48$; $E_v + 0,46$ эВ. Уровень $E_c - 0,55$ эВ ($E_v + 0,55$ эВ), согласно данным современных исследований, принадлежит дивакансии, которая может являться как сложным первичным, так и вторичным дефектом, возникающим при взаимодействии двух вакансий. Уровень $E_v + 0,46$ эВ связывается с наличием комплекса «вакансия - атом акцепторной примеси».

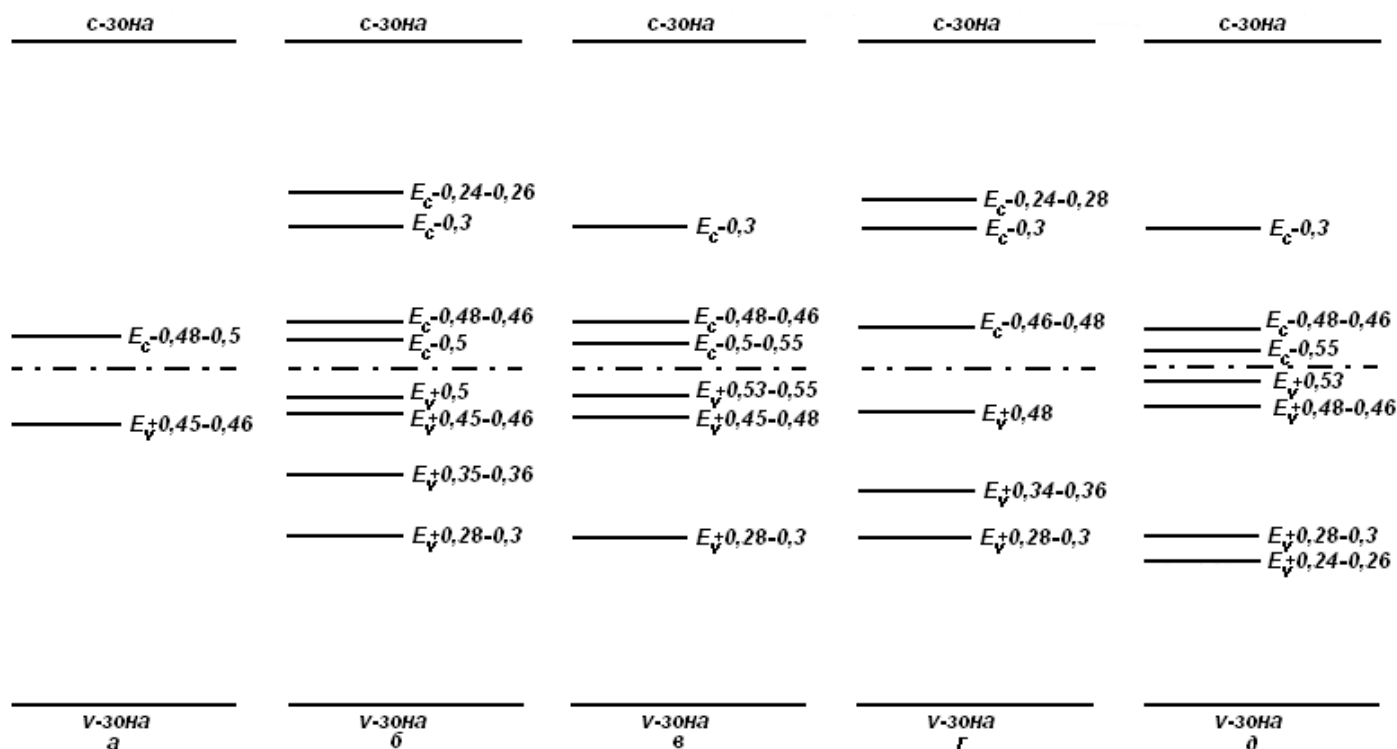


Рисунок 1.10. Энергетические спектры дефектов в слоях КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм (а – без обработки; б – низкотемпературный лазерный отжиг; в – высокотемпературный отжиг; г – облучение нейтронами; д – облучение γ -квантами).

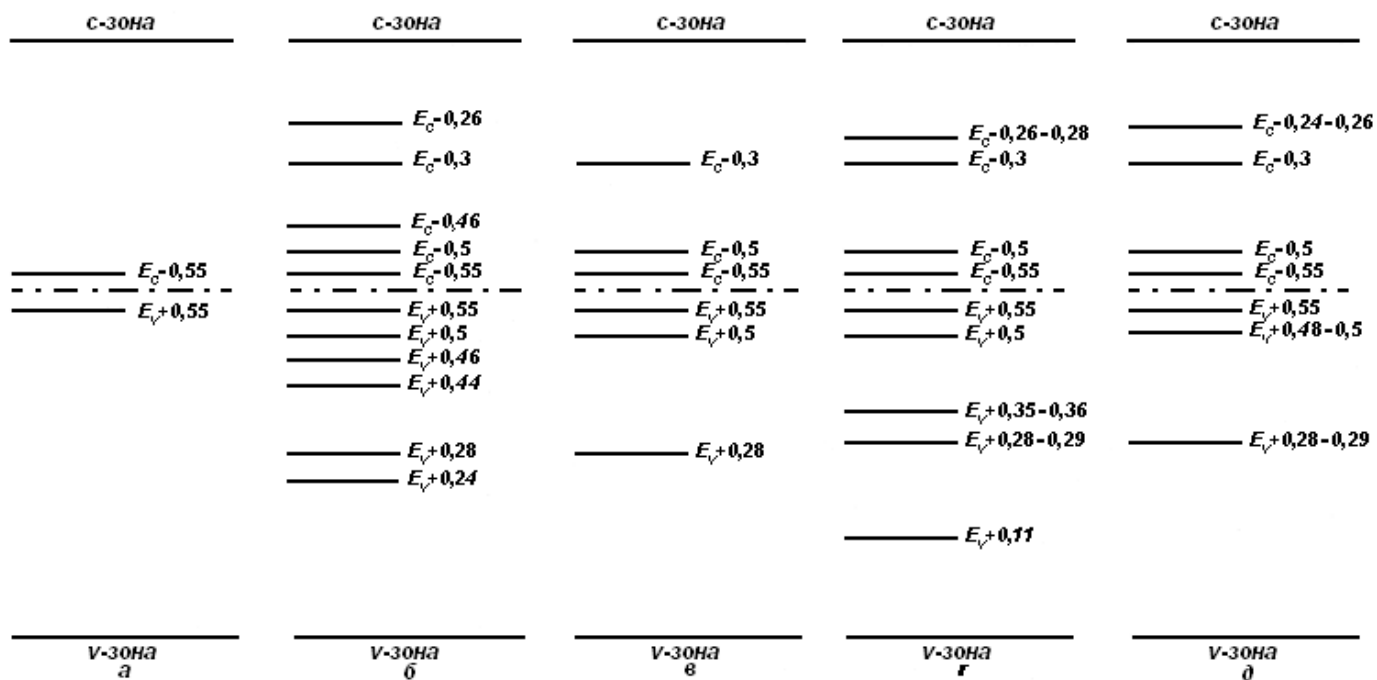


Рисунок 1.11. Энергетические спектры дефектов в слоях КНС с толщиной слоя кремния 0.1 мкм (а – без обработки; б – низкотемпературный лазерный отжиг; в – высокотемпературный отжиг; г облучение нейтронами; облучение γ -квантами).

ГЛАВА 2. Технология создания радиационно-стойких КМОП БИС со структурой кремний на сапфире

2.1. Разработка и исследование технологических процессов формирования радиационно-стойких МОП-структур

Островковая технология создания областей кремния, в которых формируются активные элементы БИС, обеспечивающая межэлементную электрическую изоляцию воздушным зазором, является основным отличием технологии КМОП БИС со структурой «кремний на сапфире» от технологии на объёмном кремнии. Поэтому при разработке отдельных процессов, из которых складывается технологический маршрут, учитываются дополнительные требования, вытекающие из развитого рельефа поверхности слоя кремния на сапфировой подложке: обеспечение однородности параметров линейных и кольцевых транзисторов, минимизация токов утечки при реализации межсоединений и межслойной изоляции, а также максимальная устойчивость параметров активных элементов к внешним воздействиям.

Создание стабильной МОП-структуры, обеспечивающей минимальный сдвиг пороговых напряжений после радиационного воздействия, является основой радиационно-стойкой технологии КМОП БИС. При разработке процесса формирования подзатворного диэлектрика, удовлетворяющего этим требованиям, применяется пирогенное окисление и окисление в сухом кислороде. При пирогенном окислении кремний взаимодействует с парами воды, получаемыми при сжигании водорода в кислороде. Так как сжигание водорода в кислороде обеспечивает получение наиболее чистого пара, то окисление кремния может проходить при низких температурах (~850 °С).

Исследования показали, что для пирогенного окисления по мере возрастания температуры процесса сдвиг порогового напряжения при

облучении увеличивается, в то время как для «сухого» окисления (в кислороде) наблюдается обратная зависимость.

Процесс пирогенного окисления отличается большой производительностью и воспроизводимостью, поэтому является базовым при создании технологического маршрута изготовления КМОП БИС КНС.

При проведении процесса в производственных условиях контролируются: температура процесса, время, расходы водорода и кислорода, состояние горелок (не допускается эрозия кварца). После окончания процесса окисления контролируются: толщина и показатель преломления SiO_2 , плотность пор, напряжение пробоя и пороговое напряжение МОП-структуры.

Оценка термополевой стабильности проводится на МОП-структурах, изготовленных на «спутниках» из объемного кремния КЭФ-4,5 и КДБ-7,5.

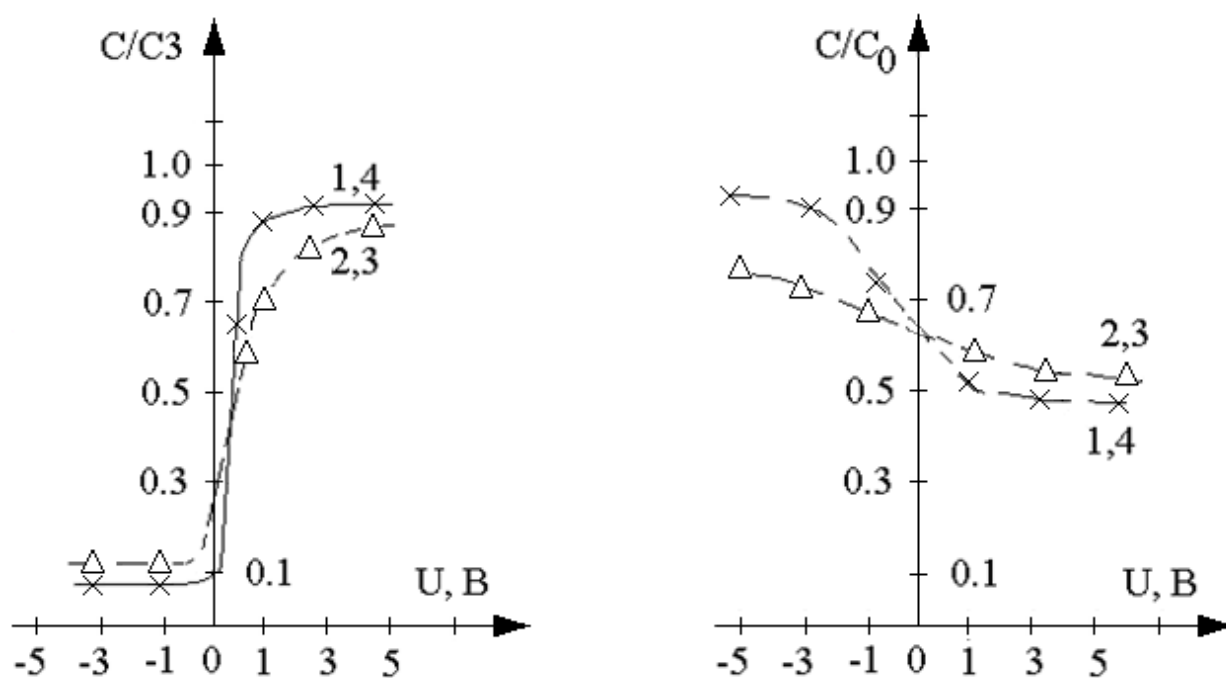


Рис. 2.1. Вольт-фарадные характеристики МОП конденсаторов

(1-исходные, 2 – после 50 ч., 3 – после 200 ч., 4 – после выдержки в нормальных условиях).

Поведение МОП-структур (рис. 2.1) после термополевой нагрузки характеризует границу раздела Si-SiO₂ (границу раздела канала транзистора

и нижнюю границу подзатворного диэлектрика), которая в большей степени определяет радиационную стойкость МОП-структур.

Контролю верхней границы подзатворного диэлектрика при изготовлении затвора также придают большое значение, поскольку надежность МОП-структур определяется комплексно с учетом сформированного затвора. Пленки поликристаллического кремния активно используются в технологии СБИС в качестве материала электрода затвора, межсоединений, высокоомных резисторов и т.д. Дополнительные требования, предъявляемые при создании радиационно-стойких БИС – это стабильное поведение поликристаллических пленок кремния после высокотемпературных обработок (900° – 1000°C) структур в технологическом цикле изготовления СБИС [27].

В табл. 2.1. приведены полученные данные о зависимости средней величины зерна поликристаллических пленок кремния (ППК) и преобладающей структуры в зависимости от температуры их нанесения. Индексами (D) и (S) обозначены данные полученные рентгеновским и электронно-микроскопическим методами измерения .

Таблица 2.1. Структурные характеристики ППК

Температура, ($^{\circ}\text{C}$)	D, Å	S, Å	Текстура
560	590	775	(111)
570	680	740	(111)
580	670	875	(111)
600	320	260	(311)
620	440	390	(110)

В целях исключения проколов подзатворного диэлектрика, важно и необходимо предусматривать предотвращение кристаллизационной структуры поликристаллического кремния в вертикальном направлении при последующих термообработках.

Исследования показали, что в процессе LPCVD осаждения кремния при температурах до 600°C плёнки кремния получают аморфными или частично кристаллизованными, а при температурах осаждения $> 620^{\circ}\text{C}$ они всегда имеют поликристаллическую структуру. Важным требованием

является сохранение чрезвычайно гладкой (на уровне 10 \AA) поверхности, т.к. после отжига при температурах $900 \div 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ у ППК, полученных при температурах $> 620 \text{ }^\circ\text{C}$, резко снижается гладкость поверхности.

Разработанные процессы были положены в основу базовой технологии формирования самосовмещённого затвора на структурах КНС. В качестве метода легирования поликремния был выбран процесс диффузии, т.к. использование метода ионной имплантации приводило к необходимости легирования большими дозами и имели место случаи подлегирования кармана транзистора через подзатворный диэлектрик. Подлегирование канала транзистора через подзатворный диэлектрик возможно и при использовании процесса диффузии, поэтому необходимо ограничение температурно-временной обработки пластин, а также разделение процесса диффузии на два этапа: низкотемпературного (до $850 \text{ }^\circ\text{C}$) – загонка фосфора и более высокотемпературного ($\sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$) - разгонка фосфора. Такой процесс позволяет обеспечить необходимую проводимость поликремния ($R_s \leq 25 \text{ Ом/кв.см}$) на затворном уровне при сохранении термополевой стабильности МОП-структуры.

Условия проведения процесса эпитаксии могут привести к различным состояниям границы раздела Al_2O_3 – кремний, что в свою очередь проявляется при проведении испытаний транзисторов, например при воздействиях внешних специальных факторов. Возникновение дырочного типа проводимости на границе раздела Al_2O_3 – кремний объясняется подлегированием кремния алюминием из сапфировой подложки при повышенных температурах процесса гетероэпитаксиального наращивания кремния на сапфировую подложку. По этой причине при изготовлении р-канальных транзисторов по нижней границе запирающей области транзистора (на границе с сапфиром) могут быть закорочены области стока и истока, или между этими областями через резистор р-типа проводимости будут протекать повышенные токи утечки. В качестве параметра контролирующего эффект подлегирования кремния алюминием в ТУ на

гетероэпитаксиальные структуры КНС (см. главу 1) введены критерии оценки границы раздела сапфир-кремний по «эффекту поля» и контролю минимума проводимости кремния на границе раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$. При этом тип проводимости кремния должен быть электронный, а величина поперечного напряжения, прилагаемого к сапфиру, должна быть минус 0,5кВ и менее.

Проводимость на границе раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$ также может существенно измениться после воздействия на транзисторы ионизирующими излучениями. Переходный слой на границе раздела Al_2O_3 – кремнийсодержит связанные нейтральные комплексы, которые после специальных внешних воздействий изменяют свое состояние, выделяя активные доноры (к таковым комплексам относят чаще кислородосодержащие, которые образуются при восстановлении Al_2O_3 водородом). Поэтому для n-канальных транзисторов изготовленных на исходных КНС-структурах с электронным типом проводимости повышение тока утечки после воздействия ионизирующих излучений характерно.

Для подавления токов утечки у n-канальных транзисторов рекомендуется специальный процесс глубокого ионного легирования (на границу раздела Al_2O_3 – Si) бором. Легирование p-кармана n-канального транзистора проводят на установке «Лада-20». Процесс ионного легирования кармана проводится в два этапа:

-на первом этапе: ионное легирование бором с энергиями > 150 кэВ и дозой < 1 мкКл/см² обеспечивается надежная перекомпенсация кремния n-типа проводимости в p-тип;

-на втором этапе: ионное легирование бором с энергиями ~ 40 кэВ и дозой $\sim 0,5$ мкКл/см² задается необходимое пороговое напряжение для n-канального транзистора.

При легировании кармана n-канального транзистора бором целесообразно использовать надежную маску для защиты p-канальных транзисторов. В качестве маски может быть использован толстый резист, слой Al или другое покрытие.

Для радиационно-стойких КМОП БИС с повышенным напряжением питания (9 В) применяют также технологию комбинированного подзатворного диэлектрика на базе термического диоксида кремния (формируемого окислением в «сухом» кислороде) и нитрида кремния.

Особое внимание при формировании подзатворного диэлектрика из термического диоксида кремния уделено чистоте используемых реагентов и в первую очередь кислороду. Используется кислород особой чистоты с содержанием основного вещества 99,999% и влаги 0,01 г/м³. С целью обеспечения стабильных результатов процесса термического окисления разработана методика глубокой очистки кислорода в специальной экспериментальной установке (рис. 2.3).

Кислород, поступающий в установку очистки через регулятор давления, последовательно попадает в нагревательную и охлаждающую камеры, где соответственно нагревается до температуры 950 °С ±10 °С и охлаждается до температуры минус 150 °С ±5 °С. В результате этой обработки при высокой температуре в кислороде снижается содержание органических примесей, а также паров воды и СО₂, которые после завершения окислительных процессов при низкой температуре переходят в твердый осадок и улавливаются в холодильнике, снабженном для повышения эффективности захвата фильтром тонкой очистки (диаметр пор < 0,25 мкм).

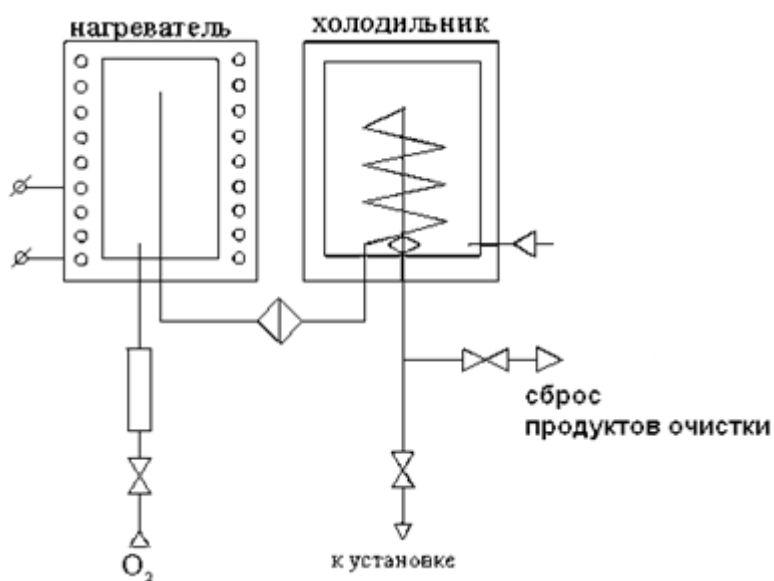


Рис. 2.3. Схема установки дополнительной очистки кислорода.

Применение комбинированного подзатворного диэлектрика позволяет увеличить радиационную стойкость, одновременно повысить пробивное напряжение КМОП БИС КНС при общем увеличении выхода годных.

Повышение выхода годных и величины пробивного напряжения обеспечивается, прежде всего, тем, что нанесение Si_3N_4 на островковую структуру происходит из газовой фазы, поэтому происходит "залечивание" микродефектов и "нор", образующихся после термического окисления кремния на границе раздела $\text{Si}-\text{Al}_2\text{O}_3$ по базовой кромке островков кремния.

Основная причина появления такого зазора заключается в том, что оксид растет на поверхности островка кремния, боковые грани которого имеют наклон по отношению к подложке. Если принять, что термический оксид растет по нормали к боковой поверхности кремниевого островка, то оксид образует с подложкой угол $30-35^\circ$. Для тонкого оксида (10 нм) этот эффект незначителен. Более толстый оксид образует значительный зазор, который может затруднить дальнейшее изготовление прибора (на этапе диффузии или металлизации).

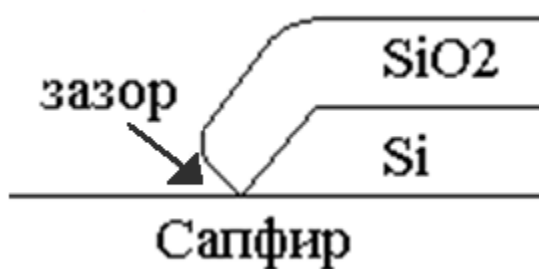


Рис. 2.4. Схема роста термического оксида на островке кремния.

Изготовленные по данной технологии микросхемы серии ОЗУ показали высокую устойчивость к специальным воздействиям, что является принципиальным для КНС-структур, уступающей по

кристаллографическому совершенству кремниевым структурам , изготовленным из объемного кремния. На рис. 2.5 для сравнения приведены зависимости тока потребления от дозы γ -облучения для КМОП ячеек с обычным и комбинированным подзатворным диэлектриком. Повышенная устойчивость комбинированного диэлектрика к дозе γ -облучения при толщине нитрида кремния $\geq 400\text{\AA}$ может быть объяснена накоплением отрицательного заряда на ловушках нитрида кремния, который при дозе γ -облучения выше $5 \cdot 10^5$ рад перекомпенсирует накапливаемый положительный заряд, а также тем, что отрицательный заряд накапливается медленнее, и на первом этапе облучения накопление положительного заряда происходит аналогично МОП-структурам, изготовленным с подзатворным диэлектриком из диоксида кремния.

Однако, испытания КМОП микросхем при повышенных температурах $> 125^\circ\text{C}$ приводили к увеличению токов потребления. Для исключения этого эффекта была доработана технология формирования комбинированного диэлектрика с нанесением слоя диоксида кремния из газовой фазы на слой нитрида кремния в едином технологическом цикле без разгрузки пластин.

Структуры $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$, где внешняя пленка SiO_2 наносилась из газовой фазы, обеспечивали требуемую термостойкость.

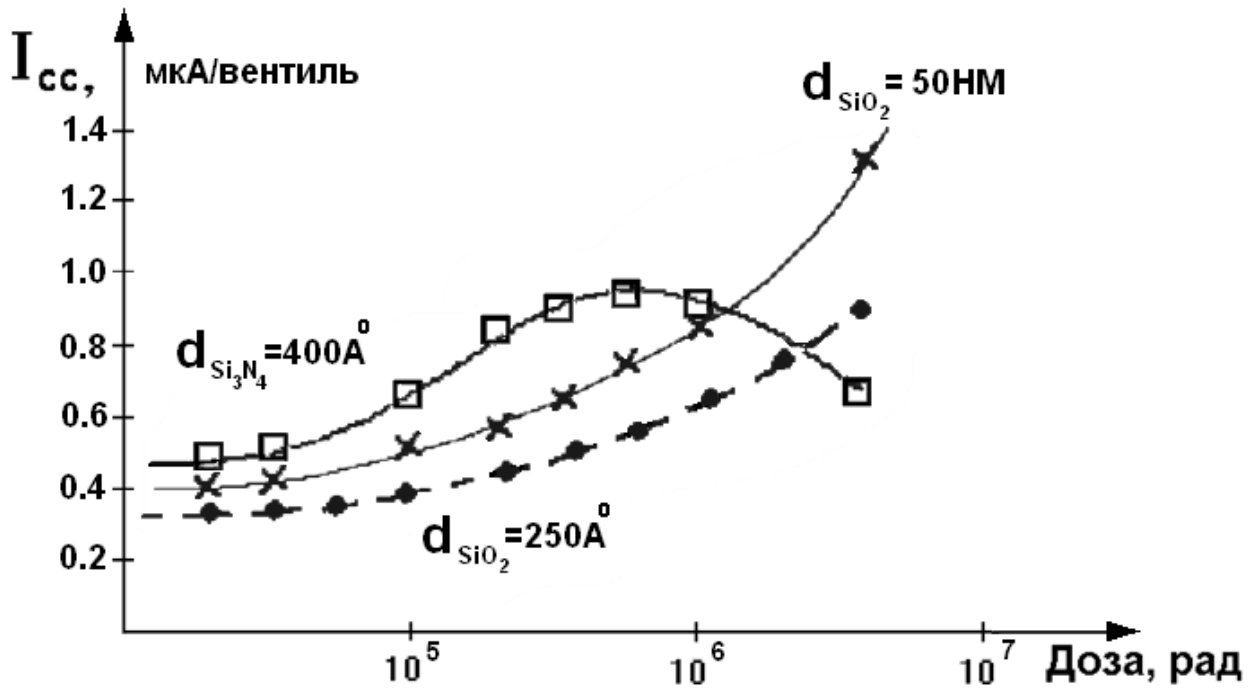


Рис. 2.5. Зависимость тока потребления КМОП ячеек с различным подзатворным диэлектриком от полученной дозы

Для получения пиролитического SiO_2 использовали закись азота (N_2O) и диметилдихлорсилан $Si(CH_3)_2Cl_2$, дополнительно очищенный перегонкой.

Использование дихлорсилана (SiH_2Cl_2), который применяют в традиционных технологиях для получения диэлектрических покрытий, в данном случае приводило к образованию обильного рыхлого белого осадка и повышенной дефектности.

На рис. 2.6 – 2.7 приведены основные кинетические зависимости процесса выращивания пиролитического SiO_2 .

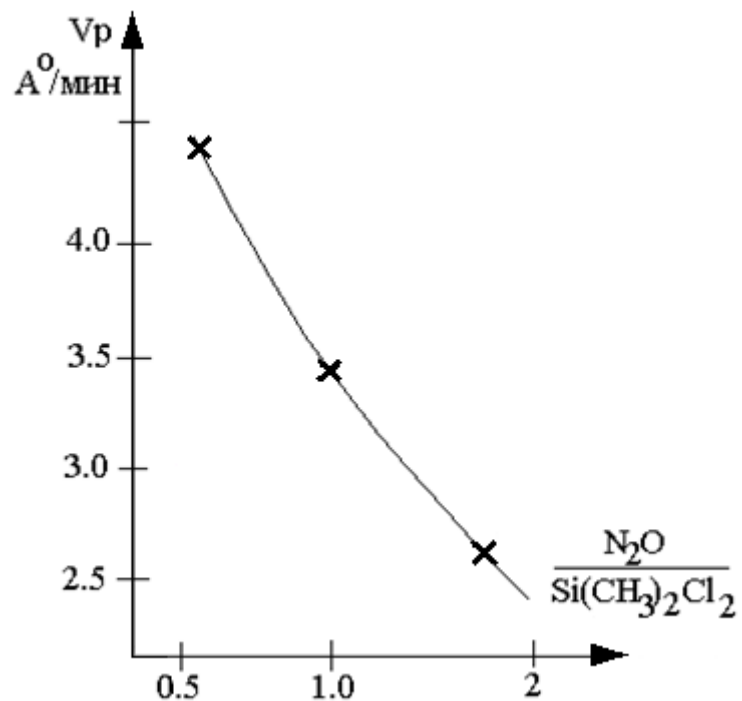


Рис. 2.6. Зависимость скорости роста SiO_2 от соотношения $N_2O/Si(CH_3)_2Cl_2$

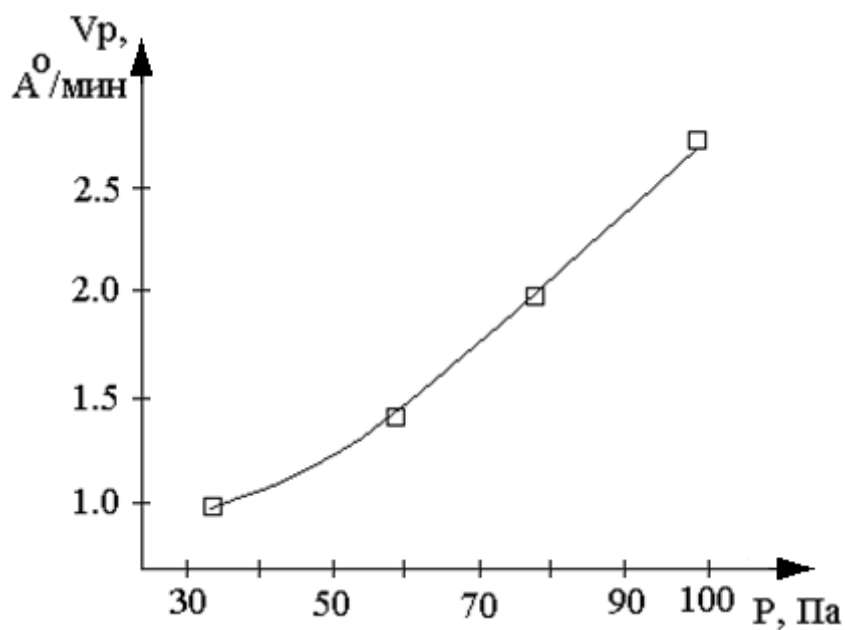


Рис. 2.7. Зависимость скорости роста SiO_2 от давления

Для полученной таким способом трехслойной МОНОП-структуры были исследованы зависимости основных параметров: напряжения пробоя, электрической прочности, диэлектрической проницаемости и порогового

напряжения от толщины слоя нитрида кремния. Эти зависимости приведены на рис. 2.8 и 2.9.

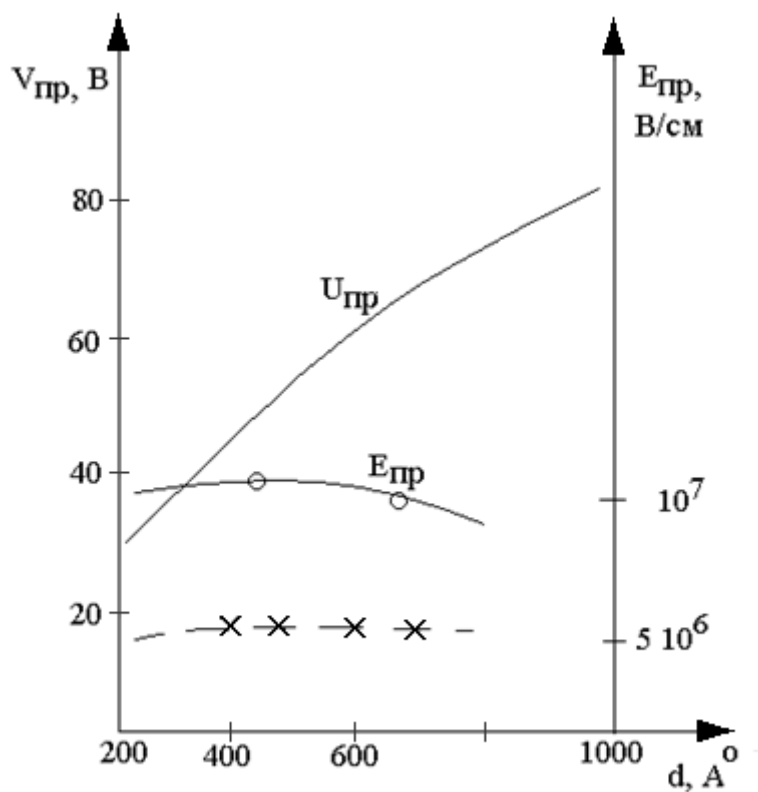


Рис. 2.8. Зависимость напряжения пробоя ($V_{пр}$) и электрической прочности ($E_{пр}$) МНОП-структуры от толщины нитрида кремния.

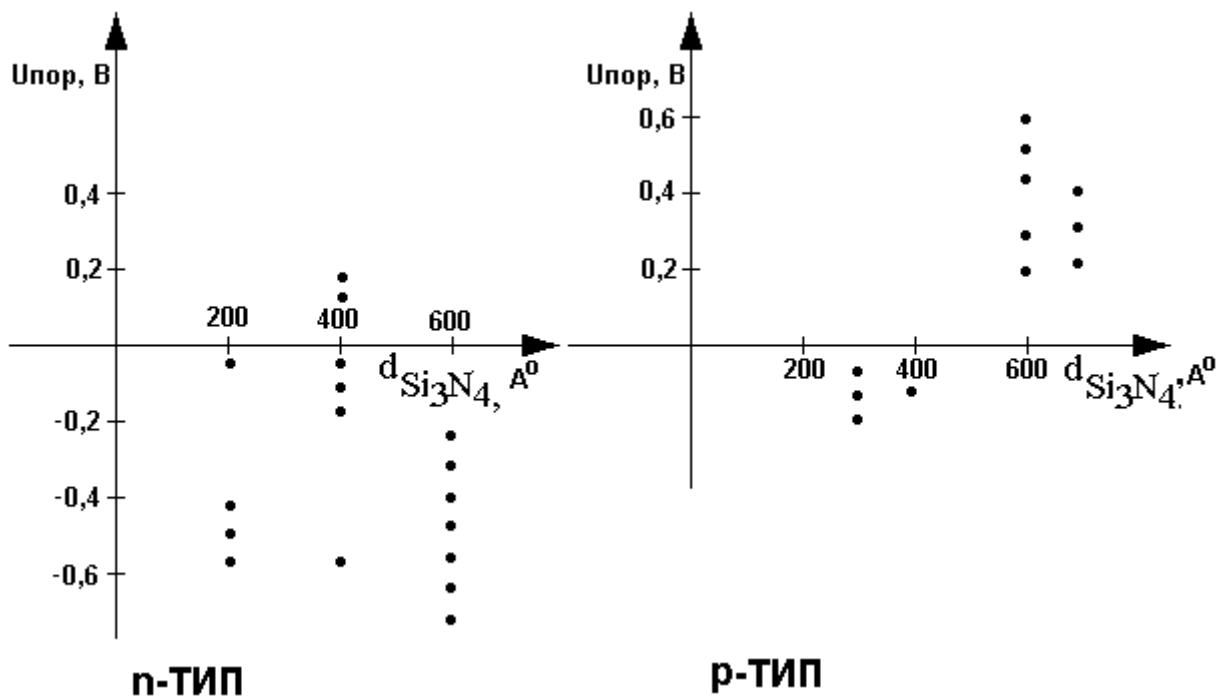


Рис. 2.9. Значения порогового напряжения на кремнии n- и p-типа проводимости от толщины нитрида кремния.

При использовании процесса в промышленных условиях контролировались следующие параметры многослойного диэлектрика: плотность пор, удельная электрическая ёмкость, напряжение пробоя и пороговое напряжение, а после изготовления БИС КНС на готовых пластинах контролировались пороговые напряжения тестовых n- и p-канальных транзисторов. Также определялся сдвиг C-V характеристик МДП-структуры с 3-слойным диэлектриком после воздействия повышенной температуры и облучения.

Результаты контроля диэлектрических плёнок методом электрографии показали, что плотность сквозных пор в плёнках $\text{Si}_3\text{N}_4 < 0,3$ шт./ cm^2 . Однако качество плёнки зависит от состояния поверхности пластины Si, так как наличие рисок и царапин на поверхности кремния очень хорошо проявляется при испытаниях диэлектрической плёнки при больших напряжениях смещения. Воспроизводимость процесса получения 3-слойной композиции по толщине и соотношению толщины слоёв оксида кремния, нитрида кремния и оксинитрида контролировалась по результатам измерения удельной электрической ёмкости структуры. Из расчётов следовало, что структура типа $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$ имеет удельную электрическую ёмкость $5,2 \cdot 10^4$ пФ/ cm^2 . С учётом 10% разброса на толщину каждого из слоёв колебания $C_{\text{уд}}$ должны составлять $\pm 1,25 \cdot 10^4$ пФ/ cm^2 . Контроль $C_{\text{уд}}$ на пластине показал, что отклонения в толщине не превышают $\pm 0,25 \cdot 10^4$ пФ/ cm^2 ($\pm 5\%$).

Исследование напряжения пробоя подзатворного диэлектрика в кольцевых и линейных транзисторах (см. таблицу 2.2) показало, что данная технология обеспечивает воспроизводимость этого параметра вне зависимости от рельефа.

Учитывая, что при специальных внешних воздействиях происходит накопление положительного заряда в подзатворном диэлектрике и в реальных микросхемах наблюдается увеличение порогового напряжения у p-

канального транзистора и уменьшение порогового напряжения у n-канального транзистора, для обеспечения запаса устойчивости работы микросхем необходимо, чтобы $U_{\text{ПОР}}$ на n-кремнии было малым, а $U_{\text{ПОР}}$ на p-кремнии большим. Наилучший результат достигается за счет использования примеси разного типа для легирования поликристаллического кремния: фосфора для n-канальных транзисторов и бора для p-канальных. Это позволяет сместить пороговое напряжение n- и p-канальных транзисторов более чем на 0,5 В в нужную сторону и обеспечить «перекос» пороговых напряжений.

Таблица 2.2. Пробивные напряжения подзатворного диэлектрика

Тип транзистора	Тип затвора	
	Кольцевой (отсутствие грани)	Линейный (с наличием грани)
	Напряжение пробоя, В	Напряжение пробоя, В
p-канальный	90; 110; 100; 110; 80;	95; 95; 80; 95; 100;
n-канальный	90; 80; 110; 100; 100;	100; 100; 100; 90; 90;

Одновременно с повышением радиационной стойкости и электрической прочности с использованием многослойного подзатворного диэлектрика, необходимо иметь в виду увеличение его электропроводности при повышенных температурах (>150 °С).

Оценка миграции подвижных ионов (щелочных металлов) в оксиде (SiO_2) проводится в соответствии с отраслевыми стандартами при температуре 200 °С и воздействии электрического поля, что оправдано, т.к. SiO_2 не является маской для щелочных металлов.

При исследовании комбинированного диэлектрика на основе Si_3N_4 такой необходимости нет, т. к. миграция подвижных зарядов исключена, но такой структуре присущи свои механизмы нестабильности, связанные с

накоплением заряда на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ и ловушках в Si_3N_4 . Поэтому здесь должны быть выработаны свои режимы испытаний.

При удельной ёмкости подзатворного диэлектрика $C_{\text{уд}}=5,2 \cdot 10^4$ пФ/см² накопление заряда на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ из-за миграционного гистерезиса не должно превышать $Q_s=5 \div 7 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Заряд, накопленный на границе раздела, может быть определён из выражения:

$$Q_m = ((\epsilon_n \cdot \gamma_0 - \epsilon_0 \cdot \gamma_n) / (\gamma_n d_0 + \gamma_0 d_n)) \cdot (V - \phi_s), \quad (2.1)$$

где ϵ , γ , d – диэлектрическая проницаемость, проводимость и толщина плёнки, оксида и нитрида кремния;

V – Напряжение, приложенное к затвору МДП-структуры;

ϕ_s - потенциал поверхности полупроводника.

В таблице 2.3 приведены значения заряда Q_m для различных соотношений между проводимостями оксида γ_0 и нитрида γ_n . При расчёте принимались значения $\epsilon_0=4$; $\epsilon_n=7$; $d_0=200\text{Å}$; $d_n=750\text{Å}$; $V=10$ В.

Из данных видно, что для получения требуемой величины Q_m соотношения между проводимостями диэлектрических плёнок должно поддерживаться в диапазоне $1,5\gamma_0 \leq \gamma_n \leq 2\gamma_0$.

Таблица. 2.3. Изменение величины накапливаемого заряда на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ от проводимости оксида (γ_0) и нитрида.

Наименование параметра	Соотношение проводимостей				
	$\gamma_n \gg \gamma_0$	$\gamma_n = \varphi \gamma_0$	$\gamma_n = 2\gamma_0$	$\gamma_n = \gamma_0$	$\gamma_n = 0,5\gamma_0$
$Q_m, \text{см}^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	$4,8 \cdot 10^{11}$	$-1,65 \cdot 10^{12}$	- $3,3 \cdot 10^{12}$
τ		$2,5 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^5$	$4,3 \cdot 10^5$	

Для оценки термостабильности подзатворного диэлектрика, учитывая верхний предел работы микросхемы 125°C , при использовании комбинированного диэлектрика, с использованием Si_3N_4 желательно верхний температурный предел ограничить 150°C .

Оценка качества МОП-транзисторов, полученных в рамках разработанной технологии, проводится путём сравнения характеристик линейных и кольцевых транзисторов по пробивным напряжениям и токам утечки до и после радиационного воздействия.

На рис. 2.10 изображен кремниевый «островок» МОП-транзистора, расположенный на сапфировой подложке. Эквивалентная электрическая схема такого прибора представляет собой параллельное соединение трех транзисторов: верхний основной транзистор T_1 ; боковой паразитный (с двух сторон «островки») транзистор T_2 ; нижний паразитный транзистор T_3 , затвором которого является подложка.

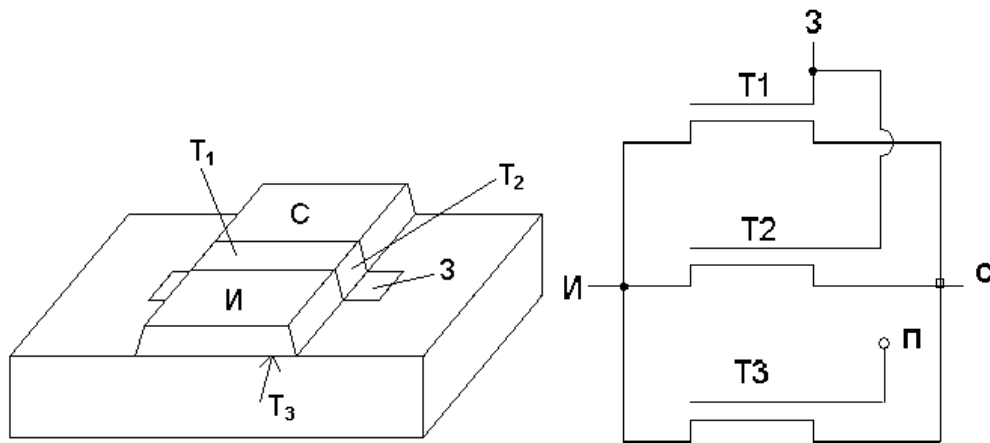


Рис. 2.10. Схема линейного транзистора.

Суммарная сток-затворная характеристика T_0 линейного n-канального транзистора показывает, что проявляются все три ее составляющие. В области больших токов ($I_c \gg 1 \text{ мкА}$) ВАХ полностью определяется характеристикой основного транзистора T_1 . Параметры бокового и нижнего транзисторов T_2 и T_3 определяют ВАХ в области малых токов ($I_c \ll 1 \text{ мкА}$) и являются паразитными токами утечки. При наличии положительного заряда на границе раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Si}$ в p-канальном транзисторе нижняя граница (T_3) может включаться как «резистор», поэтому в практических расчетах транзистор T_3 заменяют, как правило, на резистор R_{UT} , через который протекают ток утечки, не зависящий от напряжения на верхнем затворе U_3 .

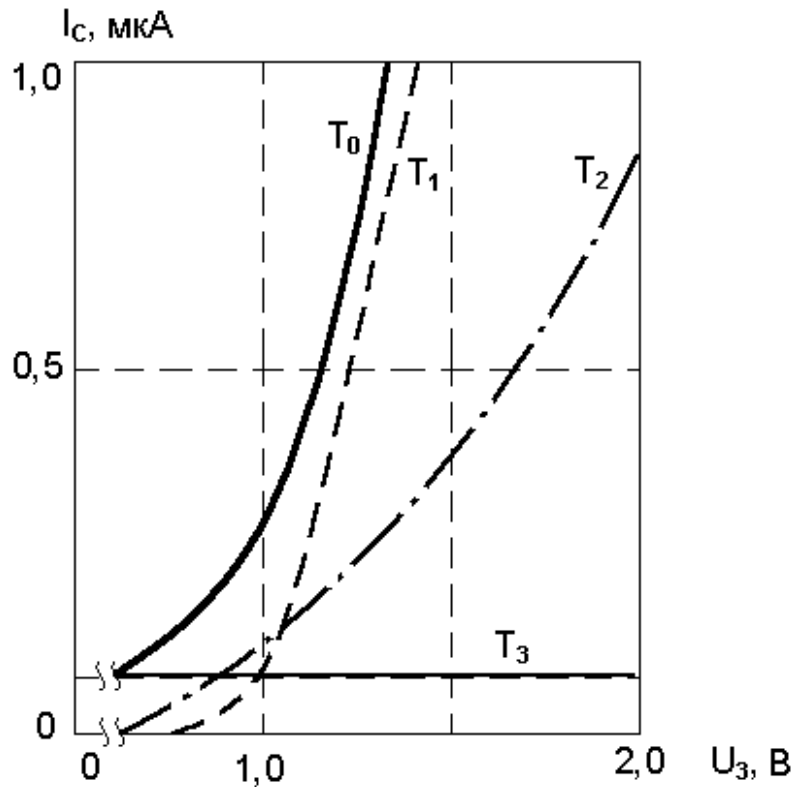
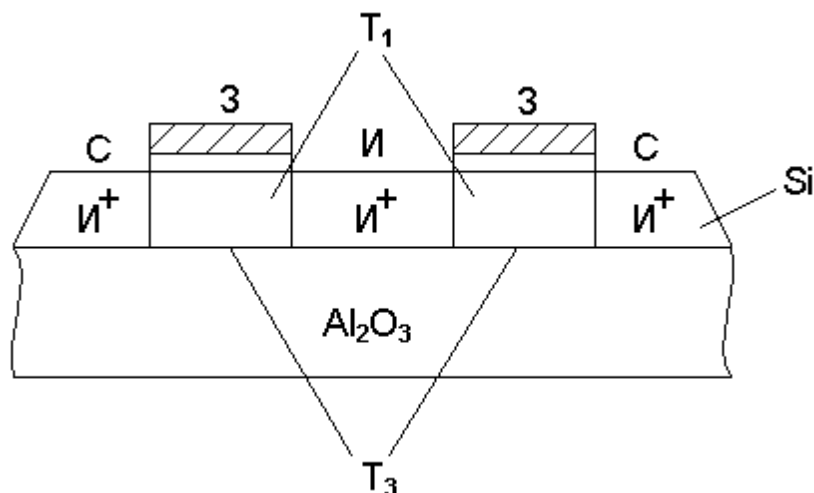


Рис. 2.11.

Когда МОП-транзистор имеет кольцевую структуру (рис. 2.12), его затвор полностью расположен в глубине кремниевого островка и не выводится на боковую грань. Протекание тока в этом случае через транзистор возможно либо по верхней границе полупроводник-оксид (T_1), либо по границе раздела полупроводник-сапфир (T_3). Транзистор T_2 при такой конфигурации затвора отсутствует и не оказывает влияния на ВАХ прибора. Кольцевые транзисторы более надежные. Однако они занимают большую площадь и неэффективны при высокой степени интеграции.



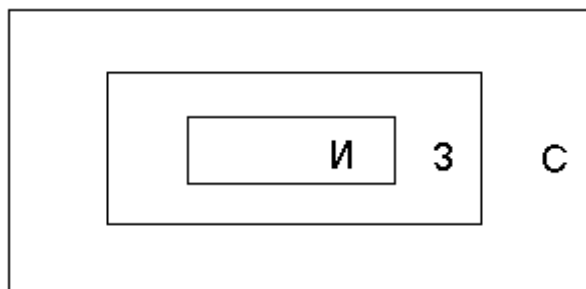


Рис.2.12. Структура и топология кольцевого транзистора.

При проектировании и организации производства радиационно-стойких КМОП БИС необходимо заранее предусматривать «перекос» пороговых напряжений n- и p-канальных транзисторов. Учитывая, что после воздействия радиации пороговое напряжение n-канального транзистора уменьшается, а p-канального возрастает, задача технологии обеспечить требуемые запасы на изменение пороговых напряжений.

Важным этапом при разработке технологического маршрута является также обеспечение надёжной межэлементной изоляции по развитому рельефу, а также между слоями кремния и поликремния, включая разводку первого уровня в эпитаксиальном кремнии с алюминиевой разводкой контактных окон второго уровня. Попытки использовать защитные слои диоксида кремния после окисления поликремния и нанесения пиролитического диоксида кремния не дали положительных результатов. Поэтому рассмотрим защитные свойства нитрида кремния и комбинированных покрытий в целях использования их в качестве межслойной изоляции.

Пленки Si_3N_4 используют как маску при прокислении кремния и для межслойной изоляции. Поэтому слои Si_3N_4 должны обладать высокой сплошностью, устойчивостью к окислению и миграции подвижного заряда.

Оценки окисляемости нитрида кремния, полученного различными методами, приведены в таблице. 2.4

Как следует из таблицы, наиболее эффективной маской являются слои Si_3N_4 , полученные из тетрахлорида кремния и аммиака, поэтому в качестве

базового процесса в технологическом маршруте изготовления КМОП БИС КНС, как правило, используется эта технология.

Таблица 2.4. Сравнительные характеристики защитных покрытий нитрида кремния

Толщина пленки, мкм	Метод Осаждения пленок	Толщина Si ₃ N ₄ , мкм		Доля окисленного Si ₃ N ₄ , %
		до окисления	После окисления	
0,7	Si(CH ₃) ₂ Cl ₂ + NH ₃	0,14	0,11	20
1,0	Si(CH ₃) ₂ Cl ₂ + NH ₃	0,16	0,05	70
	SiH ₂ Cl ₂ + NH ₃	0,1	0,08	20
1,5	Si(CH ₃) ₂ Cl ₂ + NH ₃	0,16	0,0	100
	SiH ₂ Cl ₂ + NH ₃	0,1	0,05-0,08	20-50
	SiCl ₄ + NH ₃	0,15	0,13-0,14	10-15
	SiH ₄ + NH ₃	0,15	0,0	100

Защитные слои нитрида кремния применяют также в качестве маски при проведении операции локального прокисления для разделения и изоляции островков кремния .

Технология локального прокисления кремния (LOCOS), получившая широкое распространение в технологии БИС на объемном кремнии для изоляции активных кремниевых элементов диоксидом кремния, не получила распространения в технологии БИС КНС старших поколений. В промышленной КМОП КНС технологии применяют исходные структуры КНС с толщиной слоя кремния 0,6 и 0,3 мкм., поэтому при использовании LOCOS технологии толщина выращиваемого оксида кремния будет соответственно в этих слоях до 1,2 и 0,6 мкм.(рис.2.13.). Для термического окисления это большая толщина, что можно реализовать только в длительных процессах при температурах выше 1000°С с образованием большого положительного накопленного заряда в разделительных межэлементных слоях SiO₂, в дальнейшем называемым «фиксированным зарядом». Поскольку фиксированный заряд неподвижен, он не вносит вклад в токопроводимость транзистора. Таким образом, зарядка и разрядка

фиксированных зарядов вносит в транзистор переменный паразитный заряд со многими отрицательными эффектами, так при испытаниях КМОП БИС на устойчивость к ионизирующим излучениям накопленный заряд отрицательно влияет на работу транзисторов и не обеспечивает преимущества этой технологии по радиационной стойкости. Поэтому при формировании изолированных островков кремния в базовой технологии используют плазмохимическое травление структур КНС.

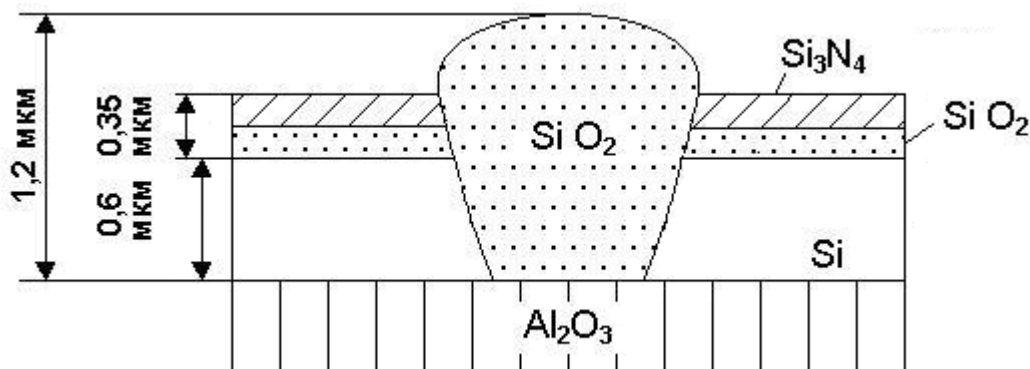


Рис. 2.13. Межэлементная изоляция термическим оксидом.

В UTSi технологии, как будет показано в п. 3.4, при толщине кремния менее 0,1 мкм применение технологии LOCOS особенно эффективно для разделения островков кремния, что позволяет упростить технологию формирования изолированных островков кремния и обеспечивает хорошую планаризацию рельефа.

2.2. Базовый технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС SOS2 (длина канала до 4 мкм)

Базовый технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС₂ включает:

- ✓ восемь фотолитографий,
- ✓ четыре операции ионной имплантации,
- ✓ подзатворное окисление,
- ✓ формирование поликремниевого затвора с учётом диффузии фосфора,

- ✓ несколько отжигов,
- ✓ процессы нанесения диэлектрических слоев,
- ✓ напыления алюминия,
- ✓ прецизионного травления островков кремния, затворов, контактных окон, межсоединений и разводки.

Исходным материалом являются структуры КНС 0,6 мкм, изготовленные по ТУ ЕТО 035 373ТУ или КГЯД 430 107.000 ТУ

Ниже представлена последовательность ключевых технологических операций при изготовлении КМОП БИС КНС.

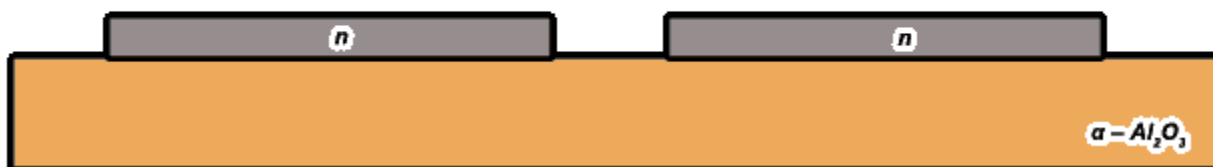
1.

- ✓ Входной контроль,
- ✓ проверка структур КНС на соответствие ТУ,
- ✓ спец-отмывка.



2. фотолитография

- ✓ химическая обработка и формирование маски;
- ✓ плазмохимическое травление островков кремния;
- ✓ удаление фоторезиста.



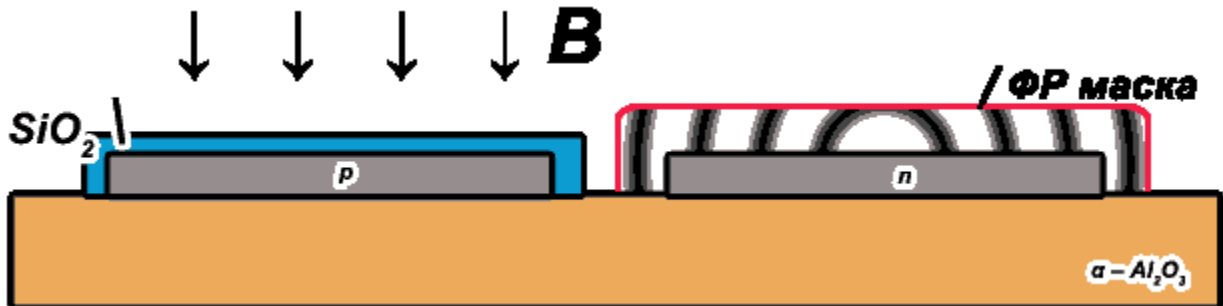
3. фотолитография

- ✓ формирование областей р-типа проводимости (р-кармана);
- ✓ спец-отмывка;

- ✓ изготовление специальной маски под имплантацию бора с высокими энергиями.

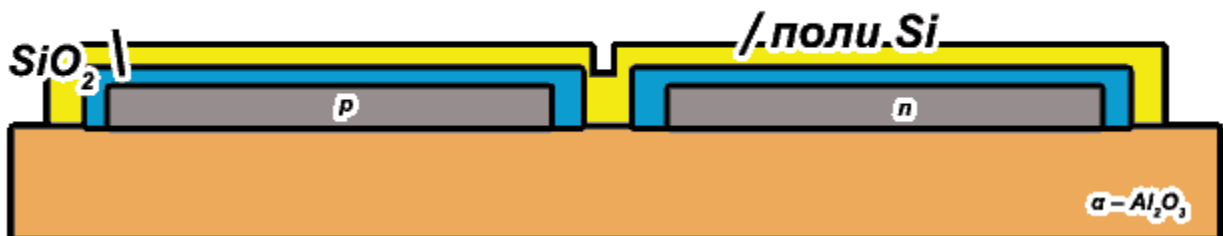
Режим 1: имплантация «В» на границу раздела Al_2O_3 и Si;

Режим 2: имплантация «В» в приповерхностную область островка кремния.



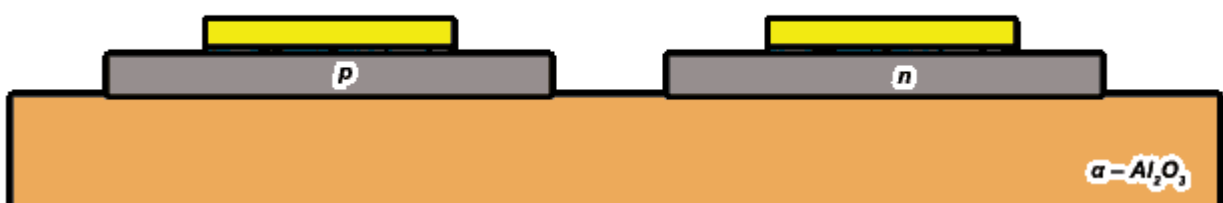
4. удаление фоторезиста

- ✓ отжиг подзатворного оксида;
- ✓ осаждение поликремния;
- ✓ диффузия фосфора;
- ✓ травление ФСС;
- ✓ разгонка фосфора.



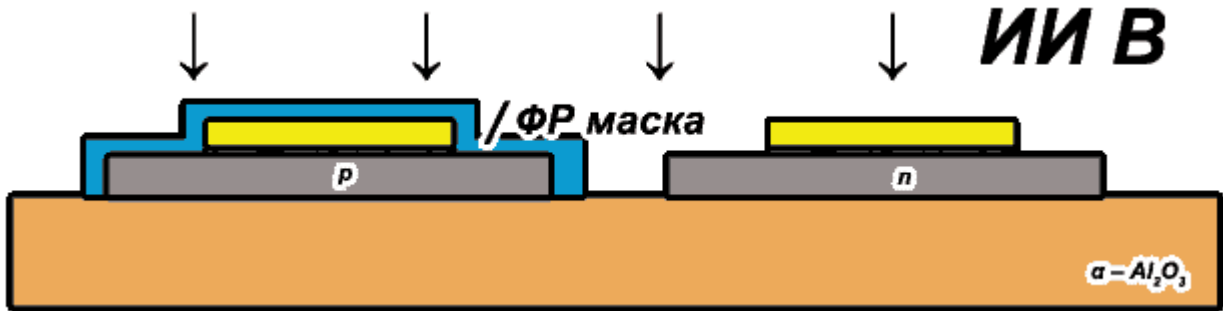
5. – фотолитография:

- ✓ изготовление маски;
- ✓ прецизионное травление поликремниевых затворов;
- ✓ снятие резиста.



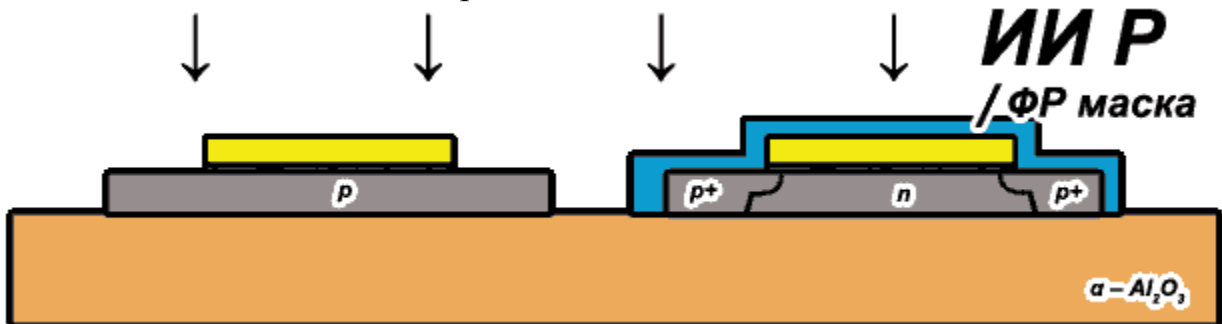
6. фотолитография

- ✓ защита островков p-типа,
- ✓ ионная имплантация бора в области истока и стока,
- ✓ снятие резиста.



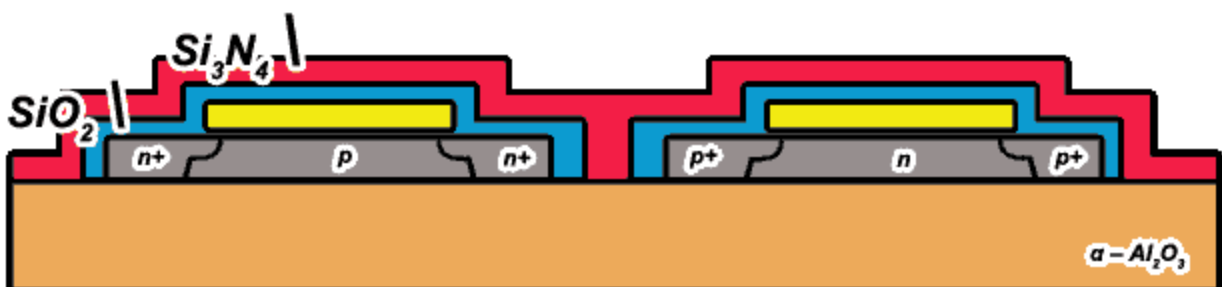
7. фотолитография

- ✓ защита островков n-типа;
- ✓ ионная имплантация фосфора в области истока и стока;
- ✓ снятие резиста.



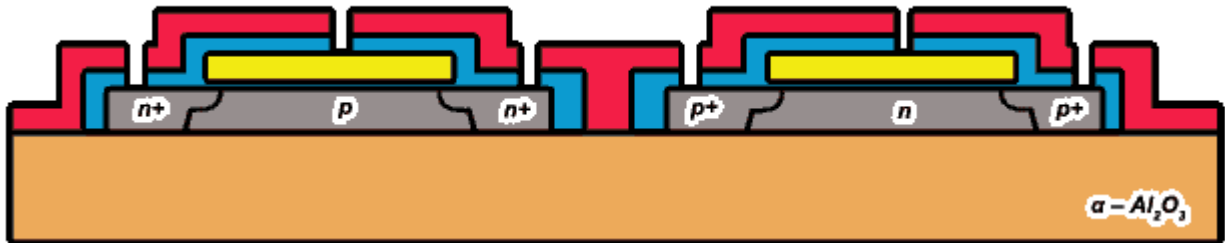
8. хим. обработка

- ✓ нанесение межслойной изоляции
 1. слой SiO_2
 2. слой Si_3N_4
- ✓ отжиг стоков и истоков



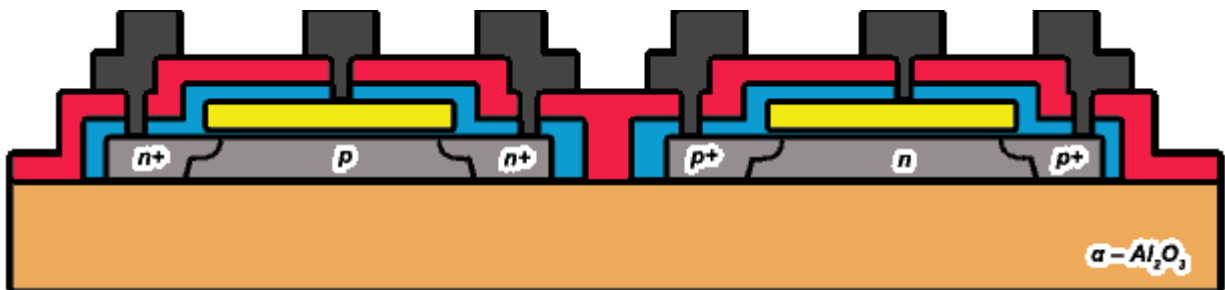
9. – фотолитография:

- ✓ формирование маски;
- ✓ вскрытие контактных окон;
- ✓ удаление фоторезиста.



10. фотолитография:

- ✓ спец. отмывка;
- ✓ напыление Al;
- ✓ формирование маски;
- ✓ травление Al;
- ✓ удаление фоторезиста;
- ✓ выжигание контактов.



11. Фотолитография:

- ✓ хим. обработка;
- ✓ нанесение защитного покрытия ФСС;
- ✓ формирование маски;
- ✓ травление ФСС (вскрытие контактных площадок).

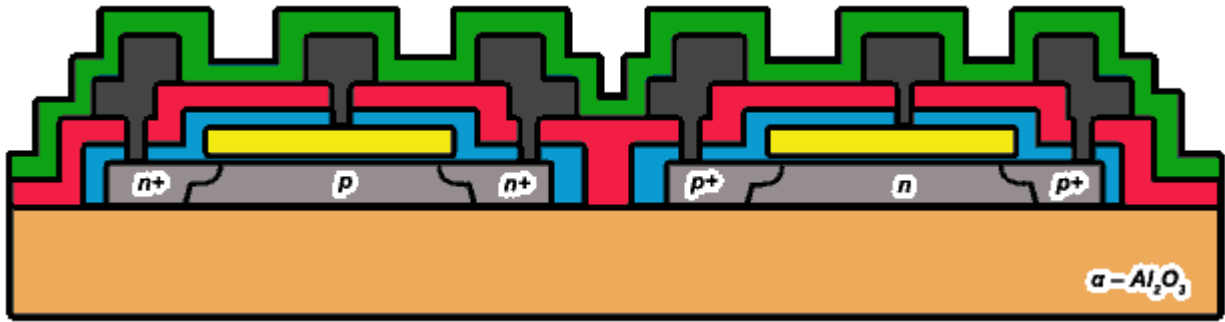


Рис. 2.14. Последовательность основных технологических операций (SOS2).

Далее пластины поступают на тестовый и функциональный контроль.

По разработанному технологическому маршруту отечественной промышленностью был освоен выпуск специализированного микропроцессорного комплекта радиационно-стойких БИС серий Б1825 и Б1620 [8]. Разработанный комплект БИС предназначен для применения в цифровых системах управления аэрокосмической аппаратуры. В состав комплекта входят два модульных микропроцессора, арифметический расширитель, умножитель, а также ряд микросхем сопряжения с различными периферийными интерфейсами. Для повышения надёжности аппаратуры в состав комплекта введены мажоритирующие элементы, а также предусмотрено резервирование основных узлов наиболее ответственных микросхем, в том числе перестраиваемого синхронизатора и формирователя адресов микрокоманд.

Конструктивное исполнение микросхем на полиамидном носителе обеспечивает малую массу (менее 0,1 г) и малые габариты аппаратуры (площадь 64-выводной микросхемы 1 см²) за счёт плотного размещения элементов.

Состав комплекта представлен ниже:

Тип микросхемы	Функциональное назначение
Б1825 ВС3-2	16-разрядный модульный микропроцессор
Б1825 ВС1-2	4-разрядный модульный микропроцессор
Б1825 ВР5-2	арифметический расширитель 8x8
Б1825 ВР3-2	умножитель 16x16
Б1825 ВБ1-2	перестраиваемый синхронизатор
Б1825 ВА1-2	логический элемент согласования
Б1825 ВА3-2	магистральный приёмопередатчик
Б1825 ИР1-2	многофункциональный регистр
Б1825 ВУ1-2	формирователь адреса микрокоманды
Б1825 ВА2-2	коммутатор магистралей
Б1825 ВР2-2	схема ускоренного переноса
Б1825 ВК1-2	мажоритирующий элемент
Б1825 ВВ2-2	адаптер параллельного канала
Б1620 РУ2-2	статическое ОЗУ 4 кбит
Б1620 РЕ1-2	масочное ПЗУ 16 кбит

2.3. Технологический маршрут изготовления КМОП БИС SOS-3

(длина канала 2 мкм)

Анализ электрических параметров тестовых транзисторов, изготавливаемых по маршруту SOS-2, в частности:

- ✓ величины и разброса пороговых напряжений;
- ✓ тока крутизны транзисторов;
- ✓ токов утечки и напряжения пробоя,

позволил выявить «узкие места» этого маршрута и определить пути его модернизации в первую очередь в направлении уменьшения проектных технологических норм.

К проблемам, которые необходимо было решить, были отнесены:

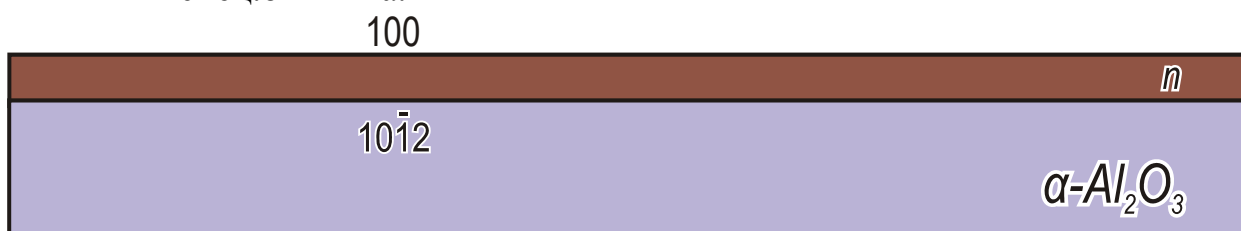
- ✓ оптимизация концентрации легирующих примесей в канале n- и p-канального транзисторов;
- ✓ уменьшение токов утечки p-канального транзистора (в т.ч. решение проблемы смыкания областей истока и стока);
- ✓ обеспечение воспроизводимости формирования длины каналов n- и p-канальных транзисторов.

В результате был модернизирован технологический маршрут SOS-2. Последовательность операций маршрута SOS-3 приведена ниже.

Последовательность технологических операций формирования КМОП БИС КНС

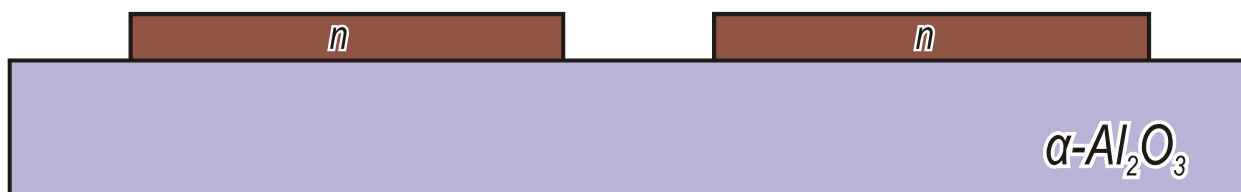
1.

- ✓ Входной контроль,
- ✓ проверка структур КНС на соответствие ТУ,
- ✓ спец.отмывка.



2. Формирование кремниевых островков

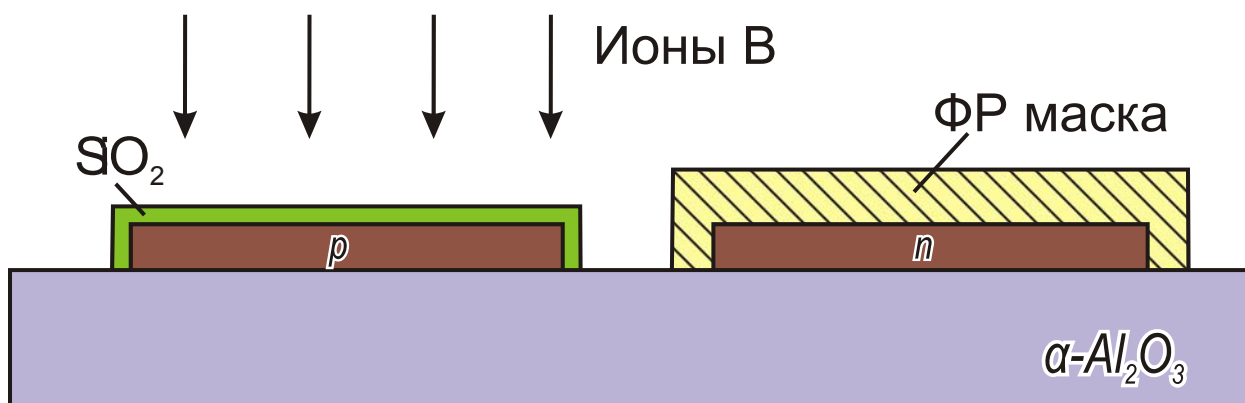
На пластину КНС наносят фоторезист и проводят фотолитографию по кремнию.



3. Формирование карманов

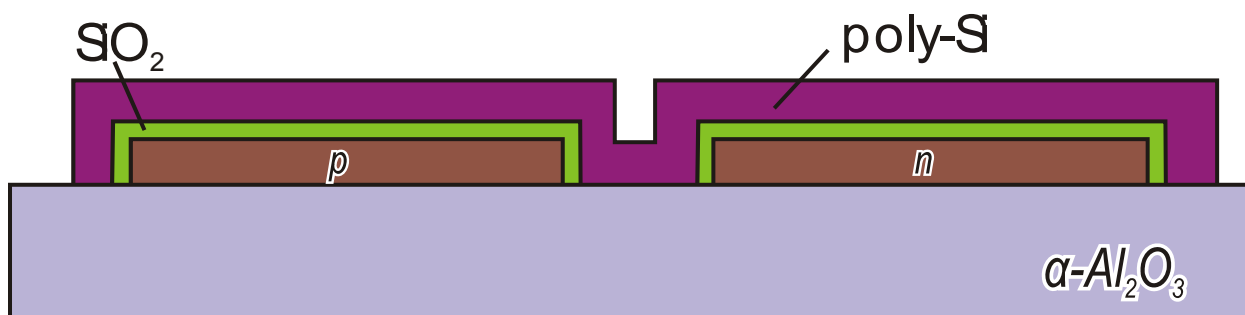
На пластине с островками кремния путем окисления выращивают плёнку двуокиси кремния толщиной 0,05 мкм, на которую напыляют слой алюминия толщиной 0,6 – 1,0 мкм. По слою алюминия проводят фотолитографию, с помощью которой открываются те островки кремния, где должны быть изготовлены n-канальные транзисторы. Затем проводят двойную ионную имплантацию бора: глубокую (с энергией внедрения ионов

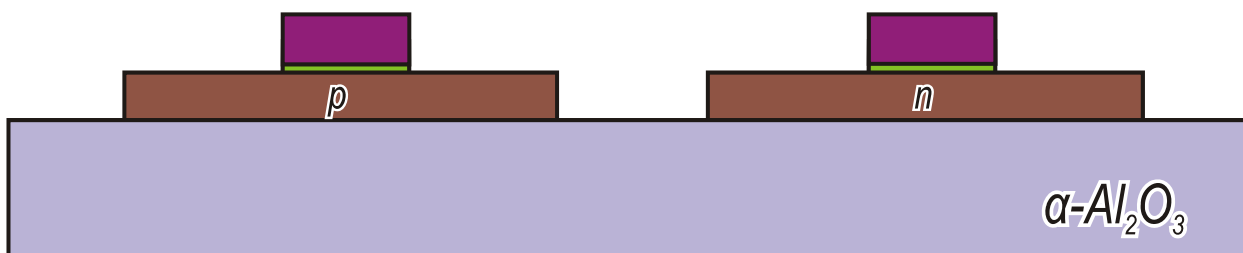
160 кэВ для легирования области, примыкающей к границе раздела сапфир–кремний) и мелкую (с энергией ионов 40 кэВ – для подгонки порогового напряжения). Затем слои Al и SiO₂, служащие маской при ионном легировании, химически удаляют. Затем закрывают фоторезистом места, где должны быть изготовлены р-канальные транзисторы и проводят иную имплантацию фосфора с энергией 40 кэВ. После этого фоторезист удаляют и проводят разгонку имплантированной примеси при 950° С 15 минут.



4. Формирование подзатворного диэлектрика и затворов транзисторов

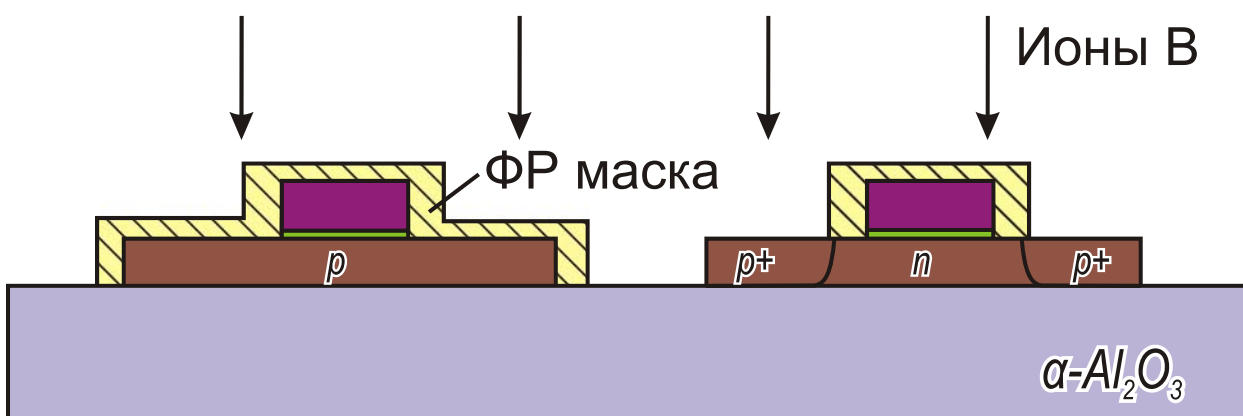
Подзатворный диэлектрик (SiO₂) толщиной 450 Å получают пирогенным окислением в атмосфере влажного кислорода при 850° С в течение 150 мин, при этом производится разгонка имплантированной примеси. На выращенный подзатворный диэлектрик при температуре 580° С наносят слой поликристаллического кремния толщиной 0,5 мкм. Затем поликристаллический кремний легируют фосфором диффузионным способом и проводят по нему фотолитографию для создания затвора транзисторов и поликремниевых шин.

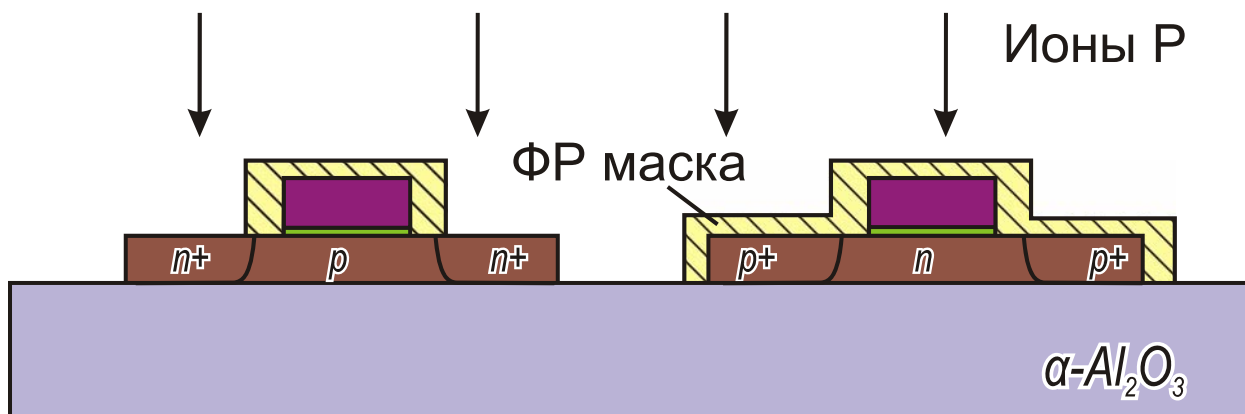




5. Формирование сильнолегированных областей стоков и истоков n и p-канальных транзисторов

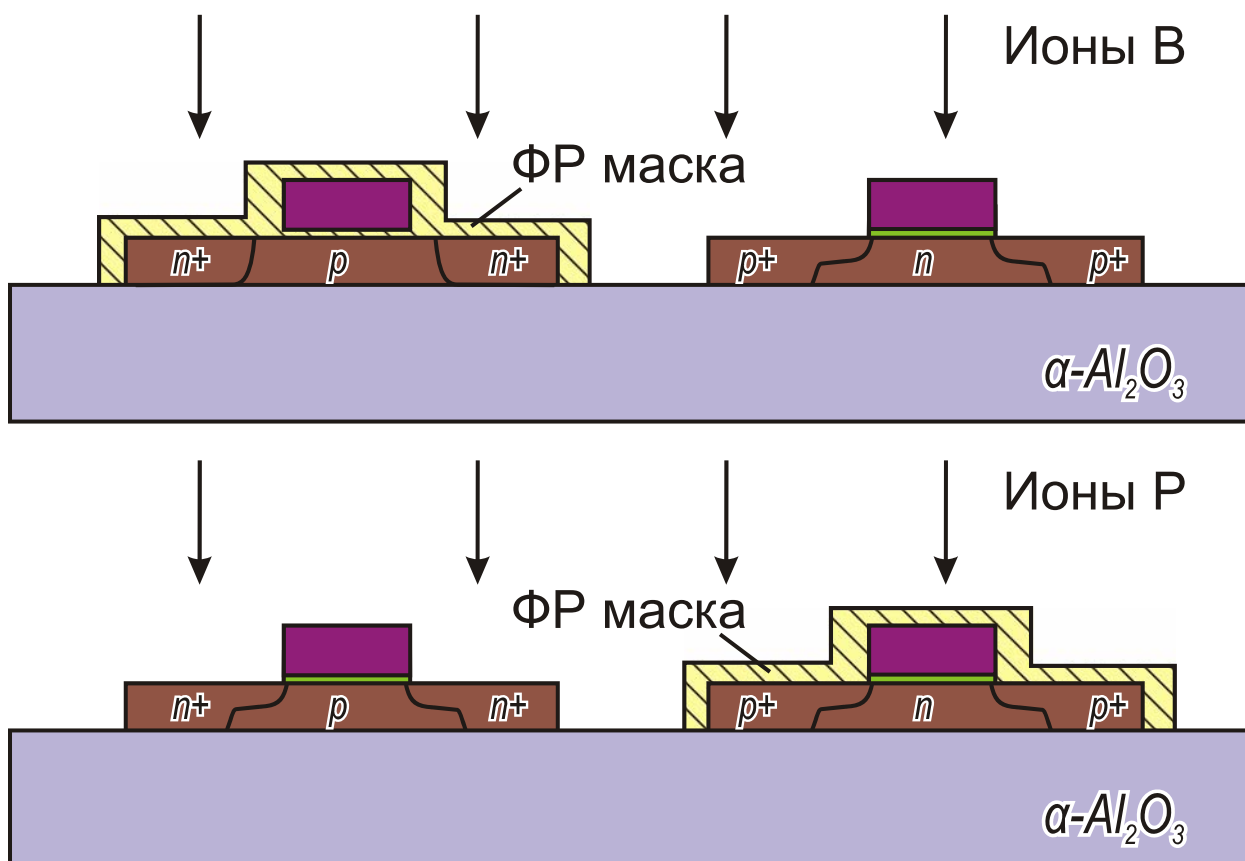
На пластину напыляют слой Al толщиной 0,6 мкм и проводят по нему 4-ю фотолитографию таким образом, чтобы над поликремниевыми затворами образовалась алюминиевая надстройка, перекрывающая поликремниевый затвор на 2 мкм. Затем на пластину наносят фоторезист и проводят по нему 5-ю фотолитографию, в результате которой фоторезист защищает, как маска, n-канальные транзисторы и проводят ионную имплантацию бора дозой 500 мкКул/см². После удаления фоторезиста делают 6-ю фотолитографию, защищая p-канальные транзисторы. Проводят ионную имплантацию фосфора дозой 1000 мкКул/см².





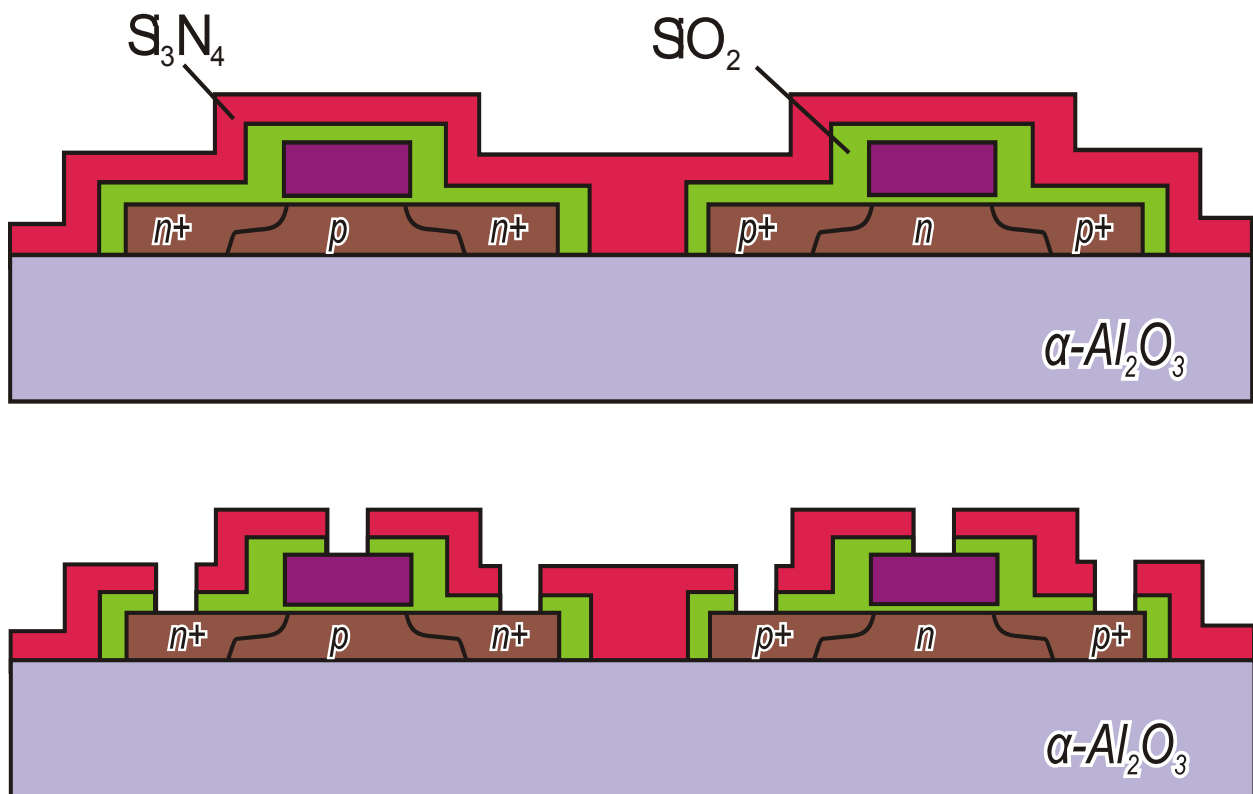
6. Формирование слаболегированных областей стоков и истоков n и p-канальных транзисторов

Закрывают маской фоторезиста n-канальные транзисторы и проводят ионную имплантацию бора дозой 30 мкКул/см². После удаления фоторезиста проводят фотолитографию, защищая p-канальные транзисторы. Затем проводят полное легирование ионами фосфора с дозой 30 мкКул/см². Удаляют фоторезист и проводят разгонку бора и фосфора при 950° С в течение 15 минут.



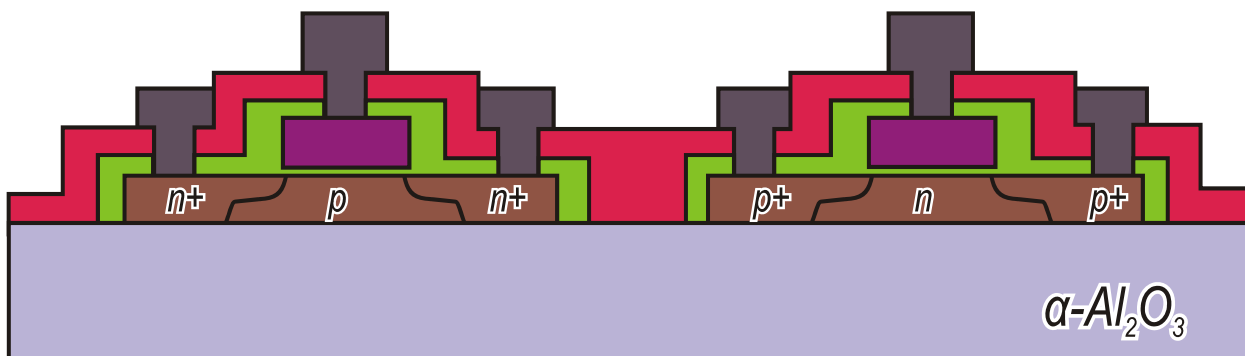
7. Формирование межслойной изоляции и контактных окон

На поверхность пластины последовательно наносят слои SiO_2 и Si_3N_4 толщиной 0,2 и 0,15 мкм соответственно. С помощью 9-ой фотолитографии в нанесенных слоях вскрывают контактные окна к тем областям, где была предварительно проведена ионная имплантация бора и фосфора большими дозами.



8. Формирование контактов, металлизированной разводки и контактных площадок

Напыляют слой алюминия (1,0–1,2 мкм), который образует электрический контакт с кремнием через вскрытые контактные окна, и проводят 10-ю фотолитографию по алюминию. Фоторезист удаляют и проводят вжигание Al в формирующем газе при температуре 450°C



На поверхность пластин наносят пленку фосфорно-силикатного стекла толщиной 0,8 мкм и с помощью 11-ой фотолитографии вскрывают в пленке окна к контактными площадкам микросхемы. Затем фоторезист удаляют.

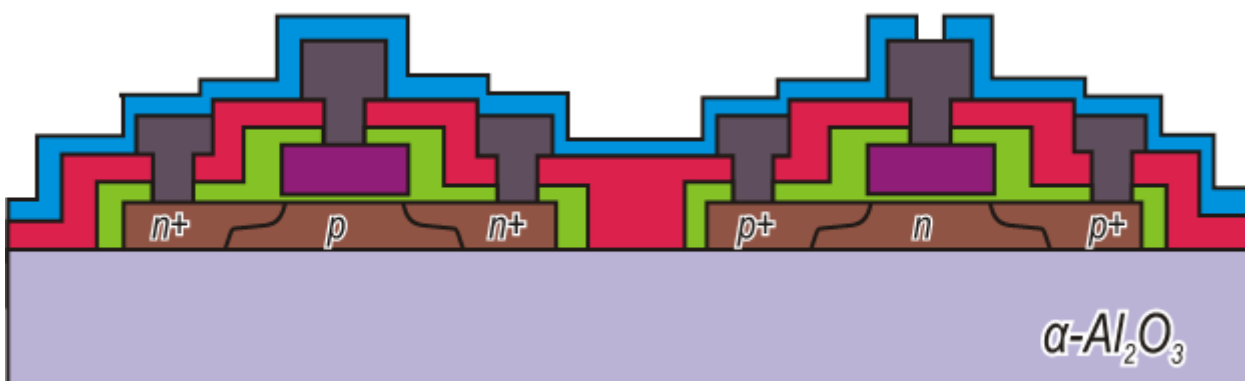


Рис. 2.15. Технологическая схема изготовления МОП-транзисторов на КНС.

Затем фоторезист удаляют и кристаллы передают на сборку.

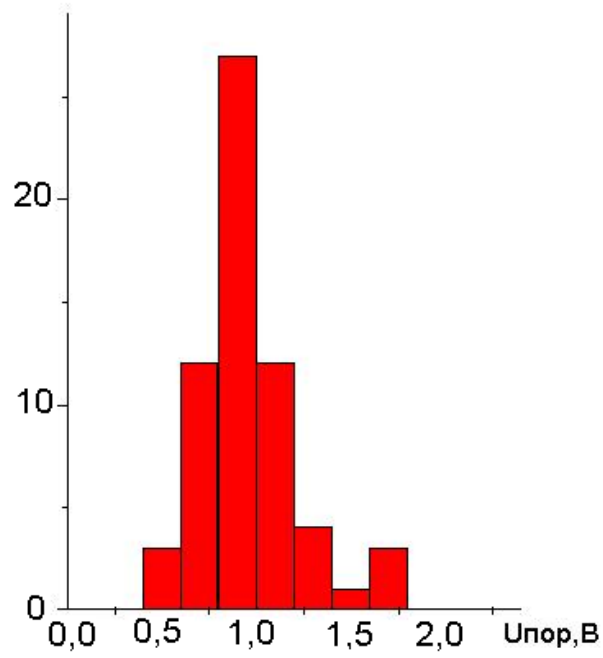


Рис. 2.17. Гистограмма разброса пороговых напряжений p-канальных транзисторов.

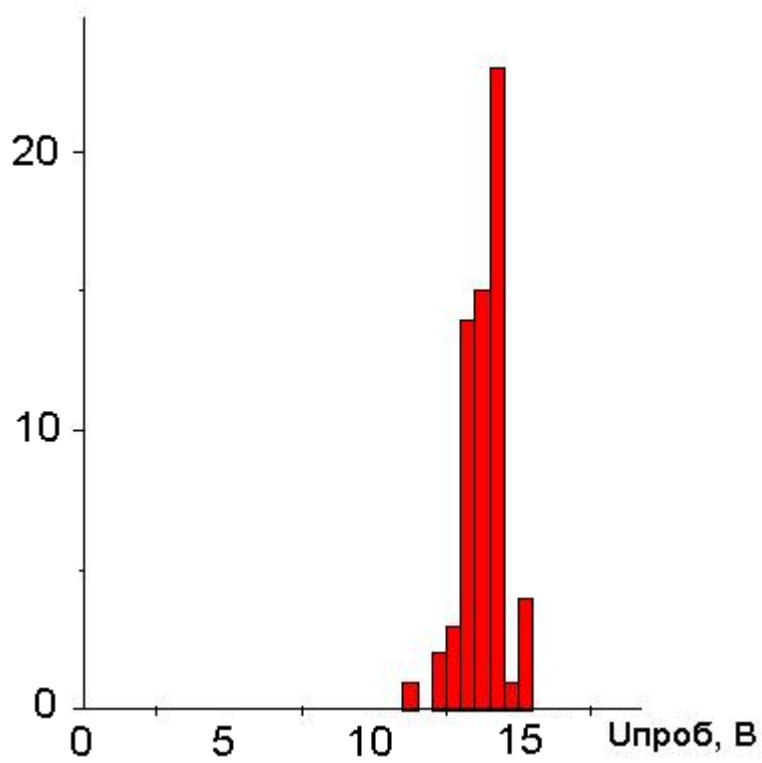


Рис. 2.18. Гистограмма разброса пробивных напряжений n-канальных транзисторов.

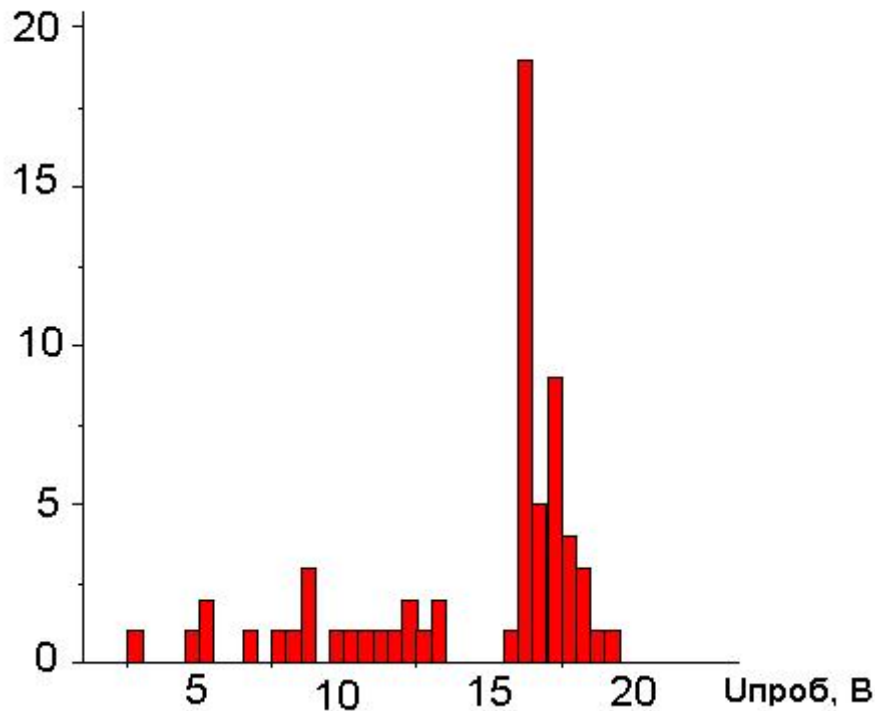


Рис. 2.19. Гистограмма разброса пробивных напряжений p-канальных транзисторов.

Как видно из гистограмм, технологический процесс, в основном, обеспечивает требуемый диапазон значений пороговых напряжений для n-канального транзистора $1.2\text{В} < U_{\text{пор}n} < 1.7\text{В}$, для p-канального транзистора $0.7\text{В} < U_{\text{пор}p} < 1.2\text{В}$. Однако для обеспечения большей воспроизводимости результата с учетом отклонений реального процесса необходимо проводить более точный расчет порогового напряжения с анализом уровня концентрации примеси в канале транзистора.

Из выражения для порогового напряжения n- канального транзистора

$$V_{\text{пор}n} = 2\Psi_B + \Phi_{\text{ms}} - \frac{d_{\text{ок}} * Q_{\text{SS}}}{\epsilon_{\text{ок}} * \epsilon_0} + \frac{d_{\text{ок}}}{\epsilon_{\text{ок}} * \epsilon_0} * \sqrt{4 * \epsilon_{\text{Si}} * \epsilon_0 * q * N_A |\Psi_B|}; \quad (2.2)$$

видно, что на значение $V_{\text{пор}}$ в большей степени влияют три параметра, а именно: концентрация примеси в области канала (N_A), толщина подзатворного диэлектрика ($d_{\text{ок}}$) и поверхностный заряд на границе раздела подзатворный диэлектрик – кремний и Q_{SS} .

Если взять предельное значение концентрации для n- канального транзистора $N_A = 1 * 10^{17} \text{ см}^{-3}$, значения других параметров:

$$d_{ок}=420 \text{ \AA}, \quad Q_{SS} = 1,6 * 10^{-8} \text{ Кл/см}^2, \quad \epsilon_{ок} * \epsilon_0 = 4 * 8,9 * 10^{-14} \text{ Ф/см},$$

$$\epsilon_{si} * \epsilon_0 = 12 * 8,9 * 10^{-14} \text{ Ф/см}, \quad q = 1,6 * 10^{-19} \text{ Кл},$$

то в результате расчета по формуле (2.2) получим пороговое напряжение:

$$V_{пор} = 1,62 \text{ В.}$$

Приведем аналогичные расчеты $U_{пор}$ для р-канального МОП транзистора.

Если взять предельное значение концентрации примеси $N_D = 2 * 10^{14} \text{ см}^3$ и толщину n-пленки кремния $t_n = 0,6 * 10^{-4} \text{ см}$, то слагаемые в формуле для порогового напряжения р-канального транзистора.

$$V_{порр} = 2\Psi_B - \Phi_{ms} + \frac{d_{ок} * Q_{SS}}{\epsilon_{ок} * \epsilon_0} + \frac{d_{ок}}{\epsilon_{ок} * \epsilon_0} * q * N_D * t_n, \quad (2.3)$$

будут иметь следующие значения:

$$\Psi_B = 2 \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = 0,5 \text{ В}$$

$$\Phi_{ms} = -0,55 + |\Psi_B| = -0,3 \text{ В}$$

$$\frac{d_{ок} * Q_{SS}}{\epsilon \epsilon_{ок}} = 0,19 \text{ В}$$

$$\frac{d_{ок} * q * N_D * t_n}{\epsilon \epsilon_{ок}} = 0,03 \text{ В}$$

В результате пороговое напряжение будет равно $V_{порр} = 1,02 \text{ В}$.

Полученные оценки значений порогового напряжения имеют важное практическое значение, в частности малым значениям $V_{пор}$, как правило, соответствуют большие утечки и малое напряжение пробоя стокового р-n перехода.

ГЛАВА 3. Технология КМОП БИС КНС с коротким каналом

Технологические проблемы транзисторов с коротким каналом достаточно исследованы для объемного кремния и в настоящее время проектные нормы, реализуемые на производственных линиях при изготовлении коммерческих изделий за рубежом, составляют менее 0.09-0.065 мкм. Значительные отличия и многие особенности поведения структур КНС в диапазоне температур, различие в коэффициентах диффузии легирующих примесей в кремнии и КНС, различное структурное совершенство кремния, более низкая подвижность носителей и др., не позволяют автоматически переносить и использовать технологические наработки из технологии КМОП БИС на объемном кремнии в технологический маршрут создания КМОП БИС КНС. Поэтому в производстве радиационно-стойких БИС по технологии КНС у отечественных и зарубежных фирм проектные нормы до недавнего времени составляли 2-1.5 мкм. Последние достижения фирмы Pergrine в технологии КНС развеяли пессимизм многих разработчиков, которые не видели путей уменьшения проектных норм из-за низкого качества границы раздела гетероструктуры Al_2O_3-Si . Досконально продуманная и обоснованная последовательность технологических операций позволила специалистам фирмы получить на гексагональной структуре сапфира кубическую структуру кремния, практически без переходного слоя, без двойников и открыть новые перспективы для технологии КНС в реализации:

- цифровых схем;
- аналоговых схем;
- новых типов БИС – оптоэлектронных и СВЧ диапазона.

3.1. Короткоканальные эффекты в КМОП КНС транзисторах

МОП- транзисторы на КНС имеют важные особенности по сравнению с МОП-транзисторами на объемном кремнии. Одна из особенностей МОП-транзисторов на КНС состоит в том, что область кремния между истоком и стоком (подложка) изолирована. Ее потенциал определяется потенциалом истока, отличаясь на величину напряжения прямого смещения $p-n$ -перехода при прохождении через него тока исток-подложка. Т.е. подложка находится под плавающим потенциалом.

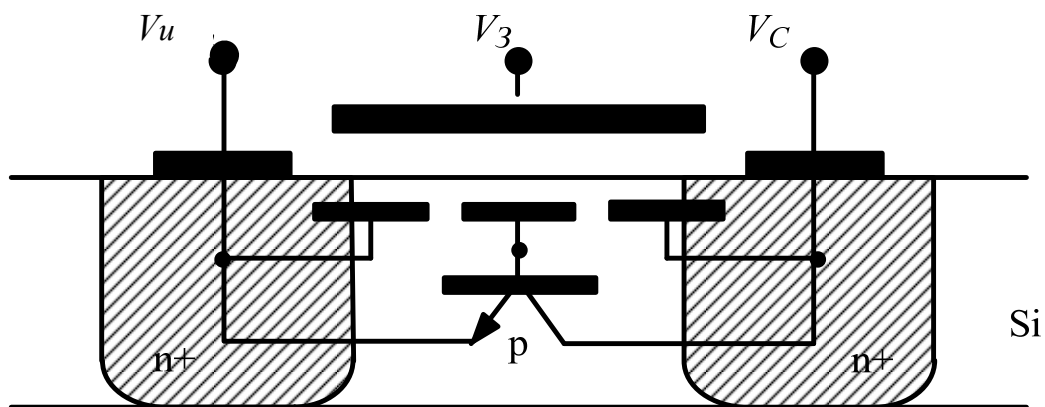


Рис. 3.1 Структура n-канального МОП-транзистора на КНС

Структура сток-подложка-исток работает как биполярный транзистор с оборванной базой, включенный параллельно МОП-транзистору. Суммарный ток, проходящий через него, прямо пропорционален коэффициенту усиления в схеме с общим эмиттером. Так как время жизни в КНС структурах мало, то для достаточно больших длин канала влиянием этого механизма можно пренебречь. Однако с уменьшением длины канала влияние биполярного транзистора усиливается, т.к. обедненный слой в подложке вблизи стока начинает уменьшать эффективную длину базы.

Коэффициент усиления по току паразитного биполярного транзистора при этом может достигнуть нескольких десятков, даже при малом времени жизни ($\tau=10^{-9}$ с). Это приводит к сильному увеличению тока исток-подложка и, соответственно, к сдвигу потенциала необедненной части подложки.

Уменьшение толщины подложки также приводит к усилению действия биполярного транзистора и к возрастанию количества подвижных носителей

в канале за счет ограничения толщины обедненного слоя . В обычном случае , заряд обедненного слоя определяется выражением :

$$Q_{об} = 2 * q * \epsilon_{Si} * \epsilon_0 * Na * (V_c + \psi_b)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Однако, если толщина подложки меньше, чем толщина обедненного слоя, то в этом случае заряд обедненного слоя $Q_{об}$ может быть больше , чем заряд ионизированных акцепторов:

$$Q = q * Na * t_n, \quad (3.2)$$

где: t_n - толщина подложки.

Таким образом, в КНС транзисторах существуют дополнительные компоненты тока стока, обусловленные разными причинами :

- ✓ Сдвигом потенциала подложки из-за эмитерного тока паразитного биполярного транзистора , протекающего через переход исток-подложка ;
- ✓ Увеличением проводимости канала из-за уменьшения толщины слоя подложки транзистора.

Пороговое напряжение транзисторов на КНС так же несколько отличается от порогового напряжения транзисторов на объемном кремнии по двум причинам.

Пороговое напряжение у МОП транзистора на КНС уменьшается на величину:

$$\Delta V_{пор} = d_{ок} * (\epsilon_0 * \epsilon_{ок})^{-1} * (q * Na * t_n - \sqrt{4 * \epsilon_{Si} * \epsilon_0 * q * Na * |\Psi_s|}) \quad (3.3)$$

Для транзистора с концентрацией акцепторов в подложке $Na = 1 * 10^{15}$ см⁻³ и толщиной подложки $t_n = 0.5$ мкм уменьшение порогового напряжения КНС транзистора составляет 0.18 В.

Структура КНС транзистора фактически состоит из 2-х параллельно включенных МОП-транзисторов (см. рис. 2.10). Один из них T_1 сформирован на верхней плоскости островка с ориентацией <100>, другой T_2 - на боковых гранях островков, где ориентация <111>.

Так как поверхностный заряд Q_{ss} на границе раздела кремний - подзатворный диэлектрик зависит от ориентации поверхности кремния в приблизительном соотношении $\langle 111 \rangle : \langle 100 \rangle = 3:1$, то у транзистора T_2 с затвором, расположенным на боковых гранях, величина $V_{пор}$ будет больше у р-канальных и меньше у n-канальных транзисторов, чем у соответствующих транзисторов T_1 расположенных на плоской поверхности кремния. В среднем это отличие может составлять 0.3-0.5 В.

Уменьшение длины канала для конкретного технологического процесса возможно лишь до определенных границ, за пределами которых резко уменьшаются пробивное напряжение стоков, пороговое напряжение и падает подвижность носителей заряда в канале транзистора и, кроме того, увеличивается ток утечки стокового перехода.

Эффекты, происходящие в коротко-канальном транзисторе, можно разделить на две основные группы. Первая группа эффектов связана с высокой напряженностью электрического поля в канале и включает уменьшение подвижности носителей, насыщение дрейфовой скорости и увеличение кинетической энергии электронов (эффект “горячих” электронов). Вторая группа эффектов вызвана тем, что в коротком канале уже нельзя пренебречь поперечной (вертикальной) составляющей электрического поля. Это приводит к тому, что ток стока в результате пробоя не насыщается, появляется зависимость порогового напряжения от длины канала.

Пороговое напряжение

Как отмечалось выше, пороговое напряжение определяется по величине заряда, индуцированного напряжением на затворе. Этот заряд состоит из заряда свободных носителей в канале и из объемного встроенного заряда в обедненном слое. В действительности необходимо так же учитывать влияние на $V_{пор}$ объемного заряда в р-n переходах, образованных областями стока и истока.

Когда транзистор находится в закрытом состоянии, потенциальный барьер разделяет область стока и истока.

С уменьшением длины канала ($L \rightarrow L_s$) области пространственного заряда сближаются и могут, в конце концов, сомкнуться. В результате потенциальный барьер между ними снижается и, соответственно, снижается пороговое напряжение. Новое пороговое напряжение $V_{пор\ s}$ для прибора с коротким каналом будет меньше $V_{пор}$ транзистора с длинным каналом на величину:

$$\Delta V_{пор} = V_{пор} - V_{пор\ s}$$

Таким образом, пороговое напряжение уменьшается по мере уменьшения длины канала. Кроме того, воздействие объемного заряда в p-n-переходах на $V_{пор}$ возрастает с увеличением глубины областей стока и истока. Поэтому для уменьшения влияния этого эффекта стремятся сформировать мелкие диффузионные области стока и истока.

Режим токов в области порогового напряжения. Ток утечки

Если напряжение затвора меньше порогового напряжения, у поверхности образуется слой со слабой инверсией, и через МОП-транзистор протекает небольшой ток стока. В этом случае структура исток-канал-сток эквивалентна p-n-p (или p-n-p) - транзистору, и ток стока определяется диффузией носителей и экспоненциально зависит от напряжения затвора. Этот ток протекает не только в открытом, но и в закрытом состоянии транзистора, поэтому он называется током утечки.

В транзисторах с длинным каналом ток утечки не зависит от напряжения стока в области $V_{си} > 3 k T / q$, а определяется только напряжением затвора. В приборах же с коротким каналом проявляется зависимость тока утечки от напряжения на стоке. При одинаковом напряжении на затворе уменьшение длины канала приводит к увеличению тока утечки и увеличению его зависимости от напряжения стока. Так как пороговое напряжение есть напряжение затвора, при котором ток стока превышает заданную пороговую величину (обычно 0,01мА), то у МОП-

транзисторов с коротким каналом пороговое напряжение $V_{пор}$ связано с длиной канала.

В транзисторе с коротким каналом напряжение стока изменяет распределение потенциала перед истоком, и ток от истока к стоку протекает уже не через канал, а по объему полупроводника. Величина этого тока зависит также от концентрации примеси в подложке и от глубин диффузии областей истока и стока. Следовательно, от этих параметров зависит и пороговое напряжение в приборах с коротким каналом.

Для предотвращения эффекта короткого канала необходимо увеличивать концентрацию примеси в подложке.

Влияние горячих носителей

Для питания БИС используются стандартные постоянные напряжения, поэтому при уменьшении длины канала напряженность электрического поля в канале будет возрастать, соответственно будет возрастать кинетическая энергия носителей и в канале появятся, так называемые, горячие электроны (или дырки). Появление горячих носителей сопровождается уменьшением крутизны ВАХ транзистора и изменением порогового напряжения. Это объясняется тем, что носители высокой энергии преодолевают потенциальный барьер между кремнием и оксидным слоем, инжектируются в этот слой, захватываются дефектами оксидного слоя и повышают его объемный заряд. Кроме того, происходит увеличение количества горячих носителей на поверхностных уровнях на границе раздела Si - SiO₂. Поэтому эффекты, связанные с наличием горячих носителей в канале, препятствуют уменьшению длины канала МОП-транзисторов менее 1 мкм.

Эффект горячих электронов в КНС МОП-транзисторах

При достаточно высоких значениях напряжения на стоке $V_{СИ}$ характер зависимости выходных характеристик $I_C = f(V_{СИ})$ для КНС МОП-

транзистора существенно отличается от зависимости для обычного МОП-транзистора на объемном кремнии (см. рис. 3.2)

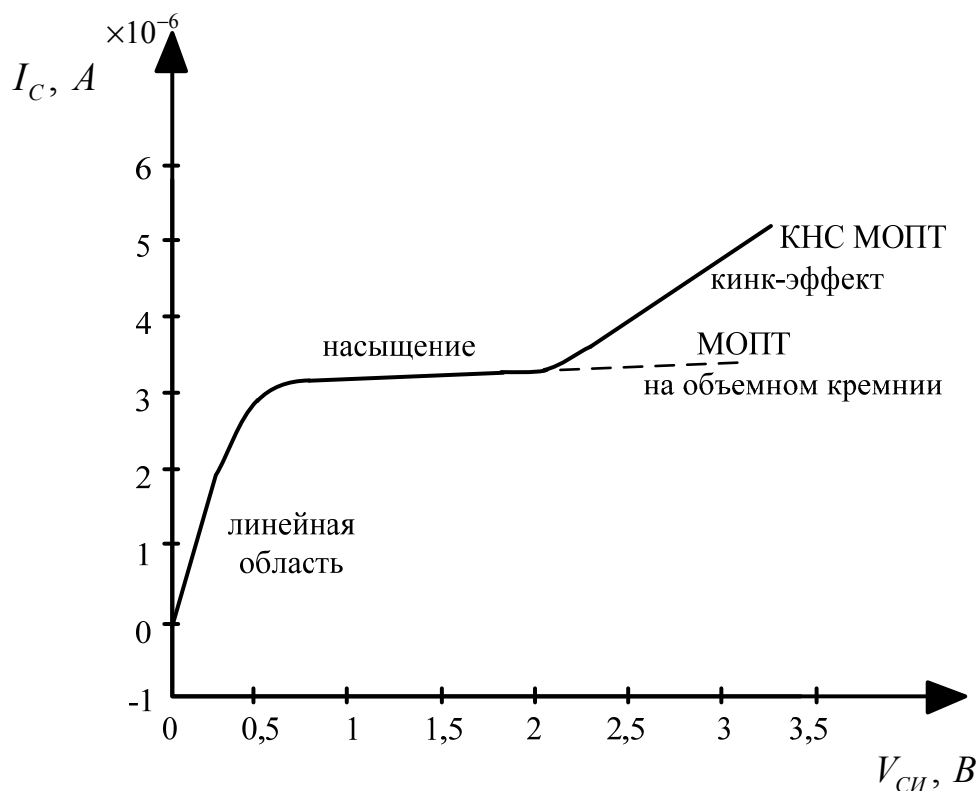


Рис. 3.2. Сравнение выходных ВАХ для МОП-транзисторов со структурой КНС и на объемном кремнии ($L/W = 1,2 \times 5$ мкм, $V_{ЗИ} = 1,0$ В)

При повышении определенного значения $V_{СИ}$ (в нашем случае 2,0-2,5 В) ток стока I_C начинает резко возрастать в структуре КНС МОПТ. Данный эффект, наблюдаемый на выходных ВАХ, получил название «кинк-эффекта». Эти особенности объясняются действием эффекта горячих электронов в структуре КНС МОПТ.

При увеличении напряжения на стоке, объемная область стокового р-п перехода L_{p-n_c} расширяется в область канала и вытесняет свободные электроны к границе с истоком (см. рис. 3.3).

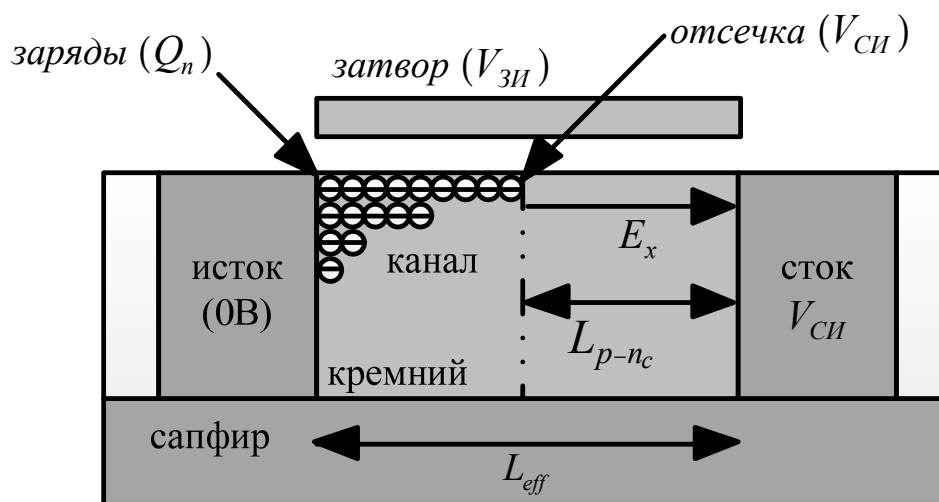


Рис. 3.3. Иллюстрация образования обедненной области стока L_{p-n_c} , укорочения канала и вытеснения электронов к области истока

Там скапливается заряд Q_n , который способствует увеличению электрического поля E_x между каналом и стоком. Как только значение поля E_x превышает критическое значение $E_{кр}$, электроны разгоняются до такой степени, что вызывают в обедненной области процесс лавинного размножения пар электрон – дырка (см. рис. 3.4).

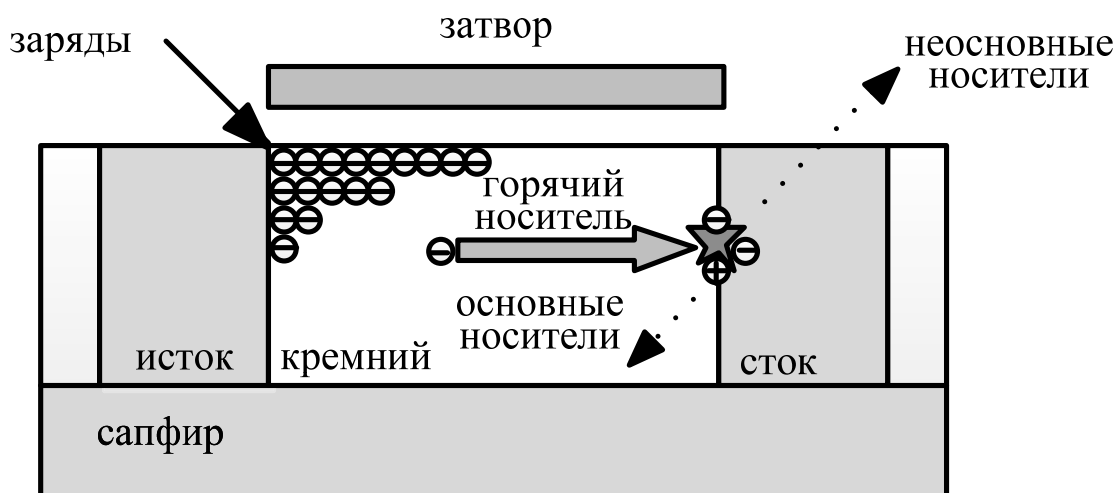


Рис. 3.4. Генерация горячих носителей в канале, их лавинное умножение на границе со стоком, вызывающее кинк-эффект

Электроны движутся в сторону стока и увеличивают ток стока, а дырки текут в подложку, увеличивая ее положительный заряд, что влияет на величину порогового напряжения $V_{пор}$.

Замечено, что кинк-эффект у р-канальных МОП-транзисторов проявляется гораздо сильнее, чем у n-канальных. Это объясняется тем, что дефекты структуры КНС, как правило, увеличивают подвижность дырок и уменьшают подвижность электронов. На рис. 3.5 приведены выходные ВАХ для n- и р- МОП-транзисторов с размерами канала $L/W = 1,2 \times 5 \text{ мкм}$, изготовленных по стандартной технологии компании Peregrine Semiconductors.

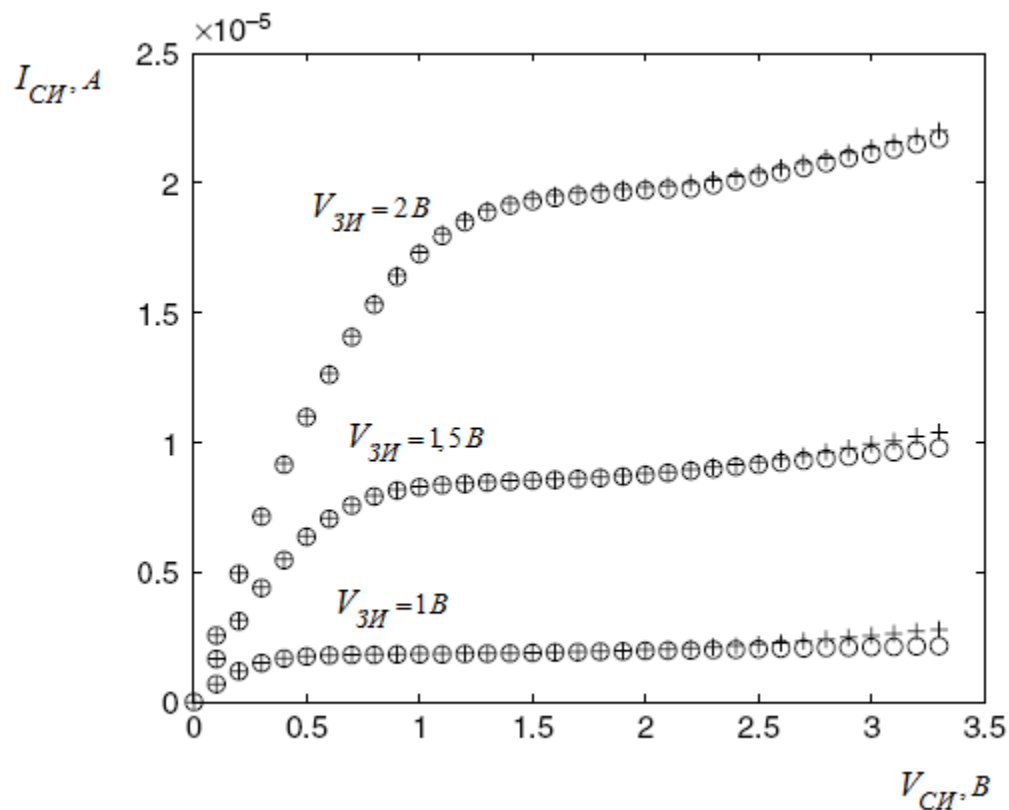


Рис. 3.6. Слабый кинк-эффект на ВАХ $1,2 \times 5 \text{ мкм}$ КНС n-МОП транзистора с контактом на подложке (кружки) и без контакта (плюсы).

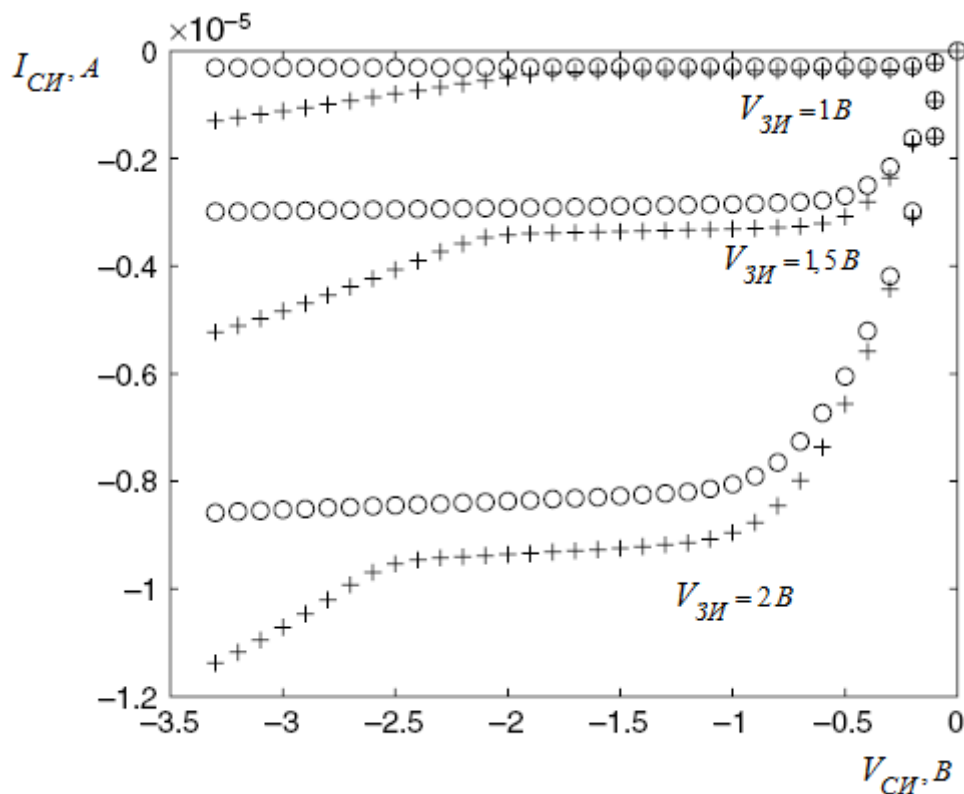


Рис. 3.7. Сильный кин-эффект на ВАХ $1,2 \times 5$ мкм КНС р-МОП транзистора с контактом на подложке (кружки) и без контакта (плюсы).

Из рис. 3.6 и 3.7 видно, что наличие омического контакта к подложке практически исключает кинк-эффект. Заметим, что действие контакта гораздо более эффективно для р-канальных МОП-транзисторов, чем для п-канальных.

Подвижность носителей в канале

Глубина канала (толщина инверсионного слоя) МОП-транзисторов очень мала и обычно лежит в пределах 5,0 - 10,0 нм. Поэтому подвижность носителей в канале отличается от подвижности в объеме полупроводника. Обычно подвижность в канале составляет 1/2 - 1/3 от объемной подвижности и зависит от напряжения затвора (т.е. от поперечной составляющей E_y поля в канале) и от концентрации электронов в канале. Чем больше напряжение затвора, тем больше электрическое поле и меньше подвижность носителей.

Подвижность носителей в канале уменьшается также при возрастании продольной составляющей E_x поля в канале. При этом дрейфовая скорость

входит в режим насыщения. Эффект насыщения дрейфовой скорости оказывает влияние на статические характеристики МОП- транзистора, в частности, ток насыщения стока становится пропорционален уже не квадрату, а первой степени напряжения затвора $V_з$:

$$I_{с\text{нас}} = W C_{ок} (V_з - V_{пор}) V_s, \quad (3.6)$$

где V_s - эффективная дрейфовая скорость насыщения.

Критическая длина канала, при которой начинаются коротко-канальные эффекты, может быть оценена из выражения:

$$L_{кр} = 0.86 * [x_j * d_{ок} (W_c + W_u)^2]^{1/3} \quad (3.7)$$

где x_j - глубина p-n-перехода,

W_c . W_u - ширины областей пространственного заряда у стока и истока.

Чем меньше концентрация примеси в подложке, тем больше величина $L_{кр}$. Поэтому для предотвращения эффекта короткого канала прежде всего увеличивают концентрацию примеси в подложке.

Расчет $L_{кр}$ для n- канального транзистора и типовой концентрации примеси в подложке дает:

$$L_{кр} = 1,5 \text{ мкм.}$$

Расчет $L_{кр}$ для p- канального транзистора и типовой концентрации примеси в подложке дает:

$$L_{кр} = 3,5 \text{ мкм.}$$

Устранения или, по крайней мере, смягчения эффекта короткого канала достигают как технологическими, так и конструктивными путями.

Для сохранения работоспособности МОП- транзистора с малой длиной канала прибегают к

- ✓ увеличению концентрации примеси в подзатворной области (подложке),
- ✓ снижению толщины подзатворного диэлектрика,
- ✓ уменьшению напряжения на стоке транзистора.

Для устранения инжекции горячих электронов из стока в подзатворный диэлектрик вблизи стокового перехода между сильнолегированной областью

стока и областью канала размещают переходную более слаболегированную область, так называемую область достройки («спейсер»).

При проектировании КМОП БИС КНС специалисты фирмы Peregrine руководствуются дополнительным правилом, которое легло в основу проектирования высоконадежных радиационно-стойких БИС.

Это правило ограничивает предельные размеры канала в зависимости от толщины гетероэпитаксиального слоя.

Согласно принятым ограничениям соотношение L/δ должно быть $> 5-10$, поэтому для обеспечения размеров канала транзистора менее 1 мкм, фирма более 20 лет работала над проблемой создания структур КНС с толщиной слоя кремния равной 0.1 мкм.

Учитывая известные ограничения и наличие выпускаемых отечественной промышленностью структур КНС с толщиной слоя кремний 0.3 мкм, рассмотрены пути реализации короткоканальных КМОП КНС транзисторов.

3.2 Поиск путей совершенствования технологического маршрута с помощью методов математического моделирования

Анализ базового технологического маршрута (см. гл. 2) и особенностей короткоканальных транзисторов показал, что необходима модернизация технологического маршрута и конструкции транзистора, для чего соответственно требуется детальный анализ ключевых операций технологического маршрута, определяющих выходные характеристики транзисторов. Поиск компромиссных решений с ограниченными возможностями проведения детерминистических исследований не возможен без привлечения современных методов технологического моделирования. Программное обеспечение для технологического моделирования должно содержать точные математические модели физических процессов, таких как ионная имплантация, диффузия, окисление, осаждение функциональных технологических слоев и т.п. Для моделирования электрических

характеристик элементной базы, вольтамперных характеристик программное обеспечение должно содержать точные математические модели для расчета таких физических величин, как генерация-рекомбинация, подвижность, дрейф носителей и т.д. При моделировании учитывались особенности структур “кремний на сапфире”: более низкая подвижность, состояние на границе раздела кремний-сапфир, “плавающая подложка” приборов, а также информация и результаты отечественных и зарубежных исследователей [28-35]. Из аппаратных средств предпочтение было отдано системе приборно-технологического моделирования TCAD фирмы Synopsys. Краткое описание общей структуры и возможностей пакета TCAD приведено в 5.3.

Здесь мы рассмотрим результаты моделирования основных этапов базового технологического маршрута изготовления 2мкм – КМОП БИС на КНС – структурах с толщиной слоя кремния 0,3мкм, а также результаты анализа физической структуры n- и p- канальных МОП - транзисторов и их электрических характеристик. Для технологов эти результаты явились чрезвычайно полезной дополнительной информацией, на основании которой данный технологический маршрут был практически отработан и внедрен в реальное производство [36-39].

Рис. 2.15 главы 2 иллюстрирует процесс формирования КМОП – структуры на различных этапах технологического маршрута, начиная с исходной КНС – пластины и кончая финишной структурой КМОП – прибора. На рис. 3.8 –3.10 приведены графики распределения легирующих примесей в важнейших сечениях окончательной КМОП – структуры: в областях канала, стока, спейсера и др. Эти и другие результаты технологического моделирования позволили сделать следующие выводы:

- ✓ предложенный технологический маршрут в целом пригоден для изготовления КМОП/КНС – структур с минимальными проектными нормами 2мкм и, при соответствующих доработках, для изготовления КМОП/КНС – структур с минимальными размерами 1,5 – 1,25 мкм (см п. 3.3);

- ✓ режимы и параметры основных операций, формирующих конечную физическую структуру КМОП – прибора, могут быть рекомендованы технологам для практического использования в условиях реального производства.

Поиск путей совершенствования технологического процесса с помощью методов математического моделирования проиллюстрируем на практическом примере коррекции температурного режима операции отжига активированной примеси после ионной имплантации областей стоков и истоков МОП – транзисторов.

В начальном варианте технологического процесса температура отжига была принята 950°C , что обеспечивало электрические параметры КМОП – структур, удовлетворяющие требованиям схемотехники, однако не обеспечивало высоких показателей по радиационной стойкости. Нами был предложен вариант разделения процесса формирования областей стоков и истоков на два этапа и снижения на втором этапе температуры с 950°C до $850^{\circ}\text{C} - 900^{\circ}\text{C}$ с целью уменьшения концентрации образующихся глубоких центров захвата и повышения радиационной стойкости. Расчеты с помощью пакета программ Synopsys TCAD дали следующие результаты. На рис. 3.8-3.10 приведены смоделированные распределения примеси n- и p- канальных МОП – транзисторов, а в табл. 3.1 – их электрические параметры, используемые в схемотехнике. Из данных табл. 3.1 видно, что по значениям пороговых напряжений, удельной крутизны и токов утечки транзисторы практически не отличаются друг от друга. На основании этих результатов было принято практическое решение – снизить температуру процесса отжига до 890°C , что позволило обеспечить требования ТУ по радиационной стойкости КМОП/КНС микросхем.

Анализ физической структуры

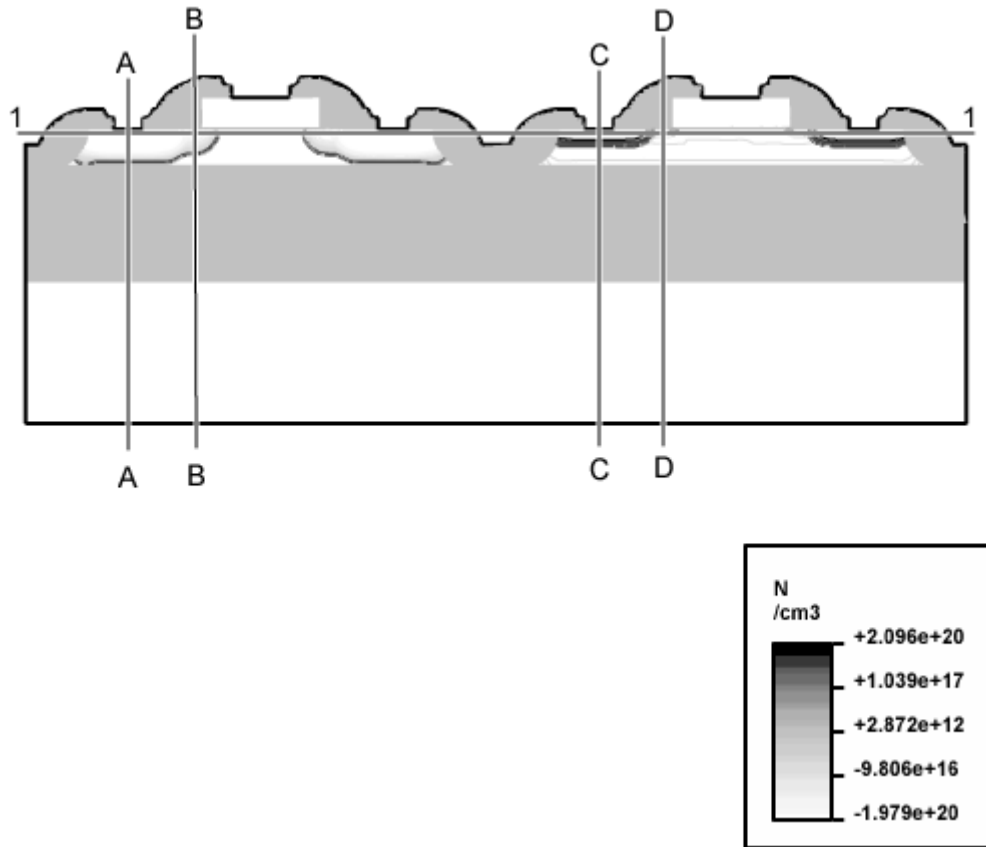


Рис. 3.8. Схема сечений КМОП-структуры

Таблица 3.1. Результаты моделирования структур- и р-канальных КНС МОП-транзисторов, изготовленных по технологическому маршруту SOS-3 с толщиной слоя 0,3 мкм.

Имплантация	Карман	E1	40keV	220keV	60keV	60keV	60keV	150keV	150keV	150keV	
		Dose1	1,88E+12	3,00E+12	1,50E+12	3,00E+12	4,50E+12	1,50E+12	3,00E+12	4,50E+12	
		E2	140keV	-	-	-	-	-	-	-	
		Dose2	1,88E+12								
	Области стока и истока	Спейсер	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV
			6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13	6,25E+13
		Основа	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV	40keV
6,25E+15			6,25E+15	6,25E+15	6,25E+15	6,25E+15	6,25E+15	6,25E+15	6,25E+15	6,25E+15	
Отжиг	Карман	Темп.	850 °C	850 °C	850 °C	850 °C	850 °C	850 °C	850 °C	850 °C	
		Время	30 min	30 min	30 min	30 min	30 min	30 min	30 min	30 min	
	Области	Темп.	890 °C	890 °C	890 °C	890 °C	890 °C	890 °C	890 °C	890 °C	
		Время	90 min	90 min	90 min	90 min	90 min	90 min	90 min	90 min	
Толщина оксида	Защита		400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	
	Подзат.		400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	400 Å	
Параметры структуры МОПТ	Подложка	Макс.	0,08	0,25	0,15	0,15	0,15	0,18	0,19	0,19	
		Конц. макс.	1,00E+17	1,10E+16	6,00E+16	1,10E+17	5,00E+17	5,00E+16	2,00E+16	1,50E+16	
		Конц. пов.	4,00E+16	6,00E+14	9,00E+15	1,70E+16	9,00E+15	1,20E+15	2,30E+15	3,40E+15	
	Области	Глубина	0,29	0,3	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	
		Конц. пов.	2,00E+20	2,00E+20	2,00E+20	2,00E+20	2,00E+20	2,00E+20	2,00E+20	2,00E+20	
	Длина	Затвор	2 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм	
		эф. кан.	1,82	1,48	1,8	1,8	1,8	1,52	1,52	1,52	

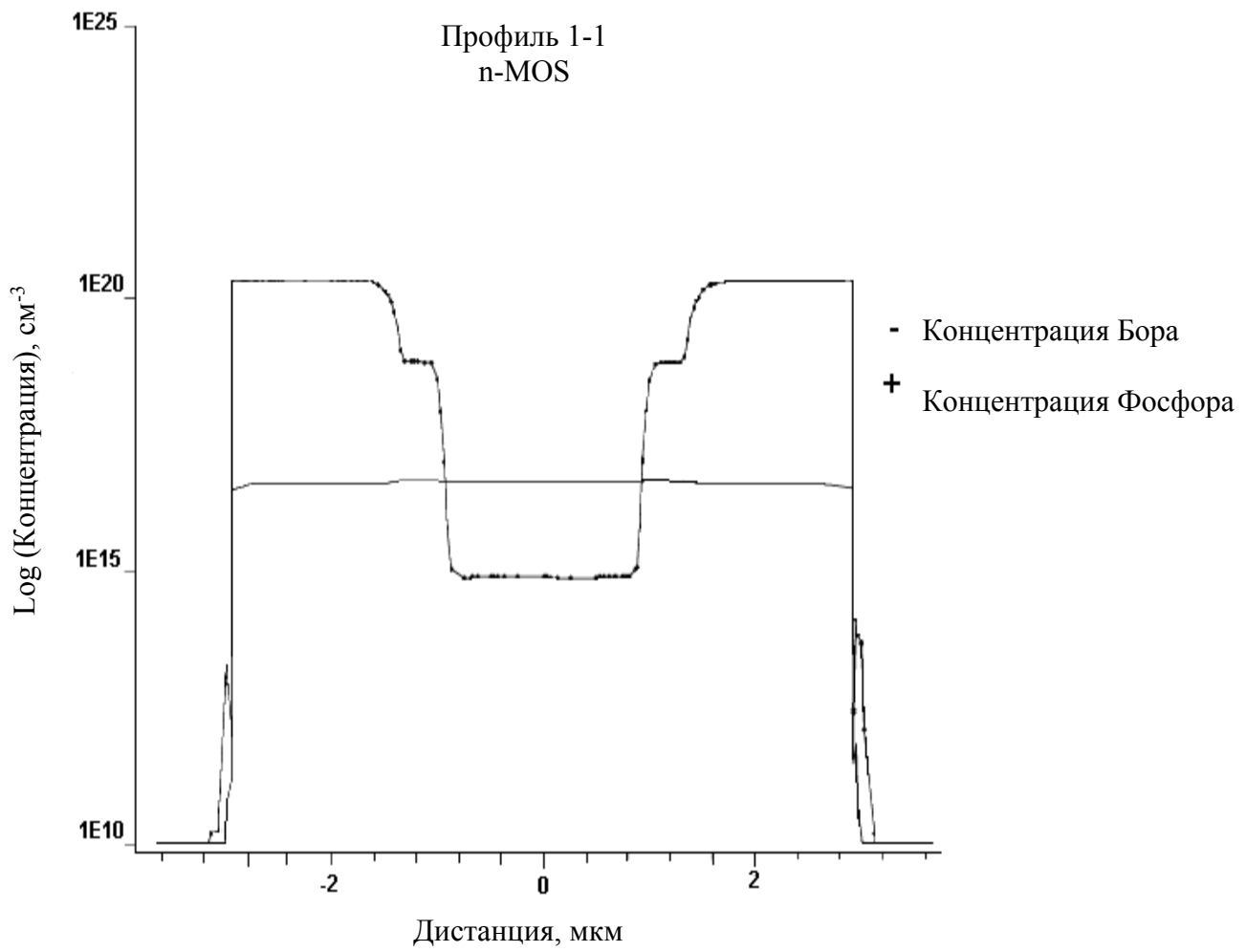


Рис. 3.9. Смоделированная двумерная картина распределения примеси в n-канальном транзисторе.

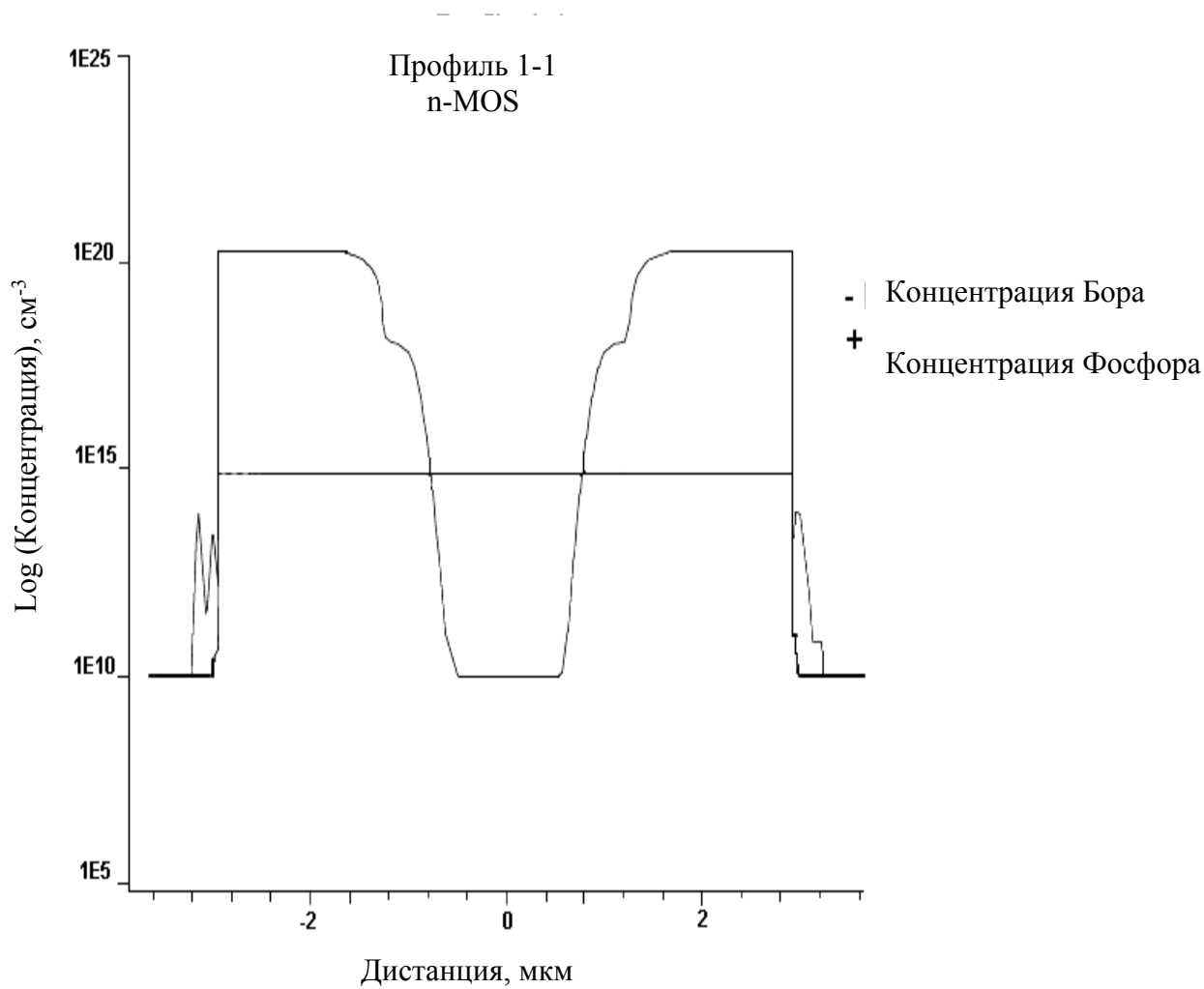


Рис. 3.10. Смоделированная двумерная картина распределения примеси в r-канальном транзисторе

3.3 Технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС (SOS-4) с длиной канала до 1.5-1.25 мкм

Предварительное технологическое моделирование и анализ расчетных электрических характеристик n- и p- канальных МОП КНС транзисторов выявили необходимость определенной корректировки как последовательности выполнения отдельных микроциклов по технологическому маршруту, так и параметров отдельных операций внутри микроциклов. В частности: -необходимость формирования областей с повышенным уровнем легирования до этапа формирования подзатворного диэлектрика и затвора;

- снижение температуры разгонки (до $\leq 900^\circ \text{C}$) легирующей примеси и создания областей достройки истоков и стоков n- и p-канальных транзисторов, а также необходимость тщательного подбора нужных концентраций примеси в областях каналов для обоих типов транзисторов. Если для n-канального транзистора корректировка уровня легирования бором, в сторону увеличения до $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ ат/см}^3$ не вызывала трудностей, то корректировка уровня легирования фосфором при легировании канала p-канального транзистора до аналогичных концентраций потребовала серьезной доработки процесса ионного легирования.

Для обеспечения требуемых уровней легирования фосфором был доработан процесс ионного легирования двухзарядными ионами фосфора с энергиями 150-240 кэВ в диапазоне доз от $3 \cdot 10^{11}$ до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Процесс ионного легирования двухзарядными ионами фосфора проводился на установке – «Лада 30» с использованием «спутников», подложек из объемного кремния, КЭФ – 4,5. Для сравнения уровней легирования целесообразно параллельно проводить имплантацию на «спутниках» ионами однозарядного фосфора. Ионная имплантация кремниевых пластин однозарядными ионами фосфора проводится с энергией 110кэВ в диапазоне доз от $2 \cdot 10^{11}$ до $1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а двухзарядными

ионами фосфора с энергией 220 – 240 кэВ в диапазоне доз от $3 \cdot 10^{11}$ до $5,4 \cdot 10^{12}$ см⁻². После имплантации пластины отжигаются в двух режимах:

1. активация примеси при температуре 950⁰С в атмосфере азота;
2. разгонка примеси при температуре 850⁰С в атмосфере азота;

Концентрация фосфора в пластинах и распределение по глубине определяется вольт – фарадным методом. В результате было определено, что имплантация двухзарядным фосфором обеспечивает получение расчетного профиля распределения ионов фосфора в кремнии и структурах КНС. При этом, требуемая концентрация фосфора на уровне $5 \cdot 10^{15}$ – $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ обеспечивается в случае использования доз двухзарядного фосфора на уровне $(3-6) \cdot 10^{11}$ см⁻².

Для более точного определения концентрации фосфора в пластинах КНС, при их легировании двухзарядными ионами фосфора, специально изготавливают МОП конденсаторы. Пластины КНС легируются в тех же режимах, что и кремневые пластины. Из вольт – амперных характеристик МОП – структур было определено, что требуемая концентрация фосфора в области канала р- канального транзистора на структурах КНС с толщиной слоя кремния 0,6 мкм обеспечивается при дозах легирования на уровне $(3-6) \cdot 10^{11}$ см⁻² и энергии 240 кэВ. В структурах КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм для получения максимума распределения примеси в середине толщины пленки кремния энергия двухзарядных ионов фосфора должна быть равной 150 кэВ, а доза ионов равной $0,6 \cdot 10^{12}$ см⁻².

Реализация двухкарманной технологии (с отдельным легированием карманов n-и р-канального транзистора) потребовала разработки и введения в технические условия КГЯД 430.107000 ТУ новой группы структур кремния на сапфире с удельным сопротивлением ~50 Ом см.

Как было отмечено ранее, фирма Peregrine при конструировании коротко-канальных транзисторов руководствуется соотношением длины

канала транзистора к толщине гетероэпитаксиального слоя кремния на сапфире как 5/1 – 10/1 (рис.3.11).

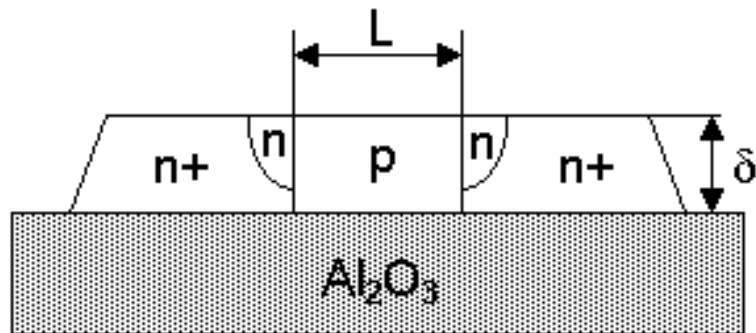


Рис. 3.11. Требования, выработанные фирмой Peregrine: отношение $\frac{L}{\delta}$ должно быть $\geq 5 \div 10$.

В таком транзисторе можно выделить три основные области, а именно: область истока, область канала и область стока. Каждая из этих областей содержит в себе конструктивные особенности, которые оказывают влияние на характеристики транзистора. Область истока определяет емкость p-n перехода исток-подложка, емкость подзатворного диэлектрика, коэффициент влияния подложки, сопротивление канала, накопление носителей заряда в подзатворном диэлектрике. Область стока определяет емкость p-n перехода сток-подложка, емкость перекрытия затвор-сток. Наибольшее влияние на параметры транзистора оказывают области канала и стока. Следовательно, чтобы влиять на параметры транзистора необходимо вносить изменения именно в эти области. Если в области канала (рис. 3.12) ввести вставку, обеспечивающую встроенный канал, то такая вставка должна изменить емкость затвор-подложки, величину коэффициента влияния подложки и сопротивление канала. Глубину такой вставки можно оценить исходя из толщины области пространственного заряда.

$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{st}\varepsilon_0\varphi_s}{qN}} \quad (3.8)$$

Исходя из этой зависимости, можно для любой концентрации легирующей примеси определить необходимую глубину вставки в канал,

которая будет достаточна для того, чтобы реализовать пороговое напряжение соответствующее концентрации в области вставки. Концентрация примеси в области вставки не должна перекомпенсировать концентрацию примеси в области канала и, в идеальном случае, должна приближаться к собственной концентрации примеси в кремнии. В результате емкость канала такого транзистора будет складываться из суммы емкостей двух областей транзистора: области со вставкой и области без вставки [40]. Расчеты показали, что при длине канала $\sim 1.5\text{ мкм}$, увеличив ширину области пространственного заряда в области вставки, можно уменьшить емкость канала до 30% от исходной величины без ослабления пробойных характеристик стокового перехода. Соответственно, уменьшение одной из самых больших паразитных емкостей транзистора приведет к существенному улучшению его частотных и энергетических показателей. Такое конструкторско-технологическое решение отмечено золотой медалью на Всемирной выставке изобретений (г. Брюссель «Эврика») [41].

Похожее решение по уменьшению влияния горячих носителей и подавлению короткоканального эффекта рассматривается в [42, Красников] при создании МОП-транзистора с асимметричными сток-истоковыми областями. Реализация такой вставки возможна с помощью использования разных материалов подзатворного диэлектрика, например SiO_2 и Si_3N_4 .

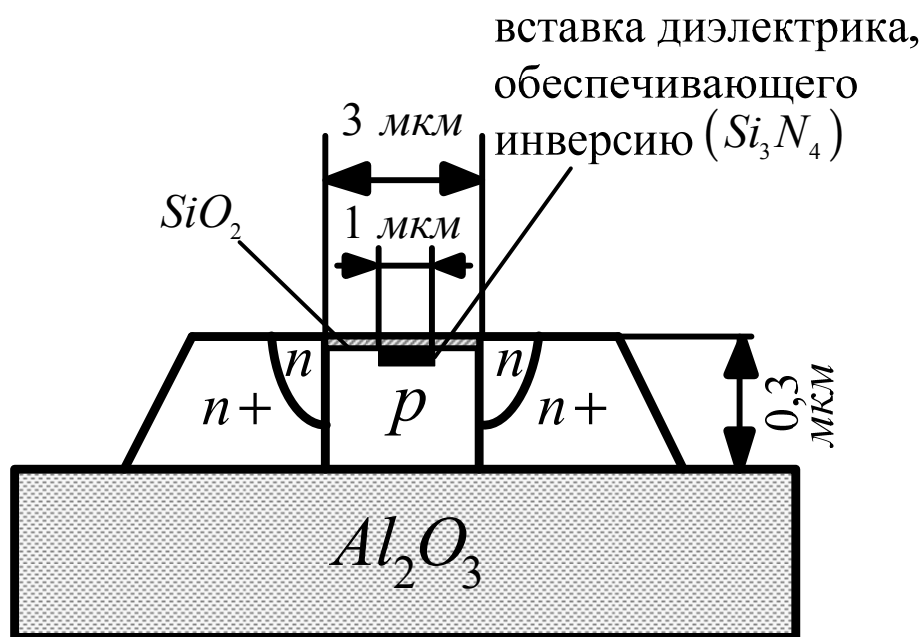


Рис. 3.12. Структура n-канального КНС МОП-транзистора со вставкой диэлектрика Si_3N_4 .

Однако, наиболее эффективным оказался метод ионного легирования, обеспечивающий прецизионное легирование необходимой примесью через маску ограниченных локальных областей р и n в области каналов транзисторов при использовании исходных высокоомных структур КНС (рис.3.13)[43,44].

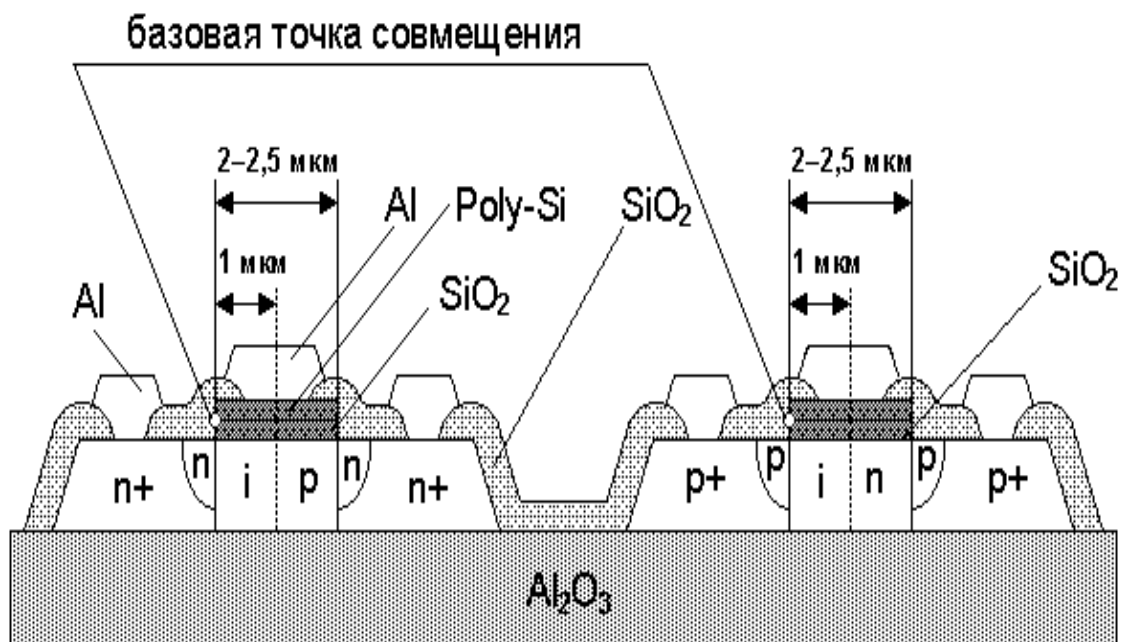


Рис. 3.13. Структура короткоканального КНС – транзистора.

Сохраняя на границе с областью истока часть области канала собственной проводимости, при использовании исходного материала структур КНС с толщиной слоя 0.3 мкм, появляется возможность уменьшить суммарную эффективную длину транзистора ($L_{эф}$) до 1 мкм, соблюдая соотношение $L/\delta = 5-10$. Реализация предложенного решения при изготовлении транзисторов с проектными нормами ~3мкм показала работоспособность таких транзисторов с заметным улучшением динамических характеристик и, что самое важное, это решение легко вписывается в разработанный технологический маршрут двухкарманной технологии для обоих типов транзисторов.

Наряду с решением конструктивно-технологических вопросов при создании короткоканального транзистора требуется уменьшение сопротивления межсоединений, в том числе уменьшение сопротивлений связи на затворном уровне. Пленки поликристаллического кремния ППК удовлетворяют практически всем требованиям за исключением удельного сопротивления, которое оказывается слишком большим, особенно в тех случаях, когда необходимо для уменьшения рельефности поверхности БИС снижать толщину пленок поликремния. Разработчики БИС стараются сохранить преимущества поликремниевых затворов и шунтировать их для уменьшения сопротивления тугоплавкими металлами или их силицидами. Уменьшение толщины поликремния до 0.3мкм может создать трудности при последующем легировании этого слоя без подлегирования подзатворного диэлектрика и области канала. В таких случаях легирование поликристаллических пленок кремния проводят в момент их осаждения. На рис (3.14 – 3.15) приведены зависимости основных характеристики осаждаемых слоев поликремния от параметров процесса: температуры, соотношения основных реагентов силана и фосфина.

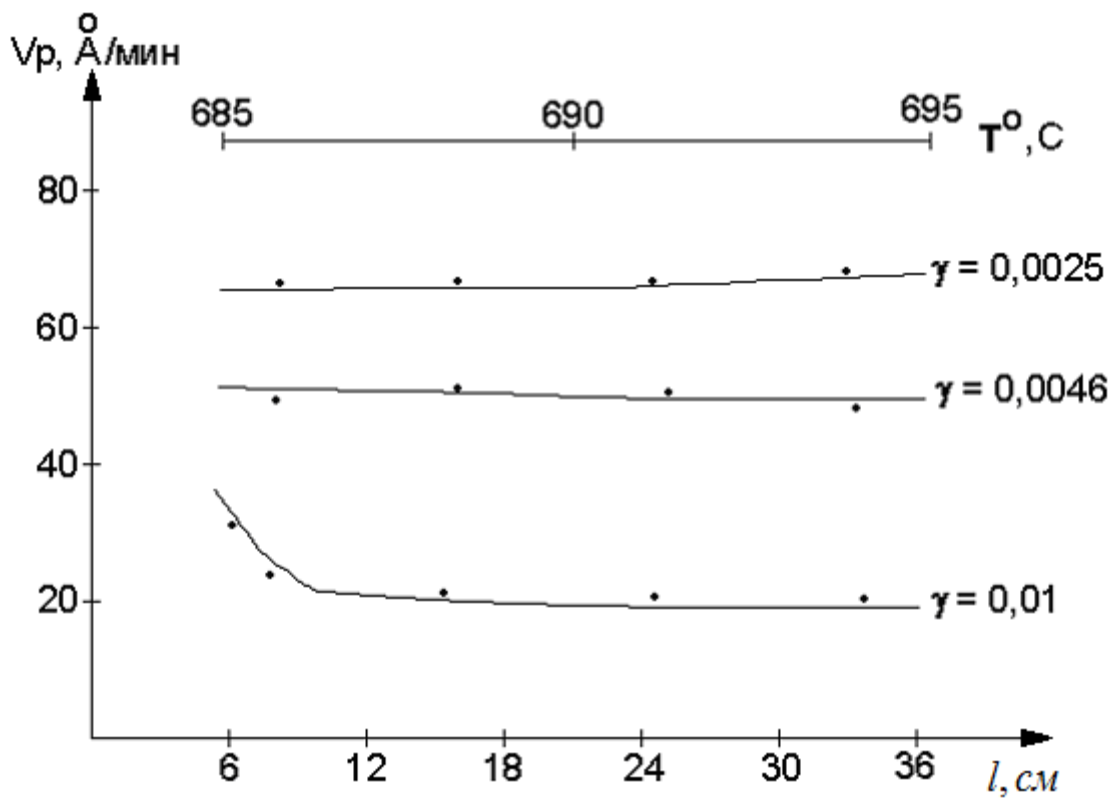


Рис. 3.14. Изменение скорости роста легированного поликремния по длине зоны осаждения

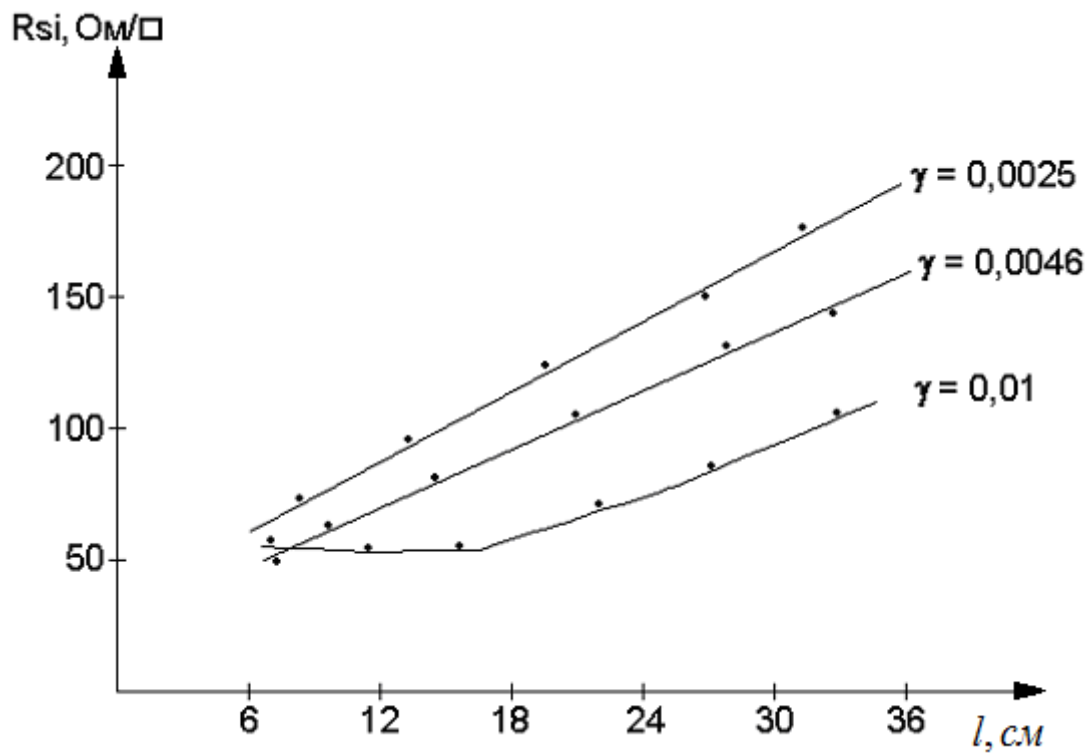


Рис. 3.15. Изменение сопротивления легированного поликремния по длине зоны осаждения

Для уменьшения влияния коэффициента γ на характеристики процесса используют распределенную подачу реагентов по длине зоны. Радикальное изменение по однородности параметров величины скорости роста и сопротивления дало использование 100% силана при $\gamma = 0.0023$ (см. рис 3.16-3.17).

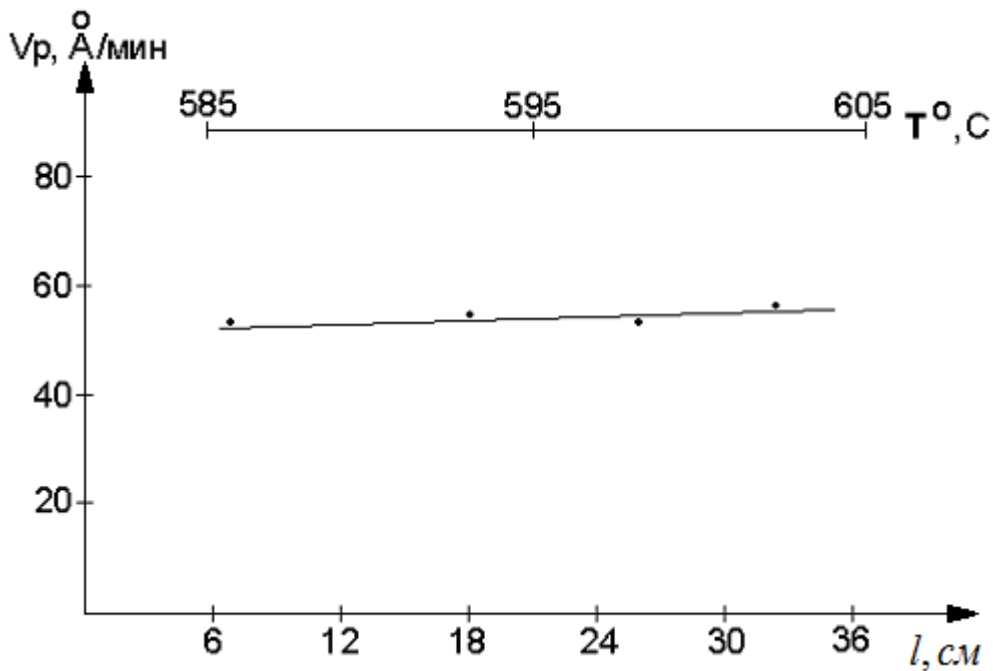


Рис. 3.16. Изменение скорости роста легированных ППК по длине зоны осаждения

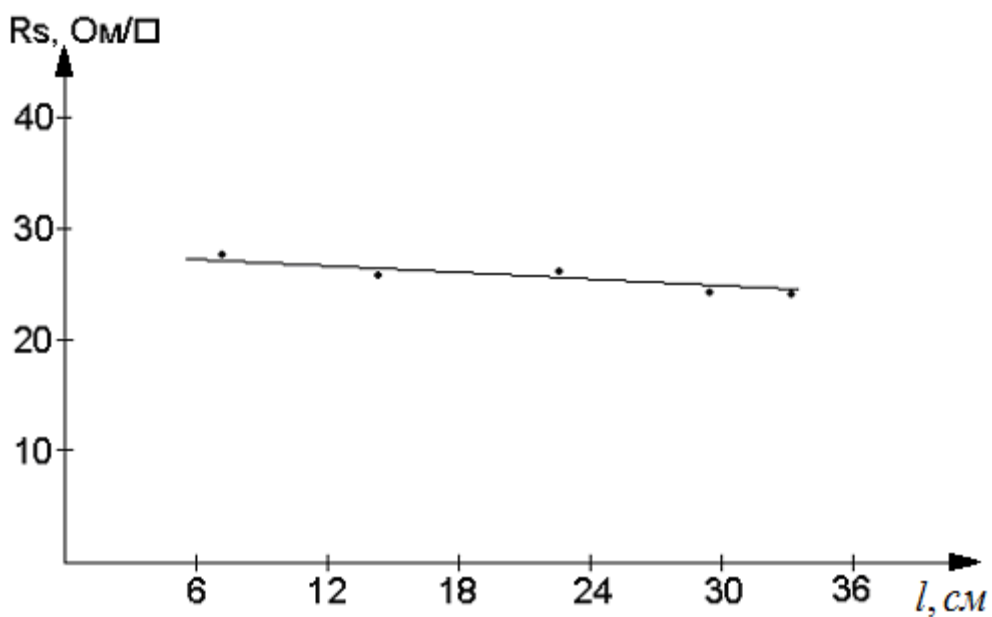
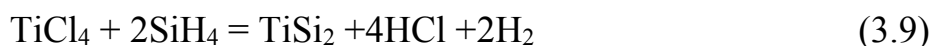


Рис. 3.17. Изменение сопротивления легированной ППК по длине зоны осаждения

При выборе тугоплавкого металла для организации технологического процесса Z-шунтирования поликремния на затворном уровне весьма существенным является агрегатное состояние источника металла. Так, например, наличие летучих хлоридов и фторидов Ti и W делает их перспективными для практического использования. Специализированное оборудование отечественной промышленностью для осаждения вышеуказанных слоев пока не выпускается, поэтому разработка процессов проводилась на экспериментальном оборудовании. Дополнительные требования к установке типа “Изотрон” предъявлялись по герметичности блока газораспределения и регулирования хлоридов титана и высокотоксичных фторидов вольфрама, а также вымораживающих ловушек продуктов процесса и профилактики вакуумных агрегатов.

Осаждение силицида титана в атмосфере аргона проводилось при температуре 690-725° С при взаимодействии моносилана с четыреххлористым титаном по реакции:



Наблюдалась достаточно узкая область температур получения силицида титана. В качестве управляющего параметра целесообразно выбирать соотношение SiH₄:TiCl₄ в газовой фазе.

На рис. 3.18 приведена экспериментальная зависимость скорости осаждения слоев силицида титана в среде аргона.

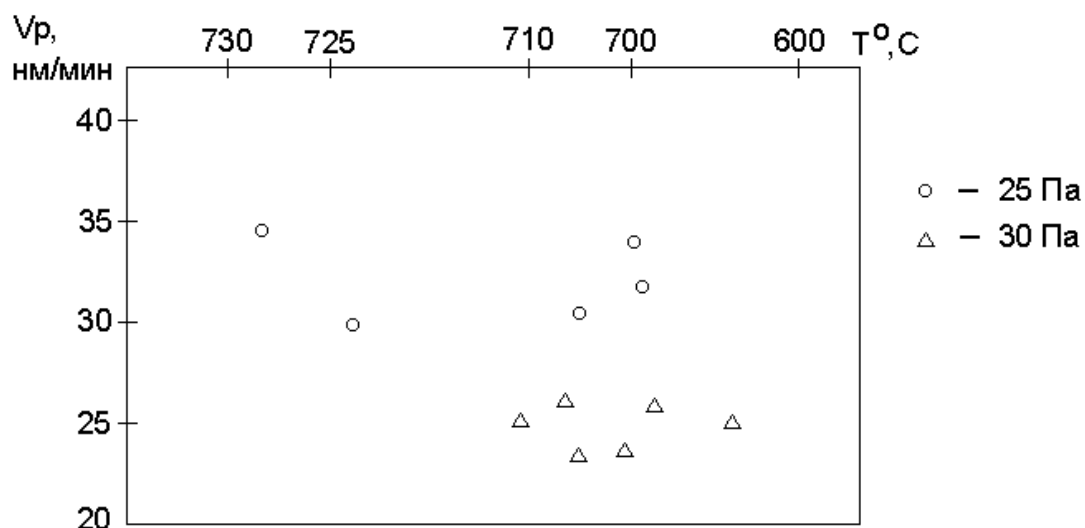


Рис. 3.18. Температурная зависимость скорости осаждения слоев силицида титана в среде аргона

Изменение атмосферы осаждения аргона на водород приводит к повышению температур процесса осаждения на ~30%. Слои дисилицида титана имели хорошую адгезию и низкое сопротивление, например, при толщине 0.8мкм до 0.2 Ом/кв.

Осаждение слоев вольфрама из газовой фазы. Водородное восстановление гексафторида вольфрама протекает по суммарному уравнению



На рис. 3.19 приведена температурная зависимость скорости роста слоев вольфрама из газовой фазы с различными параметрами.

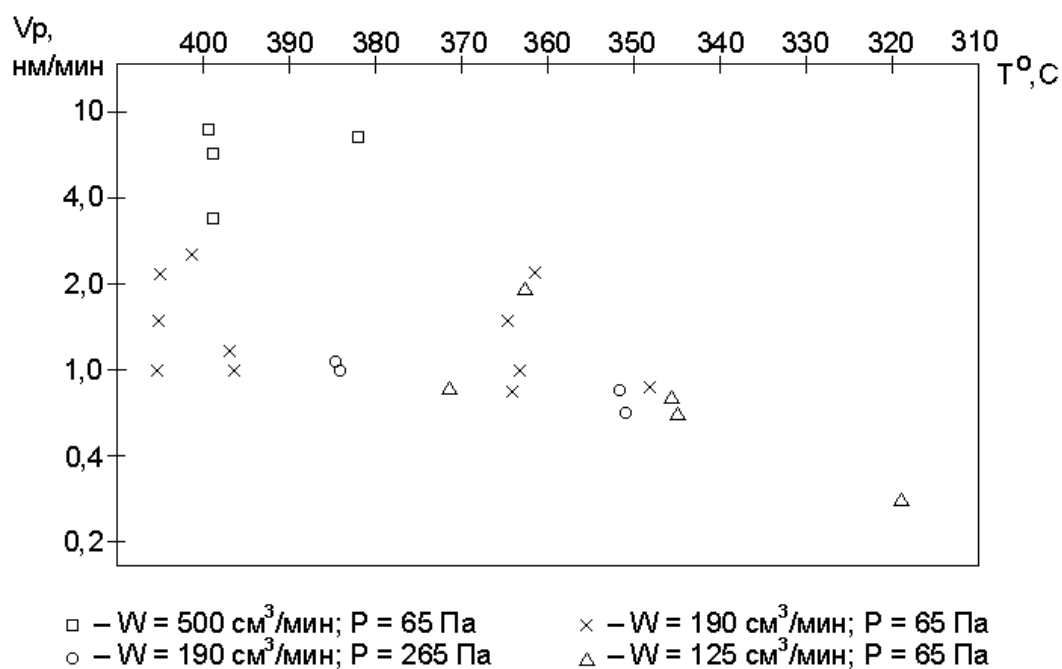


Рис. 3.19. Температурная зависимость скорости роста слоев вольфрама

Осаждение вольфрама проводилось в интервале температур 300-450°C. Слои металлического вольфрама с удовлетворительной адгезией, блестящие при толщине до 0.3 мкм имели поверхностное сопротивление до 0.4 Ом/кв. Осаждение слоев вольфрама возможно в широком диапазоне температур (от 250 до 600°C). Практический интерес представляют температуры 350-400°C, так как при более высоких температурах возможно подтравливание рабочих структур фтористым водородом (продукт реакции).

Последующая термообработка слоев вольфрама в среде аргона и водорода при температурах 450-600° С не изменяет свойств покрытий. Термообработка при 800° С и выше приводит к значительному снижению адгезии слоев (особенно у более толстых слоев) вплоть до полного отслаивания. Предварительный отжиг слоев вольфрама в водороде позволяет в дальнейшем проводить термообработки в неокислительной среде вплоть до 950° С. Отжиг при температурах выше 800° С несколько увеличивает поверхностное сопротивление слоев вольфрама. В образцах с увеличенным

поверхностным сопротивлением была обнаружена фаза дисилицида вольфрама WSi_2 .

Были определены условия селективного осаждения вольфрама на различных подложках. При определенных условиях вольфрам осаждается на кремнии и алюминии, а на диэлектрических слоях SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , ФСС покрытие отсутствует. Не было обнаружено различия в селективности осаждения вольфрама на кремнии и слоях поликристаллического кремния. Исследование структур БИС КНС с селективно осажденным вольфрамом, а также контактного сопротивления слоев вольфрама и кремния проводилось на тестовых элементах, состоящих из 200 островков последовательно соединенных друг с другом через контактные окна (400 шт размером 3.5×3.5 мкм) алюминиевыми перемычками. Контроль проводился на просвет (используя прозрачность сапфира) при 500-кратном увеличении.

Все контактные окна закрыты слоем вольфрама. При отсутствии вольфрама контактное сопротивление составляло $25 \cdot 10^{-3}$ Ом. Тестовые структуры со слоем вольфрама имеют сопротивление в диапазоне $(12 - 28) \cdot 10^{-3}$ Ом. (Разброс может быть связан с разбросом размеров контактных окон, прим.авт.). Результаты оценки термополевой стабильности тестовых МДП-структур с вольфрамом с помощью C-U характеристик приведены на рис. 3.20.

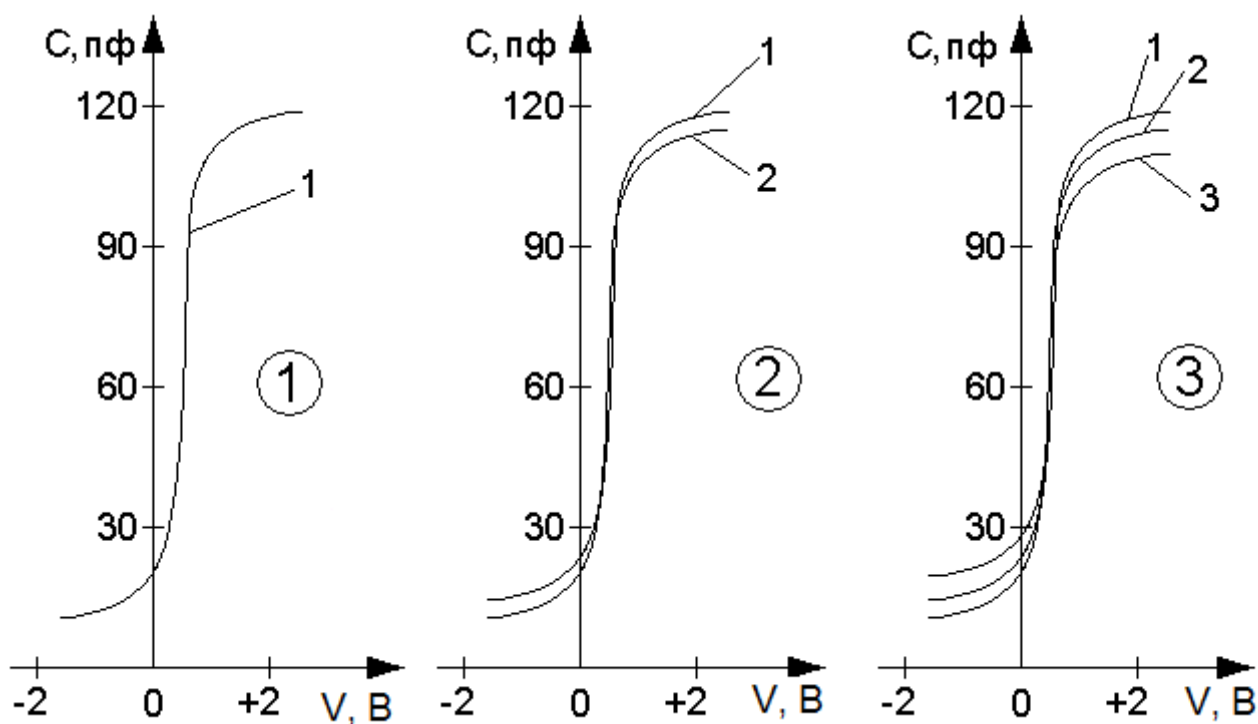


Рис. 3.20. Термополевая стабильность МДП структур с вольфрамом: 1 – исходная; 2- после осаждения W; 3- после выдержки: +125°C; 13.5В; 2 часа

Исследования показали перспективность использования локального осажденного вольфрама на затворном уровне, а также в контактные окна и на контактные площадки для повышения надежности БИС.

3.4 SOS-5 двухкарманная технология с самосовершенными затворами на ультратонком кремнии с длиной канала $\leq 0,5$ мкм (UTSi-технология)

Конструктивно-технологические ограничения технологии SOS-4 при уменьшении длины канала транзистора связаны прежде всего, как показано в §3.3. с большой толщиной гетероэпитаксиального слоя кремния, поэтому модернизация и развитие этой технологии возможно только с освоением технологии создания ультратонкого слоя кремния на сапфире.

К созданию данной технологии специалисты различных фирм США последовательно шли более двадцати лет, при этом затраты по их мнению составили сотни миллионов долларов, а найденные технологические решения изменяют существовавшие априорные убеждения о невозможности достижения структурного совершенства кремния в гетероструктурах кремния на сапфире.

Возможность удаления доминирующих кристаллических дефектов (двойников) из структур КНС в результате повторного эпитаксиального наращивания из твердой фазы (SPE) была показана Лау и др. в работе [45]. По описанию Лау и др. технология SPE обеспечивает улучшение кристаллическости кремниевого эпитаксиального слоя в композитной структуре кремний на сапфире. Процесс SPE включает в себя высокоэнергетическую имплантацию (обычно до 550 кэВ) ионов кремния в кремниевый эпитаксиальный слой с дозой от 10^{15} до 10^{16} ионов/см² для создания в значительной степени аморфного кремниевого слоя, прилегающего к границе раздела кремний-сапфир и при этом остается кристаллический слой на поверхности исходного эпитаксиального слоя. При толщине кремниевого слоя 0,3 – 0,6 мкм. ионы имплантируются через большую часть эпитаксиального слоя, поэтому максимальное нарушение кристаллической решетки кремния происходит вблизи границы раздела кремний-сапфир, где и формируется аморфная область эпитаксиального слоя. При повышенных энергиях и дозах имплантации кремния происходит частичное разрушение сапфира, что может приводить к дополнительному подлегированию слоя кремния алюминием. В процессе ионной имплантации температура сапфировой подложки поддерживается на уровне ниже 100 °С; она охлаждается с помощью фреона или жидкого азота. Далее проводится одна операция низкотемпературного отжига (600 °С) композитной структуры для преобразования слоя аморфного кремния в кристаллический. Во время этого повторного роста оставшая часть кристаллической поверхности кремниевого слоя эффективно действует как затравка зародышеобразования,

поэтому участок повторного роста кремниевого эпитаксиального слоя имеет ту же кристаллографическую ориентацию и по существу не имеет кристаллических дефектов. Как было отмечено выше, SPE технология Лау не только значительно улучшает кристалличность кремниевого эпитаксиального слоя, но также облегчает диффузию алюминия из сапфировой подложки в кремниевый эпитаксиальный слой, а он легирует кремниевую пленку, придавая ей проводимость р-типа. Концентрация загрязнений в результате использования процесса SPE, к сожалению, достаточно велика, что помешало практическому применению интегральных схем, изготовленных на композитных подложках с участием процесса SPE. Аналогичные работы проводились Васуевом и др. [46]. Дополнительные требования, которые они соблюдали, было ограничение энергии и дозы ионов до достаточно низкого уровня, чтобы не превышать порог плотности повреждений сапфировой подложки. Это обеспечивал дополнительный контроль температуры обратной поверхности сапфировой подложки за счет монтажа подложки на теплоотвод с тонкой пленкой термической пасты и теплоотвод должен иметь высокую удельную теплопроводность. Во время ионной имплантации температура теплоотвода поддерживается постоянной (обычно от минус 20 до плюс 250 °С).

Было обнаружено, что процесс, описанный Васуевом, может приводить к неполному и к неравномерному удалению кристаллических дефектов и электрически активных состояний из кремниевого слоя из-за неравномерного теплового контакта обратной поверхности сапфира с теплоотводом. Если используется термическая паста, то любые воздушные пузырьки на границе раздела с пастой могут приводить к неравномерному контролю температуры кремниевого слоя. Кроме того, усложняется последующая технологическая обработка пластин, так как для ее продолжения необходимо полностью удалять все остатки пасты. В работе Риди и др.[47] обсуждаются методы изготовления структур КНС с использованием двойного отжига при температурах до 1050 °С, делается упоминание о необходимости адекватного

теплового контакта для предотвращения самоотжига, но не раскрывается метод создания такого контакта. Сравнение характеристик полученных таким способом пленок КНС и объемного кремния, а также n- и p-канальных транзисторов провели Гарсиа и др. и показали, что они не уступают аналогичным приборам, изготовленным на объемном кремнии[48]. Суммируя вышеизложенное, можно говорить о значительном прогрессе в производстве материала КНС с низкими концентрациями кристаллических дефектов и подложечных загрязнений в кремнии.

Фирма Peregrine Semiconductor Corporation смогла интегрировать все технологические достижения и получить патенты на UTSi-технологию и составляющие КМОП схем [49].

Базовой или исходной структурой для UTSi-технологии является структура КНС с толщиной слоя кремния 0,27 мкм (*Рис. 3.21*). После эпитаксиального осаждения кремниевая пленка содержит определенную концентрацию двойниковых дефектов и электрически активных состояний. На следующем этапе в кремниевую пленку имплантируется пучок ионов Si с энергией 185 кэВ и

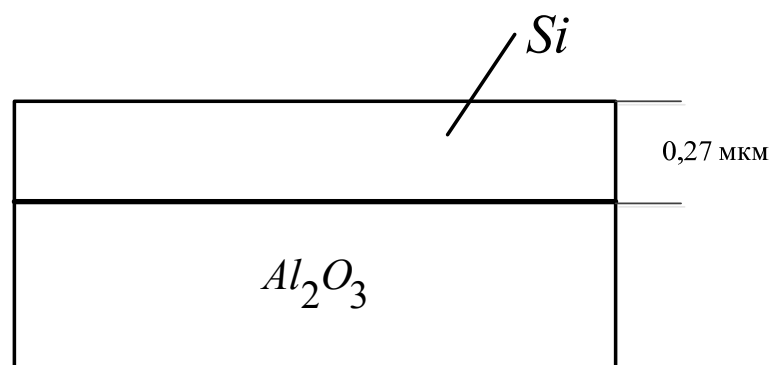


Рис. 3.21. Исходная структура КНС

дозой примерно 6×10^{14} ионов/см², создавая подповерхностную аморфную область с сохранением поверхностной области монокристаллического кремния (*Рис. 3.22*). Энергия и доза пучка подбираются таким образом, чтобы аморфная область простиралась от границы раздела с монокристаллическим кремнием до сапфировой подложки.



Рис. 3.22. Аморфизированная структура КНС

Эта операция требует более детального рассмотрения, поскольку для ее реализации необходимо было существенно модернизировать установки ионной имплантации, в особенности систему поддержания и контроля температуры структур КНС в процессе ионной обработки. Было обнаружено, что поддержание равномерной температуры на уровне $0^{\circ}C$ или ниже не вызывает высвобождения атомов алюминия из сапфировой подложки в кремниевую пленку. Поддержание температуры около $0^{\circ}C$ или ниже позволяет исключить также спонтанный процесс рекристаллизации и обеспечить резкую и однородную границу раздела по всей поверхности структуры КНС, между верхней монокристаллической областью кремния толщиной 0,1 мкм и нижней - аморфизированной областью кремния толщиной 0,17 мкм. Резкая и однородная граница между двумя областями необходима для качественного проведения последующего процесса твердофазной эпитаксии кремния, так как если граница раздела будет неоднородная, то зародышеобразование будет неравномерным, что приведет к повышенной дефектности и образованию двойников. Многочисленные эксперименты позволили специалистам фирмы Peregrine разработать эффективную систему охлаждения обратной стороны структуры КНС с помощью гелия (водорода) с равномерным теплоотводом. Как показано на (рис 3.23) КНС пластина помещается на опорную структуру таким образом,

что создает камеру между сапфировой подложкой и охлаждаемой опорной структурой с помощью уплотнения (O - кольца между опорной структурой и КНС пластиной). Охлаждающий газ (водород) циркулирует по камере и охлаждает подложку.

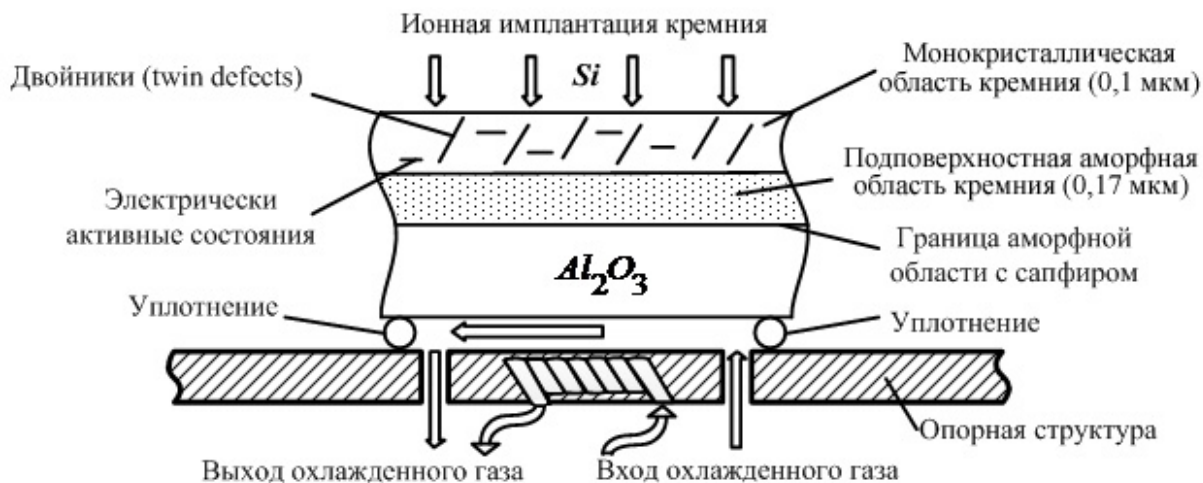


Рис. 3.23 Система охлаждения подложкодержателя.

Водород имеет одинаковый тепловой контакт со всеми участками подложки, поэтому обеспечивается равномерное охлаждение. Скорость потока и температура хладагента регулируется таким образом, что температура кремниевого слоя поддерживается на предварительно заданном уровне или ниже. После создания аморфной области с помощью имплантации ионов кремния, платина КНС подвергается операции термического отжига при температуре примерно 550°C в инертной атмосфере (например, в азоте) для инициирования повторного твердофазного эпитаксиального роста с поверхности области монокристаллического кремния вниз через аморфную область до сапфира. Таким образом, аморфная область становится монокристаллической, процесс рекристаллизации длится примерно 30 минут (Рис 3.24). По завершении этого эпитаксиального роста из твердой фазы температура отжига изменяется и повышается до 900°C в инертной среде (азоте) и поддерживается в течение 30 минут для удаления любых оставшихся дефектов и электрически активных состояний, тем самым

аморфная область преобразуется преимущественно в чисто монокристаллическую область, лишенную двойников и электрически активных состояний в запрещенной зоне.

После рекристаллизации совершенство монокристаллического слоя

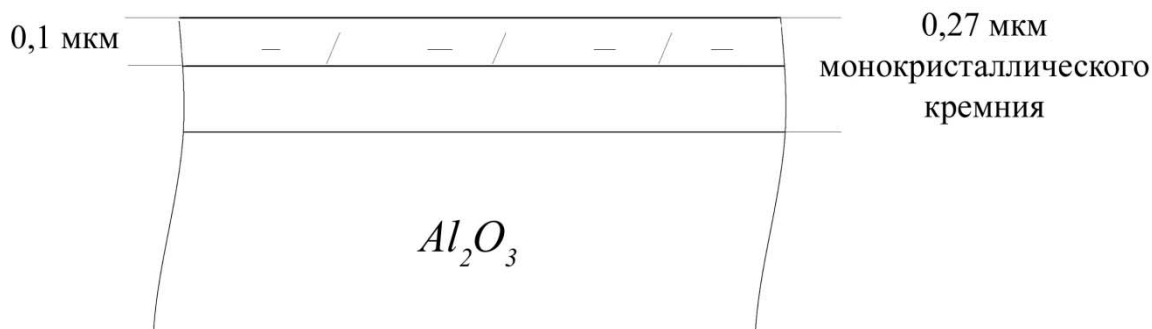


Рис. 3.24. Рекристаллизованная структура КНС

кремния значительно улучшается, при этом качество слоя улучшается от верхней области к границе раздела кремния с сапфиром, то есть слой кремния 0,17 мкм прилегающий к сапфиру, имеет лучшее качество, чем верхняя область 0,1 мкм, от которой начиналась кристаллизация.

КМОП БИС по UTSi–технологии изготавливаются на структурах КНС с толщиной кремния 0,1 мкм, поэтому полученную после твердофазной эпитаксии структуру КНС с толщиной 0,27 мкм необходимо утонять до 0,1 мкм.

Для утонения кремния от 0,27 мкм до 0,1 мкм фирма Peregrine использует операцию окисления кремния. В конце отжига структур КНС при 900 °С, непосредственно перед отключением азота, подают сухой кислород и начинают цикл выращивания оксида кремния, через 30 минут температуру постепенно повышают до 1000 °С, стабилизируют на этом уровне и продолжают окисление в атмосфере пара при 1000 °С, пока толщина оксида не достигнет 360 нм.

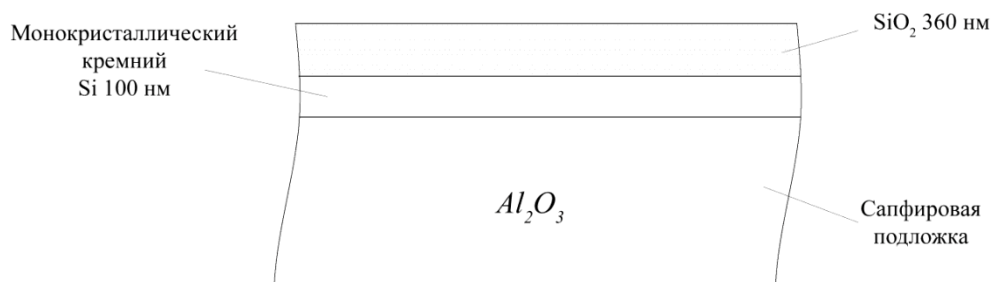


Рис. 3.25. Рекристаллизованная структура КНС после окисления

Перед циклом постепенного снижения температуры включается сухой кислород и не выключается до окончания этого цикла. При выращивании толстого окисла в слое кремния 0,1 мкм создается повышенное давление (повышенное напряжение), что способствует выдавливанию структурных дефектов и двойников из остаточного слоя кремния и улучшению его качества. Область оксида кремния имеет достаточную толщину, чтобы вобрать в себя все остатки двойников и состояний запрещенной зоны (Рис. 3.25). Пленка двуокиси кремния затем удаляется (стравливается) и остается структура КНС с пленкой чистого кремния толщиной 100 нм в непосредственной близости к сапфировой подложке.

Эта структура пригодна для изготовления СБИС с длиной канала менее 0,5 мкм и полностью обедненными МОП ПТ, поскольку соотношение $\frac{L}{\delta} \geq 5 \div 10$ (отношение длины канала транзистора к толщине слоя кремния) можно легко выдержать, например, для длины канала 0,5 мкм, $0,5/0,1 = 5$. Чтобы обеспечить соотношение более 5 и одновременно уменьшить длину канала, например до 0,35 мкм, толщину слоя кремния в области формирования транзистора уменьшают дополнительным окислением и снятием технологического окисла.

На структуре КНС, в данном случае с толщиной кремниевого слоя 0,1 мкм, для уменьшения толщины кремниевого слоя можно вырастить термический окисел 200 А° и уменьшить толщину слоя кремния до 0,09 мкм. Путем технологических очисток поверхности кремниевого слоя, окислением кремния в области транзистора (до цикла формирования подзатворного

окисла) и последующим стравливанием оксида кремния, толщину кремния можно уменьшить до 0,065 мкм и менее.

Технологический маршрут UTSi-технологии незначительно отличается от SOS-4 по последовательности операций. Отличия есть при выборе технологических приемов для формирования изолированных n- и p- типа областей (островков) кремния, так наряду с традиционным плазмохимическим травлением фирма Peregrine для этих целей активно использует LOCOS–процесс.

Для проведения LOCOS – процесса необходимо подготовить структуру аналогичную приведенной на *Рис. 3.26*.

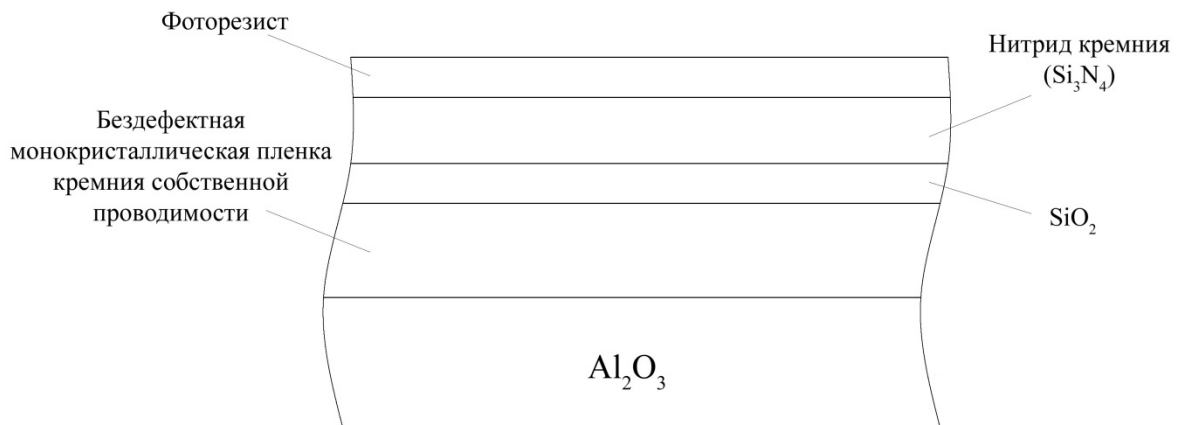


Рис. 3.26. Многослойная структура для проведения LOCOS процесса

Затем, используя стандартные операции маскирования, ионной имплантации, последовательного нанесения технологических слоев диоксида кремния ($\text{SiO}_2 \sim 100 \div 200 \text{ \AA}$) и нитрида кремния ($\text{Si}_3\text{N}_4 \sim 1000 \text{ \AA}$), а также процессов: плазмохимического травление Si_3N_4 и SiO_2 ;

удаление фоторезиста;

изготавливают структуры, аналогичные приведенной на *Рис. 3.27*.

Последовательность технологических операций при изготовлении КМОП БИС по UTSi-технологии аналогична SOS-4.

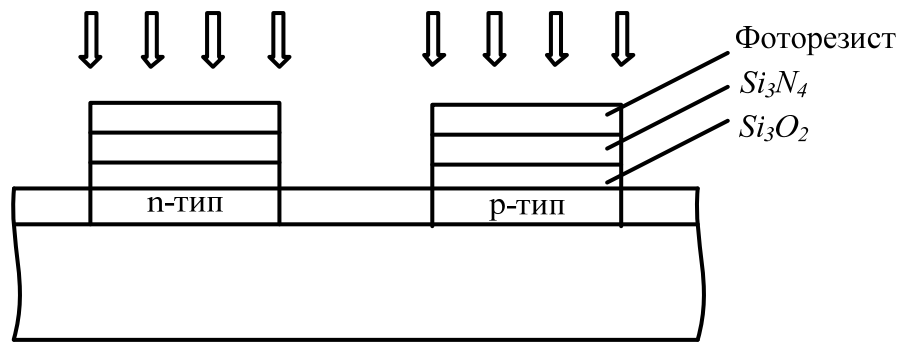


Рис. 3.27. Формирование *n*- и *p*-канальных областей транзистора

Поскольку толщина кремния в технологическом маршруте изготовления КМОП БИС по UTSi-технологии мала $\leq 0,1$ мкм, то для прокисления кремния толщиной 0,1 мкм не требуется высокой температуры, при этом «птичий клюв» из-за малой толщины кремния не образуется (рис 3.28).

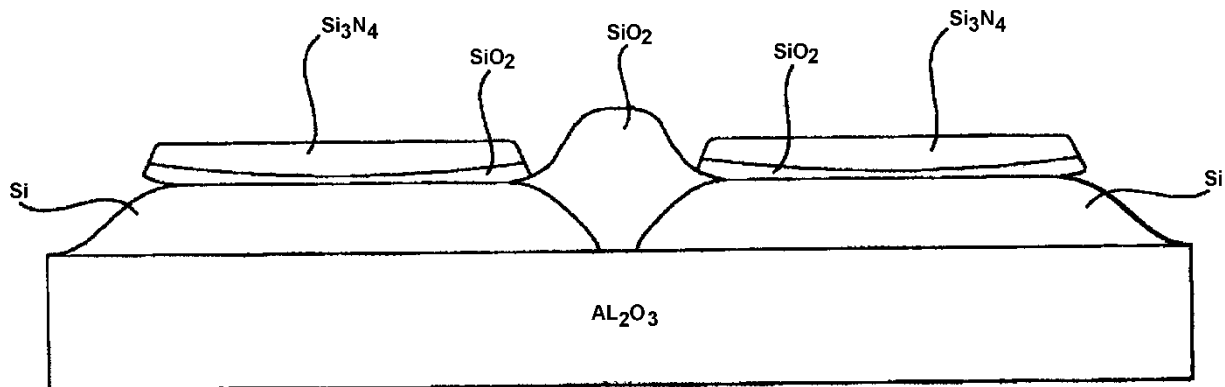


Рис. 3.28 Многослойная структура после LOCOS процесса

Температура прокисления и последующие термообработки в UTSi-технологии не должны превышать 950°C , для сохранения чистоты кремния в канальных областях транзистора. После разделения (изолирования) островков кремния двуокисью кремния нитрид кремния удаляют с поверхности островков для формирования комплементарных МОП транзисторов. Транзисторы могут изготавливаться с полным обеднением или низкороговые по стандартной технологии.

Толщина подзатворного окисла обычно составляет $180 \div 240\text{Å}$, который выращивают при температуре 900°C в атмосфере сухого кислорода.

Чтобы не нарушать область канала при легировании проводящего затворного слоя из поликристаллического кремния, легирование поликристаллического кремния проводят в процессе LPCVD с последующей активацией легирующей примеси при температуре $\sim 850 \div 900$ °С.

Толщина слоя поликремния составляет $2700 \div 3000$ Å. Для увеличения проводимости этого уровня разводки и получения приемлемых сопротивлений истока /стока наносят слой титана (оптимальной считается толщина 400 Å), с последующим двухступенчатым отжигом.

При формировании самосовмещенных областей истоков и стоков легирование областей истока и стока в тонких кремниевых пленках имеет определенные ограничения. Например, легирование с помощью ионной имплантации может привести к аморфизации областей истока/стока на всю толщину. Аморфная пленка не будет надлежащим образом рекристаллизоваться от сапфировой подложки, в результате получим очень высокое удельное сопротивление. Таким образом, желательно формировать области истока и стока с помощью диффузионного легирования, так как сапфировая подложка является диффузионным барьером для атомов легирующей примеси. Легирование областей истока и стока с помощью диффузии является шагом вперед по сравнению с традиционными конструкциями МОП ПТ, основанными на имплантации, так как позволяет изготавливать очень тонкие (неглубокие) области истока/стока с низким удельным сопротивлением в одну стадию. Боковая диффузия в подзатворную область не превышает 0,1 мкм, что резко уменьшает емкость перекрытия затвора в сравнении со стандартной технологией (КНС $\sim 0,3$ мкм), по крайней мере, в 3 раза.

Завершающие стадии процесса формирования межсоединений и нанесения пассивирующих слоев не отличаются от используемых в технологии КМОП объемного кремния.

ГЛАВА 4. Элементная база радиационно-стойких КМОП БИС КНС

Функциональные возможности БИС находятся в прямой зависимости от возможностей той элементной базы, которая может быть реализована по выбранной технологии. Универсальность КМОП КНС технологий сразу была отмечена разработчиками и конструкторами БИС, поскольку диэлектрическая подложка дает дополнительные возможности как в плане улучшения «схемотехнических» параметров приборов (увеличение значений крутизны g_m , уменьшение емкостей приборов и т. д.), так и в плане обеспечения электрической развязки, близкой к идеальной (с малыми и сверхмалыми токами утечки), что облегчает изготовление на одной подложке активных и пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, R-С-цепочек, катушек индуктивности). Кроме того, оптическая прозрачность сапфира открывает широкие возможности для создания оптоэлектронных компонентов и схем на их основе. И, наконец, самое важное преимущество КНС технологии – это обеспечение стабильности и надежности параметров элементов и схем в широком диапазоне температур и специальных внешних воздействий.

Перечисленные выше возможности были реализованы при создании элементной базы радиационно-стойких КМОП и оптоэлектронных БИС КНС. Она включает в себя набор следующих элементов:

1. n- и p-МОП КНС транзисторы и КМОП ячейки;
2. фотовольтаические преобразователи на КНС структурах;
3. стабилитроны, изготовленные по КНС-технологии;
4. пассивные RC-цепочки и сенсоры.

Кроме перечисленных компонентов в данной главе рассмотрен тестовый модуль, содержащий набор тестовых структур и элементов, предназначенных для контроля параметров получаемых приборов на

отдельных промежуточных этапах и по окончании выполнения технологического процесса.

4.1N- и p-канальные МОП КНС транзисторы, КМОП-ячейки

Основой элементной базы радиационно-стойких КМОП БИС КНС являются n- и p-канальные МОП-транзисторы с линейной и кольцевой топологией и различным соотношением L/W.

Правильно подобранное соотношение длины и ширины канала МОПТ минимизирует временную задержку переключательных транзисторов логических схем и схем памяти, а также их чувствительность к воздействию радиации (особенно одиночных заряженных частиц) и собственные шумы МОП транзисторов в усилительных и буферных каскадах аналоговых схем.

По аналогии с разработкой трех поколений базовых технологических процессов изготовления КМОП КНС микросхем разработаны три поколения МОП-транзисторов с различной конфигурацией и геометрией.

МОП-транзисторы, изготовленные по SOS2 технологии с длиной канала 4-6 мкм и толщиной слоя кремния 0,6 мкм

N- и p-канальные МОПТ и КМОП ячейки формируются в эпитаксиальном слое пленки кремния толщиной 0,6 мкм с удельным сопротивлением 3–10 Ом·см, с длиной канала 4–6 мкм, толщиной подзатворного диэлектрика 45 нм, затворы делаются поликремниевыми. Физические структуры n- и p-канальных МОПТ, изготовленных по SOS2 технологии, приведены в главе 2 на рис. 2.

Рассмотрим совокупность статических ВАХ, емкостных C-V и переключательных характеристик n- и p- канальных МОПТ и КМОП ячеек до и после различных видов радиационного воздействия. На рис. 4.1 приведены экспериментально полученные выходные ВАХ n-канального (а), (в) и p-канального (б), (г) МОП транзисторов с L/W=6/100 мкм. Наиболее

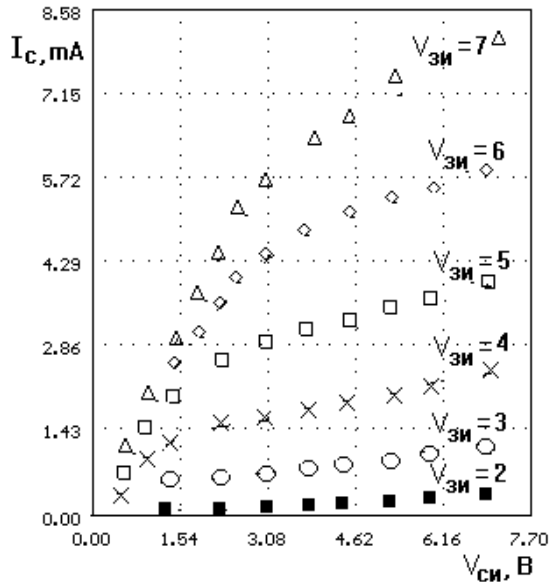
критичным с точки зрения деградации параметров является действие дозы γ -излучения. Рассмотрим результаты, полученные после облучения основных характеристик МОПТ. На рис 4.2 приведены радиационные изменения крутизны выходной характеристики g_m для n- и p-канального МОПТ с отношением $L/W = 6/100$ мкм в диапазоне накопленных доз до 1 Мрад. Измерения, проведенные для транзисторов с различной топологией, позволили выявить следующую тенденцию вне зависимости от соотношения размеров канала транзисторов L/W : деградация крутизны g_m для n-канального прибора в 1,5 – 2 раза больше чем для p-канального.

На рисунках 4.3 и 4.4 для n- и p-МОПТ с одними и теми же геометрическими размерами приведены результаты радиационных изменений пороговых напряжений : ΔV_{thn} для n –канального и ΔV_{thp} для p-канального приборов соответственно. Для обоих транзисторов величина сдвига порогового напряжения ΔV_{th} складывается из двух составляющих: одна ΔV_{ot} – обусловлена зарядом Q_{ot} в слое диэлектрика , а другая ΔV_{it} – зарядом Q_{it} на границе раздела SiO_2 -кремний. Эти составляющие определяются по методике, описанной в §5.4, и приведены на рисунках 4.3 4.4 Величина сдвига порога ΔV_{ot} всегда отрицательна как для n- , так и для p-канальных транзисторов, а величина ΔV_{it} положительна для n- МОПТ и отрицательна для p-МОПТ. Результаты измерений большого количества транзисторов с различной геометрией показывают, что величина сдвига порогового напряжения ΔV_{thp} для p-канального МОПТ всегда больше, чем ΔV_{thn} для n-канального МОПТ с теми же размерами.

Исследования частотных свойств КМОП элементов, реализованных на описанных выше n- и p-МОПТ проводились в схеме кольцевого генератора . На рис. 4.5 приведена зависимость частоты f от накопленной дозы радиации , в схеме кольцевого генератора, состоящего из 17-ти КМОП ячеек.

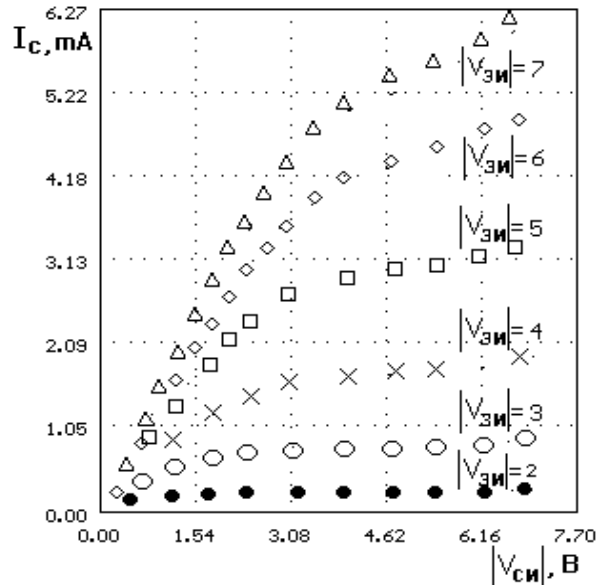
Кроме того, для КМОП элементов, исследовались радиационные зависимости логических уровней «0» и «1», временных задержек и фронтов в

различных режимах переключения. Соответствующие результаты приведены на рис. 6. в главе 6.



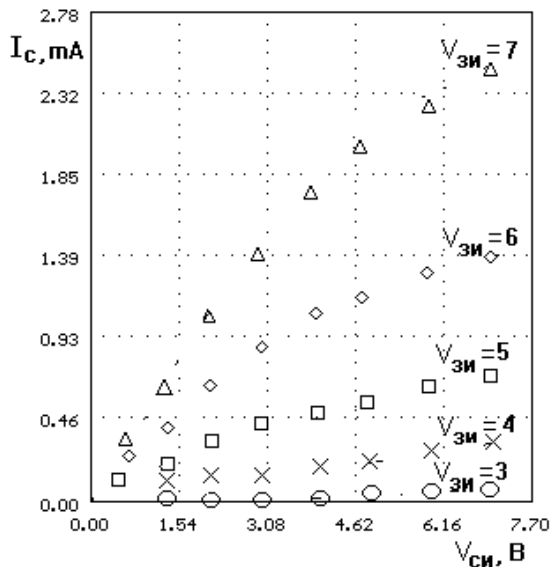
n-канал , сапфир 0,6 W/L=100/6 D=0

(а)



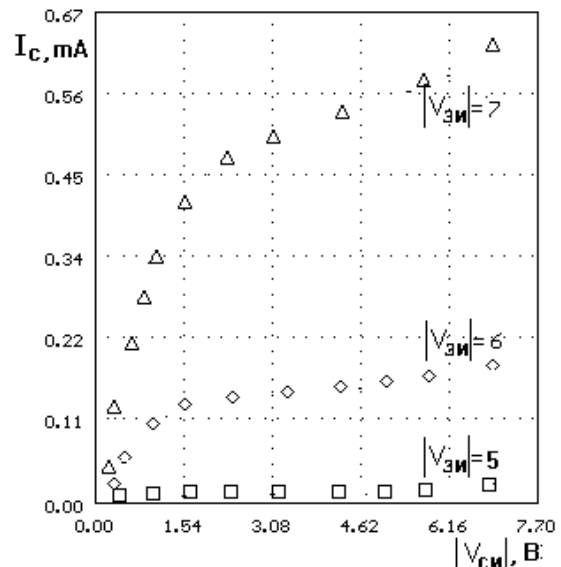
p-канал , сапфир 0,6 W/L=100/6 D=0

(б)



n-канал , сапфир 0,6 W/L=100/6 D=1 Мрад

(в)



p-канал , сапфир 0,6 W/L=100/6 1Мрад

(г)

Рис. 4.1. Экспериментально полученные выходные ВАХ n-канального (а), (в) и p-канального (б), (г) МОП транзисторов с L/W=6/100 мкм. Данные приведены до и после воздействия дозы 1 Мрад.

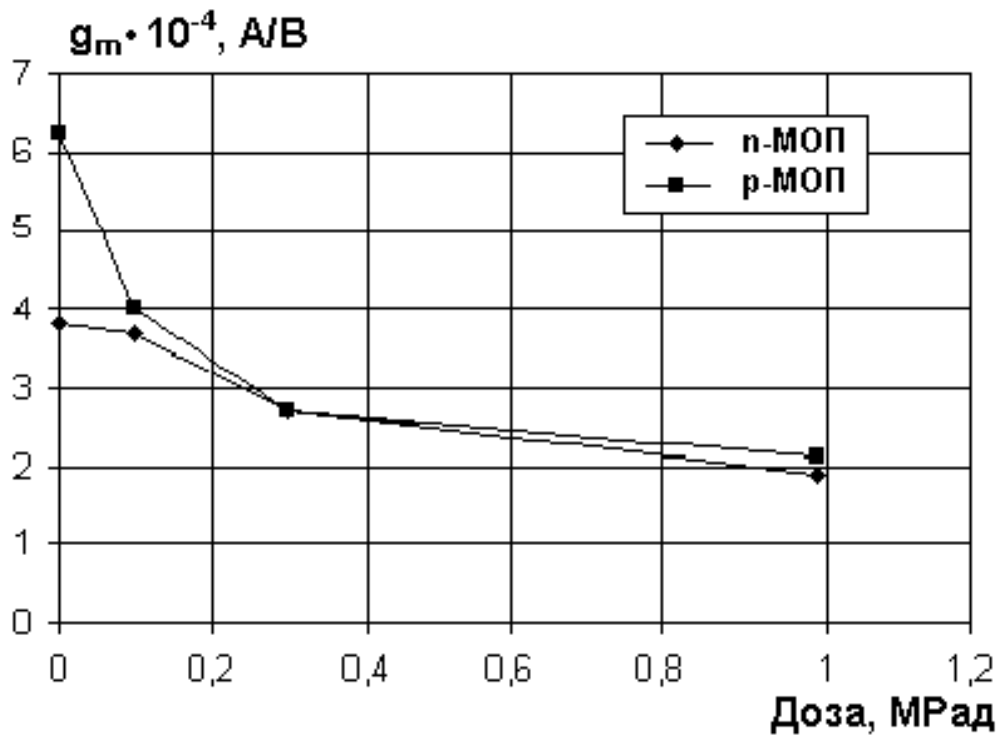


Рис 4.2. Изменение крутизны выходной характеристики g_m для n- и p-канального МОПТ с отношением $L/W = 6/100$ мкм в диапазоне накопленных доз до 1 Мрад

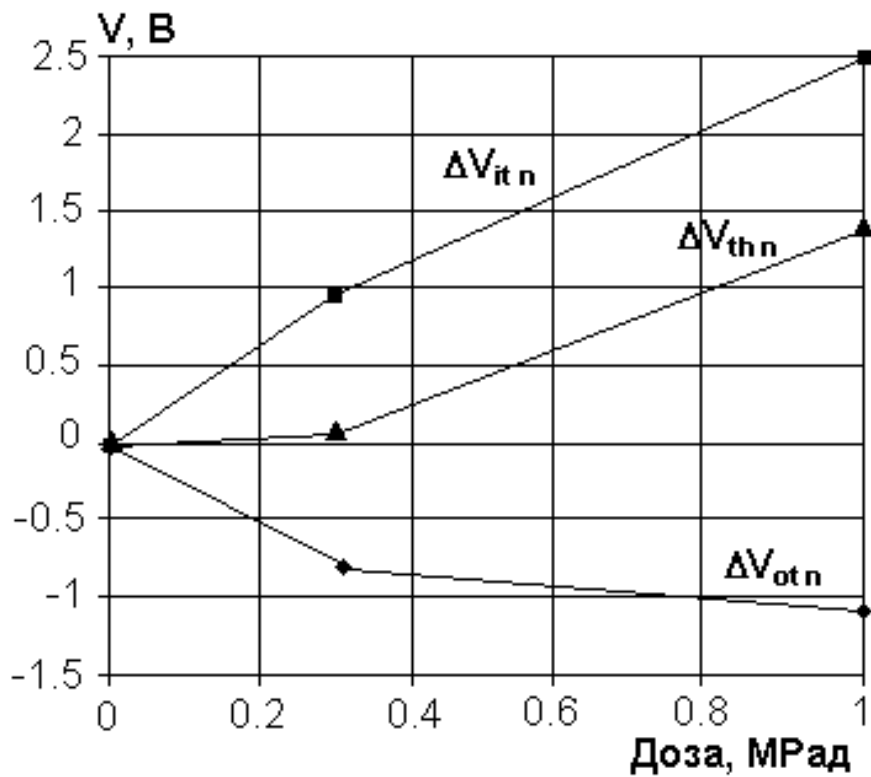


Рис. 4.3. Результаты радиационных изменений составляющих пороговых напряжений ΔV_{thn} для p-канального МОП прибора

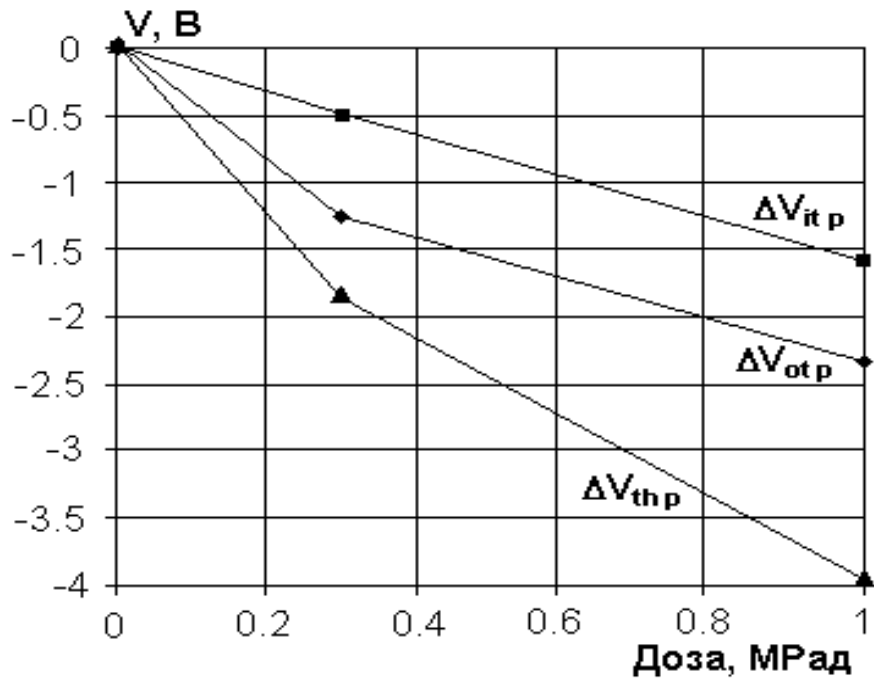


Рис. 4.4. Результаты радиационных изменений составляющих пороговых напряжений ΔV_{thp} для p-канального МОП прибора

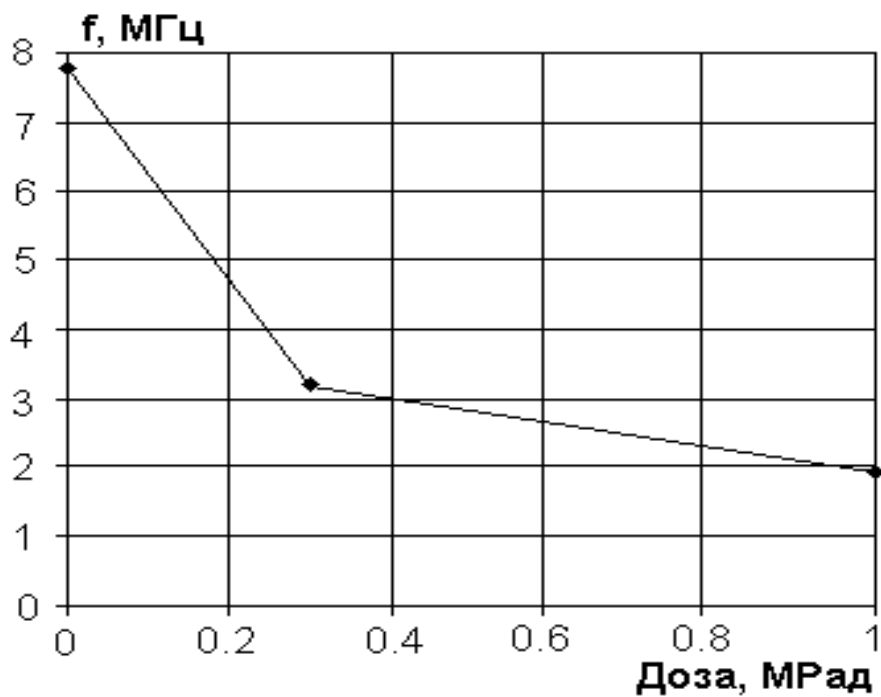


Рис. 4.5. Зависимость частоты f генерации в схеме кольцевого генератора, состоящего из 17-ти КМОП ячеек от накопленной дозы радиации

**МОП КНС-транзисторы, изготовленные по SOS-3 технологии
с LDD областями, с длиной канала 3 – 2 мкм и толщиной слоя кремния
0,6 – 0,3 мкм**

МОП-транзисторы, изготовленные по технологии SOS3, отличаются от приборов, изготовленных по технологии SOS2, меньшей длиной канала: 3 – 2 мкм, против 6 – 4 мкм, а также меньшей толщиной пленки кремния: 0,3 мкм. Это позволило уменьшить объемы рабочих областей транзисторов и, как следствие, повысить радиационную стойкость приборов. Меньшая толщина пленки кремния улучшает рельеф поверхности и уменьшает вероятность обрывов алюминиевых шин и, тем самым, увеличивает выход годных микросхем и повышает их надежность.

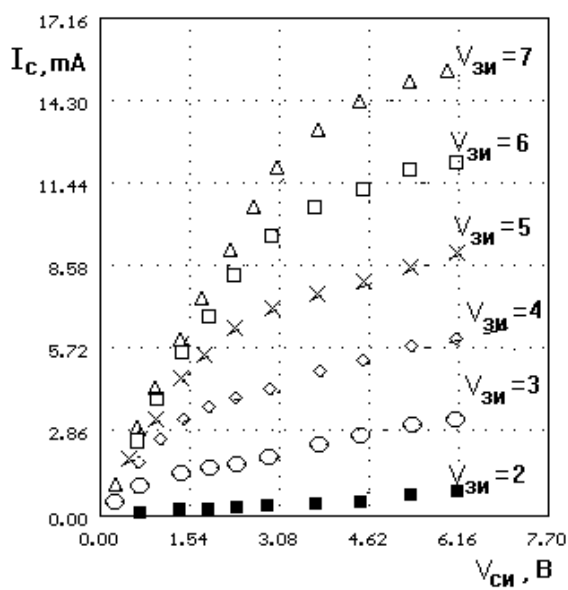
Рассмотрим параметры и характеристики n- и p-канальных МОП-транзисторов с переходной слаболегированной областью канала (с так называемой LDD-областью) и с топологическим размером канала ~ 3 – 2 мкм. При этом реальная длина канала транзисторов оказывается меньше на величину не более 0,5 мкм за счет подтравов под резист при плазмо-химическом травлении поликремниевого затвора и диффузии примеси под затвор в процессе термической разгонки (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Параметры исследуемых МОП-транзисторов

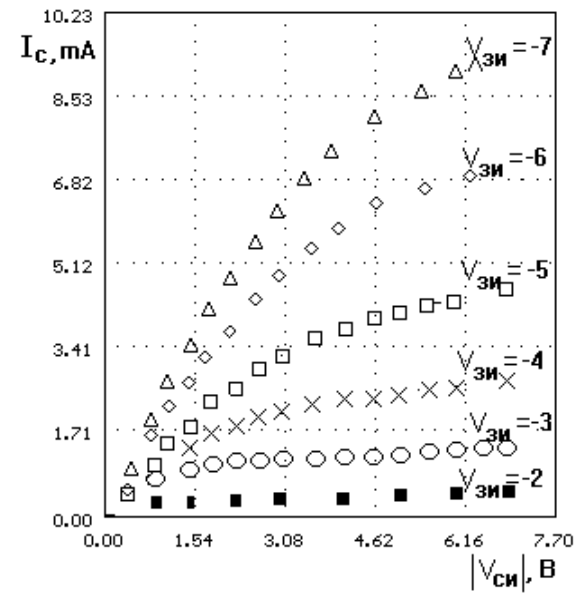
№ пластины	n-канальные транзисторы				p-канальные транзисторы			
	Uпор, В	Iкрут, мА	Iут, мкА	Uпроб, В	Uпор, В	Iкрут, мА	Iут, мкА	Uпроб, В
1 – 2	1,71	13,3	0,018	14	1,3	10,0	0,0038	17
	1,65	13,0	0,02	14	1,28	10,9	0,001	16,5
	1,59	12,8	0,034	14	1,3	10,7	0,005	17
	1,66	12,8	0,032	14	1,29	10,0	0,002	17
	1,74	12,1	0,006	15	1,35	10,7	0,006	17
1 – 4	1,45	12,7	0,1	13	1,27	11,3	0,007	16
	1,4	11,7	0,008	14	1,29	10,7	0,0023	17
	1,6	13,0	0,18	12,5	1,33	10,4	0,007	17
	1,52	11,0	0,01	14,5	1,33	10,3	0,0027	17
	1,5	12,1	0,1	13	1,3	10,5	0,002	17

Деградация ВАХ n- и p-канальных МОП-транзисторов, изготовленных по SOS3-технологии, после воздействия γ -излучения (доза радиации 1Мрад) проиллюстрирована экспериментальными результатами, приведенными на рис. 4.6.

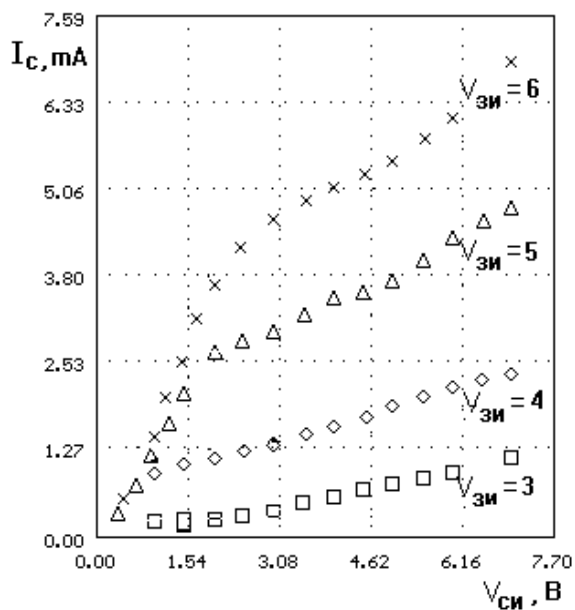
Радиационные зависимости параметров V_{th} , g_m , $f_{дл}$ для этих транзисторов мало чем отличаются от аналогичных зависимостей, приведенных на рис. 4.2 – 4.5 для транзисторов, изготовленных по SOS2-технологии.



n-канал , сапфир 0,6 W/L=100/4 D=0
(а)

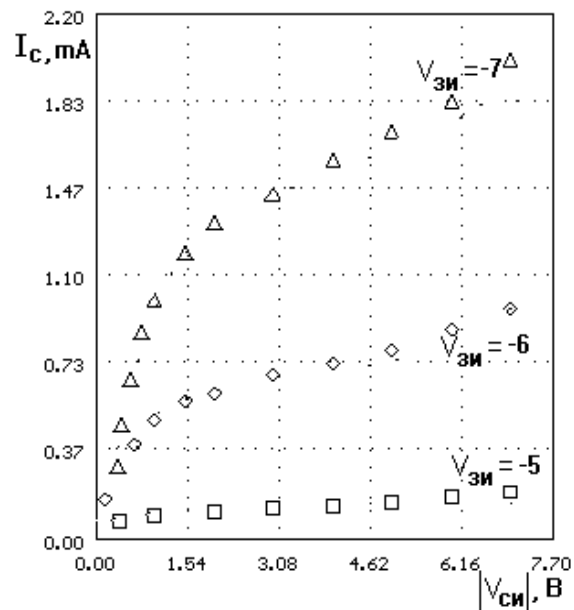


p-канал , сапфир 0,6 W/L=100/4 D=0
(б)



n-канал , сапфир 0,6 W/L=100/41Мрад

(в)



p-канал , сапфир 0,6 W/L=100/4 D=1e6

(г)

Рис. 4.6. Экспериментально полученные выходные вольт-амперные характеристики n-канального (а), (в) и p-канального (б), (г) МОП-транзисторов с $W/L=100/4$ мкм, изготовленных по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм. Данные приведены для необлученного транзистора (а), (б) и после воздействия γ -излучения, доза 1 Мрад (в), (г)

МОП КНС-транзисторы, изготовленные по SOS-4 двухкарманной технологии с LDD-областями, длина канала 1,5 – 2 мкм, толщина слоя кремния 0,3 мкм

Ниже приведены результаты исследований электрических характеристик n- и p-короткоканальных МОП-транзисторов, изготовленных по двухкарманной технологии SOS4 с отдельным легированием карманов (см. рис. 3.8).

Зависимость параметров короткоканальных транзисторов, изготовленных по SOS4-технологии от длины канала представлена на рис. 4.7. В табл. 4.2 приведены экспериментальные данные для n- и p-канальных МОП-транзисторов с различной эффективной длиной канала.

Таблица 4.2. Характеристики транзисторов с LDD-областями

№ пластины	Длина канала	п-канальный транзистор				р-канальный транзистор			
		Упор	Икрут	Иут	Упроб	Упор	Икрут	Иут	Упроб
	мкм	В	мА	мкА	В	В	мА	мкА	В
11-6	2,3	1,7	7,5	0,0078	14	1	7	0,002	17
	2,8	1,71	4,6	0,006	14,5	1,11	5,1	0,002	17,5
	3,3	1,73	4,6	0,0075	14,5	1,18	5,1	0,002	17,5
11-1	2,3	1,57	8,8	0,012	14	0,99	7	0,002	17,5
	2,8	1,58	6,7	0,044	14,5	1,1	6,3	0,0025	19
	3,3	1,59	5,5	0,009	14,5	1,2	5,6	0,002	17,5
11-8	1,4	1,63	9,2	0,03	13	0,67	9,8	4,6	8,0
	1,9	1,65	8,0	0,006	13,5	0,91	7,8	0,06	16
	2,4	1,68	6,8	0,0012	14	1,04	6,7	0,003	17
11-7	1,7	1,68	9,6	0,004	13,5	0,68	8,9	0,6	12
	2,2	1,70	7,6	0,002	14	0,98	6,9	0,0053	16
	2,7	1,68	6,3	0,001	14,5	1,07	6,0	0,0024	17
10-6	2,0	2,22	9,2	0,02	12	0,92	9	0,6	10
	2,5	2,30	7,4	0,015	13	1,13	8,2	0,003	17
	3,0	2,32	6,0	0,004	13	1,3	6,6	0,0024	17
10-3	1,3	1,62	11,0	0,012	13,5	0,68	8,9	0,7	10
	1,8	1,63	8,8	0,06	14	0,89	8,3	0,005	16
	2,3	1,65	7,4	0,002	14	1,03	6,9	0,003	17
10-2	1,4	1,60	9,6	0,008	14	0,73	9,7	3,6	8
	1,9	1,60	7,9	0,005	14	1,0	7,6	0,04	16,5
	2,4	1,61	6,3	0,001	14,5	1,15	6,6	0,015	17,5
7-6	0,9	147	13,9	0,002	13,5	0	0	1120	1,5
	1,4	1,50	11,9	0,0005	13,5	0,71	9,1	0,6	10
	1,9	1,52	9,7	0,0009	13,5	0,87	8,5	0,0003	15,5
8-3	0,9	1,58	14,4	0,006	13	0	0	5200	0,2
	1,4	1,7	10,7	0,009	14	0,59	9,2	17	6,5
	1,9	1,76	9,4	0,0004	14	0,84	8,4	0,003	16
9-8	1,1	1,48	13,7	0,8	11	0	0	12000	1,5
	1,6	1,59	12	0,002	13	0,75	10,3	0,44	12,5
	2,1	1,67	9,7	0,09	13	0,9	8,2	0,006	17,5
9-9	1,1	1,53	14,2	0,004	13	0	0	500	3
	1,6	1,65	11,6	0,002	13	0,78	9,9	0,18	14
	2,1	1,7	9,5	0,02	13	0,91	8	0,005	17,5

На основании данных, представленных в таблице 4.2 определены зависимости порогового напряжения, тока крутизны, тока утечки и напряжения пробоя от значения длины канала транзисторов, которые представлены на рис. 4.7.

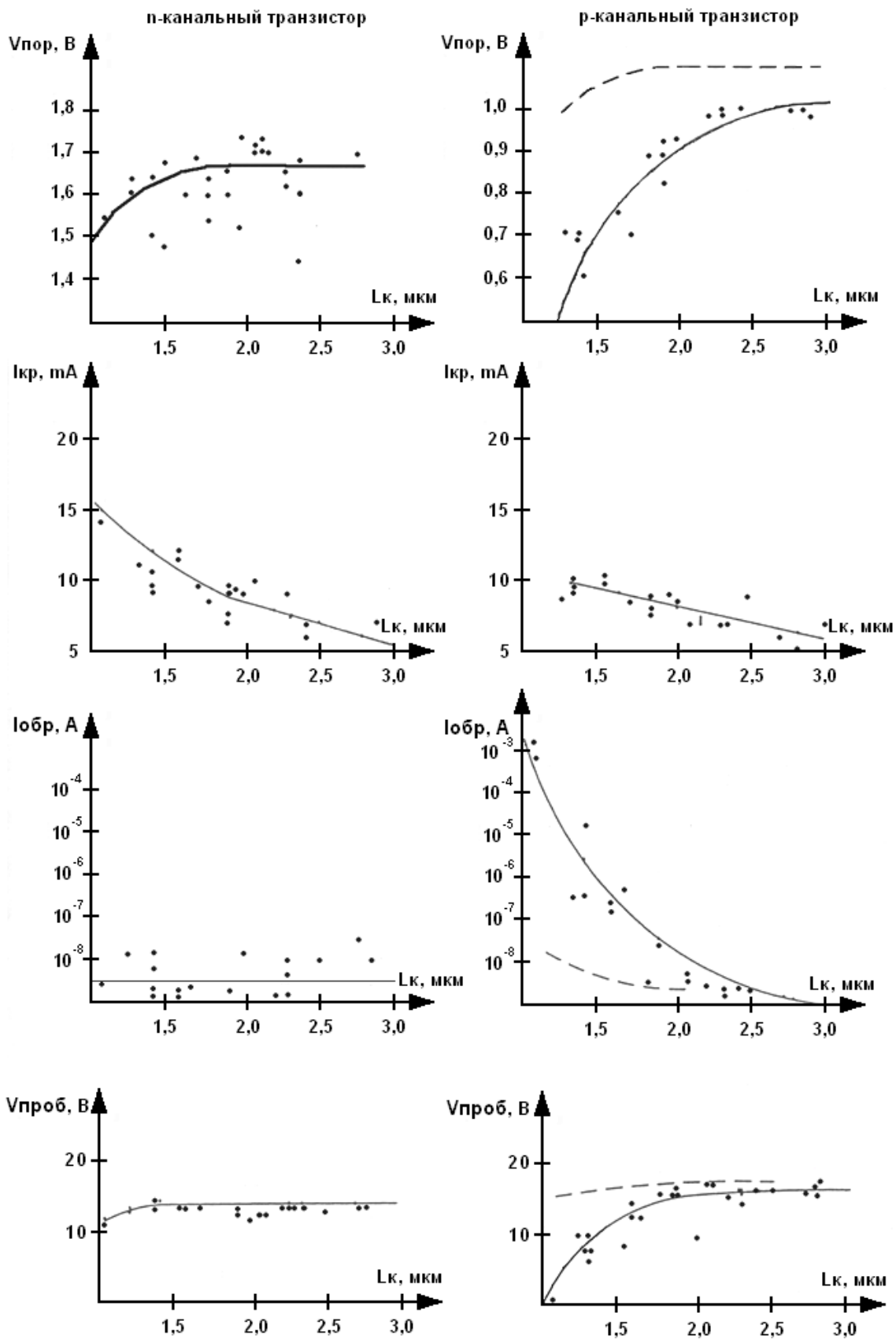


Рис. 4.7. Зависимости параметров n- и p-канальных МОП КНС-транзисторов от длины канала.

Как видно из рис. 4.7, пороговое напряжение n-канальных транзисторов начинает зависеть от длины канала с $L_k \leq 1,5$ мкм, но даже при длине канала, равной 0,9 мкм величина $V_{пор}$ n удовлетворяет норме, так как оказывается больше 0,8 – 1,0 В, что является минимальным значением $V_{пор}$, обеспечивающим заданный уровень радиационной стойкости МОП-транзисторов.

У p-канальных транзисторов влияние длины канала на пороговое напряжение начинается с $L_k \leq 2,5$ мкм и уже при $L_k < 1,8$ мкм значения порогового напряжения становятся меньше нормы.

Напряжение пробоя n-канального транзистора мало зависит от длины канала и вплоть до $L_{эфф} = 1,0$ мкм остается в пределах нормы. Напряжение пробоя p-канальных транзисторов начинает уменьшаться с $L_k \sim 2$, мкм и при $L_k \sim 1,5$ мкм значения $V_{проб}$ становятся меньше нормы.

Как видно из полученных зависимостей, у n-канального транзистора ток утечки вплоть до $L_k = 1,0$ мкм остается меньше 0,1 мкА. У p- канального транзистора увеличение тока утечки начинается с $L_k \sim 2,2$ мкм и уже при $L_k \sim 1,8$ мкм ток утечки начинает превышать 0,1 мкА.

На рис 4.8 приведены ВАХ тока утечки для транзисторов с разной длиной канала. Анализ обратных ВАХ n-канальных транзисторов показывает, что ток утечки вплоть до длин канала $\sim 1,6$ мкм определяется током утечки стокового перехода. При длинах канала $< 1,6$ мкм появляется дополнительная составляющая тока утечки, которая быстро увеличивается с увеличением напряжения на стоке.

Из обратных ветвей ВАХ p-канальных транзисторов видно, что у них ток утечки определяется током стокового перехода до длин канала $>2,4$ мкм, а при меньших длинах канала появляется дополнительная компонента тока утечки.

Одной из причин существенного увеличения тока утечки с уменьшением длины канала может быть влияние "паразитного" биполярного транзистора, подключенного параллельно МОП-транзистору и

расположенного пространственно около границы раздела сапфир-кремний. Это транзистор с изолированной базой $n^+ - p - n^+$ -типа в структуре n -канального транзистора и $p^+ - n - p^+$ -типа в структуре p -канального транзистора (рис. 3.8).

Уменьшение длины канала приводит к уменьшению ширины базы "паразитных" биполярных транзисторов и тем самым к увеличению тока через транзистор. Этот ток может определять ток утечки короткоканального МОП-транзистора. Большой ток утечки у p -канальных МОП-транзисторов, объясняется тем, что из-за большей ширины области пространственного заряда его стокового $p - n$ перехода ширина базы его «паразитного» биполярного транзистора меньше, чем ширина базы у «паразитного» биполярного транзистора для n -канального МОП-транзистора.

С целью определения влияния «паразитных» транзисторов на ток открытых n и p -канальных МОП – транзисторов были измерены их ВАХ при напряжении на затворе равном 6 В.

На рис. 4.9 представлены семейства выходных ВАХ МОП транзисторов с разной длиной канала, из которых видно, что ток стока с уменьшением длины канала увеличивается, при этом при уменьшении длины канала с 2, мкм до 1,1 мкм, т.е. в 2,2 раза (при рабочем напряжении на стоке равном 6 В) ток стока увеличивается в 2,3 раза. То есть ток «паразитного» биполярного транзистора практически не влияет на ток стока открытого транзистора.

Из наклона ВАХ при малом напряжении на стоке видно, что сопротивление открытого n -канального транзистора меньше, чем сопротивление p -канального транзистора в 2 раза, что может быть объяснено большей подвижностью электронов в их канале, чем дырок в канале p -канального транзистора.

Из полученных зависимостей можно заключить, что используемая короткоканальная технология SOS-4 позволяет получать работоспособные n -

канальные МОП-транзисторы с эффективной длиной канала до 1,0 мкм, а р-канальные транзисторы с эффективной длиной канала до 1,8 мкм.

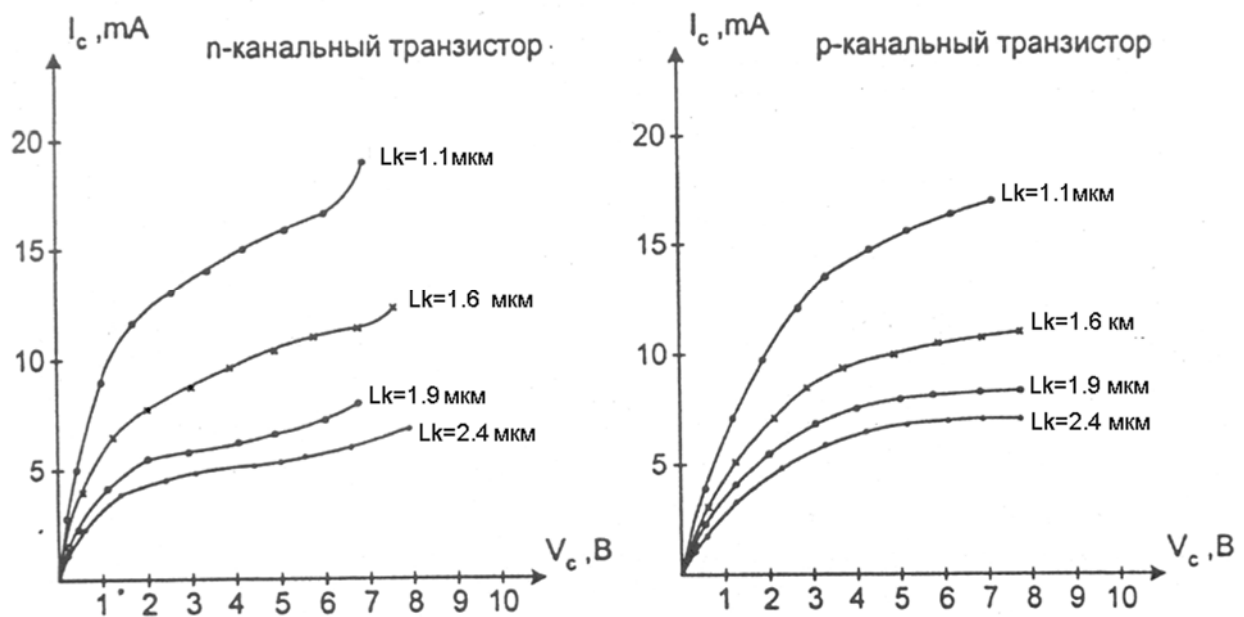


Рис. 4.8. Зависимость обратных ВАХ МОП КНС-транзисторов от длины канала.

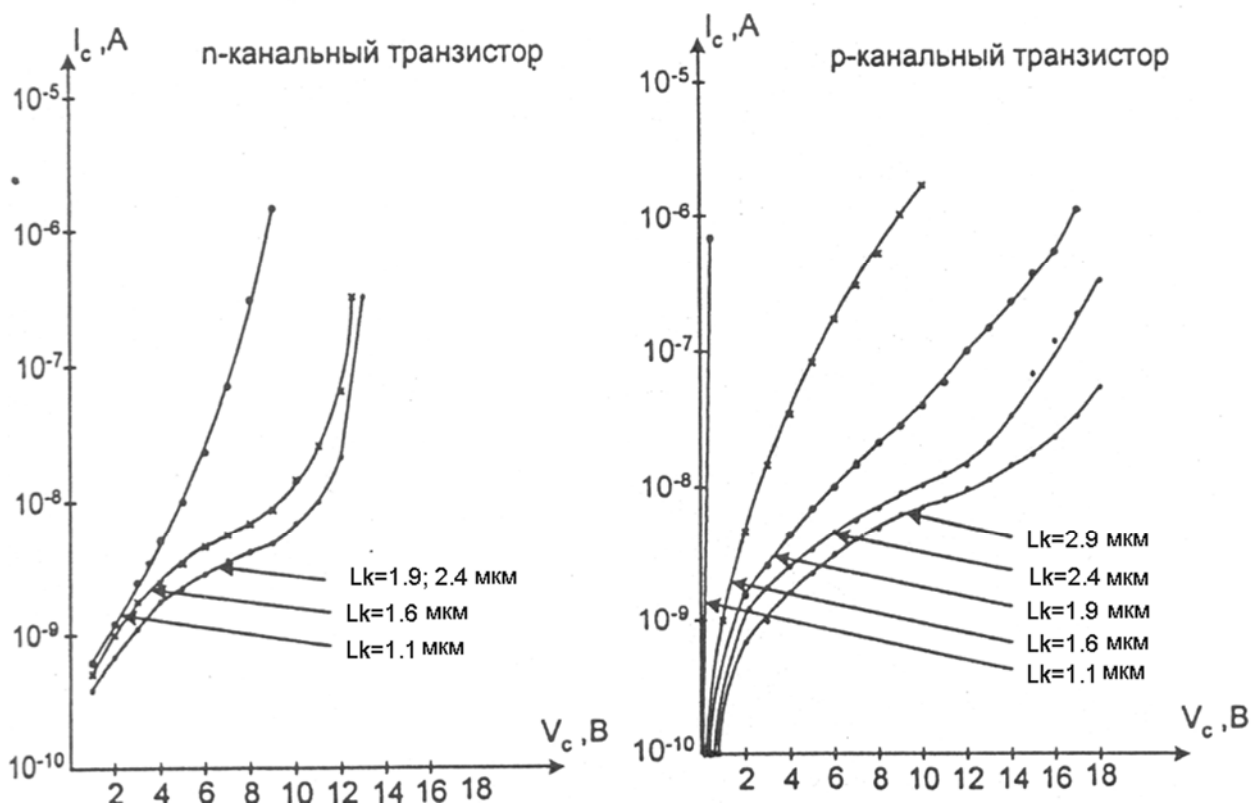


Рис. 4.9. Зависимость прямых ВАХ МОП КНС-транзисторов от длины канала.

Оценка радиационной стойкости транзисторов с LDD-областями проводилась в составе микросхем (КМОП БИС АЦП). Результаты испытаний (см. гл. VI) показали, что радиационная стойкость транзисторов,

изготовленных по технологии SOS-4, не хуже базовой – SOS-3.

4.2 Фотоэлектрические преобразователи на КНС-структурах

В работе рассмотрены варианты создания фотоэлектрических преобразователей на базе КНС-структур конструктивно выполненных в виде диодов и транзисторов. Для изготовления диодов использовались структуры КНС с толщиной кремния 0,6; 1,2; и 3 мкм, для транзисторов – 0,6 мкм.

На рис. (4.10) приведена встречно штыревая конструкция фотодиода, использованная при изготовлении фотодиодов по стандартной интегральной технологии.

Все фотодиоды характеризуются широкополосным спектром fotocувствительности (рис. 4.11), максимальная fotocувствительность наблюдалась в диапазоне 460÷500 нм. Наибольшей чувствительностью обладают фотодиоды с $n^+ - n - p^+$ структурой (кривые 4, 5), причем с увеличением толщины гетероэпитаксиального слоя кремния чувствительность в большей степени возрастает в длинноволновой области спектра. Наименьшей чувствительностью обладают фотодиоды, изготовленные на низкоомном кремнии. ($n^+ - p^+$ структуры) [50].

На базе разработанной конструкции фотодиода была изготовлена монолитная оптопара с использованием прозрачной монокристаллической диэлектрической подложки сапфира, обеспечивающей высокую гальваническую развязку, т.к. с одной стороны подложки был кремний, а с другой – нитрид галлия [51].

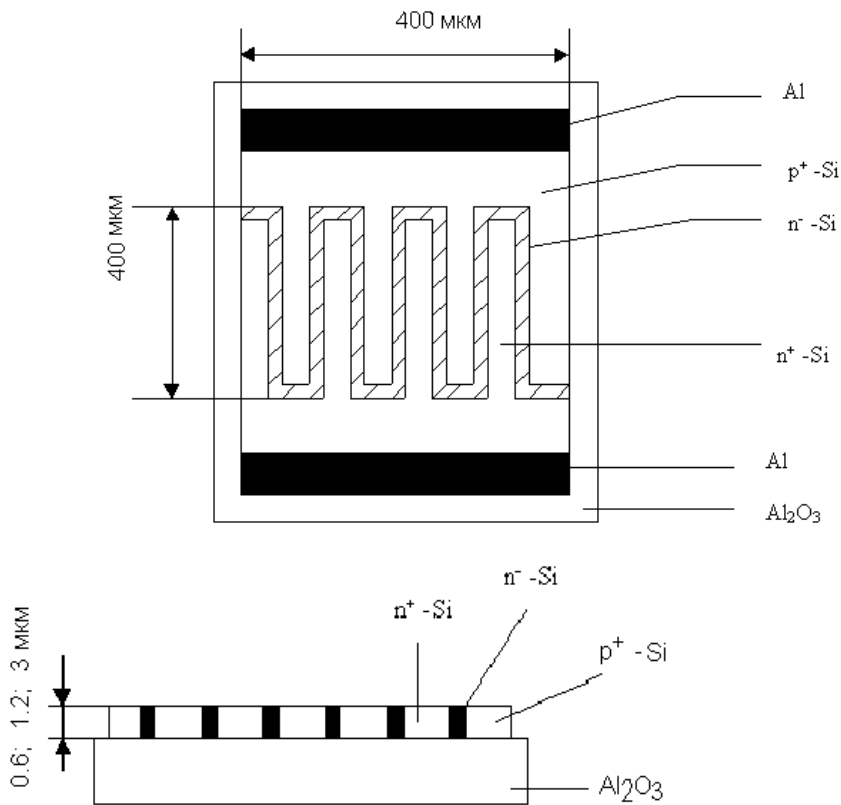


Рис. 4.10. Конструкция КНС $p-n$ фотодиода.

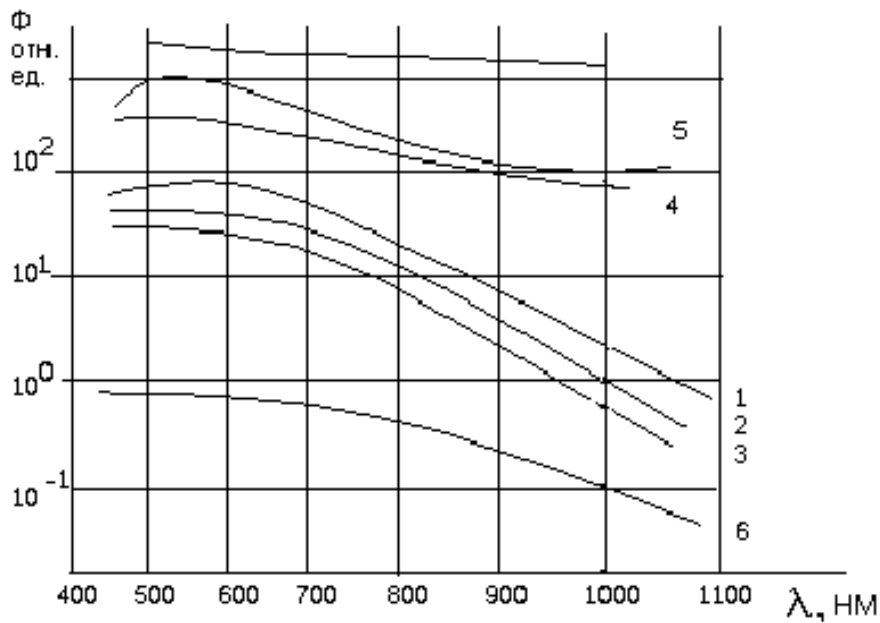


Рис. 4.11. Спектральная чувствительность фотодиодов:

1,2,3 – фотодиоды с $n-p^+$ структурой (ширина гребенки 15,30 и 100 мкм соответственно).

4,5 – фотодиоды с n^+-n-p^+ структурой, толщина исходного слоя КНС 1,2 и 3 мкм соответственно.

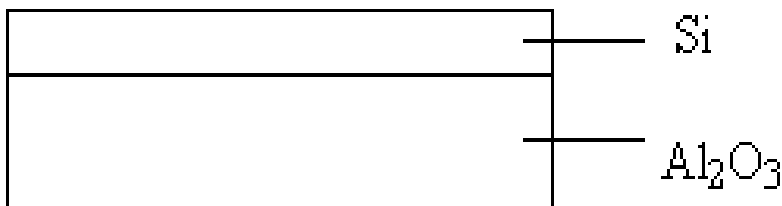
6 – фотодиод с n^+-p^+ структурой.

Структура представляла следующий вид Si / Al₂O₃ / GaN / GaN (Zn).

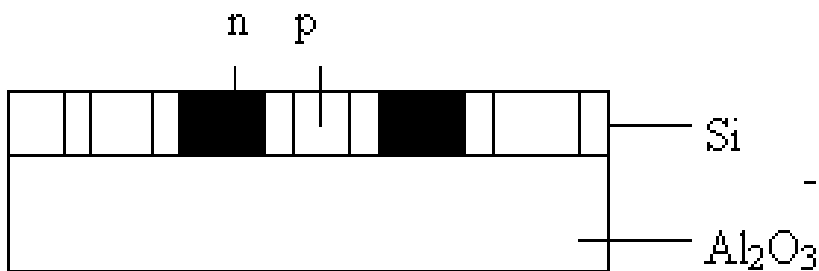
Учитывая критические точки технологических маршрутов изготовления фотоприемников и излучателей была выбрана следующая последовательность операций при создании оптопары.



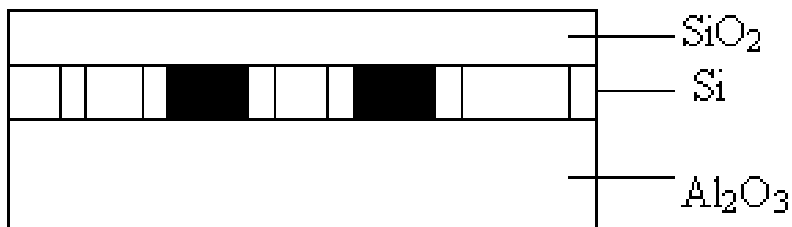
1. Изготовление сапфировой подложки (1012), полированной с двух сторон



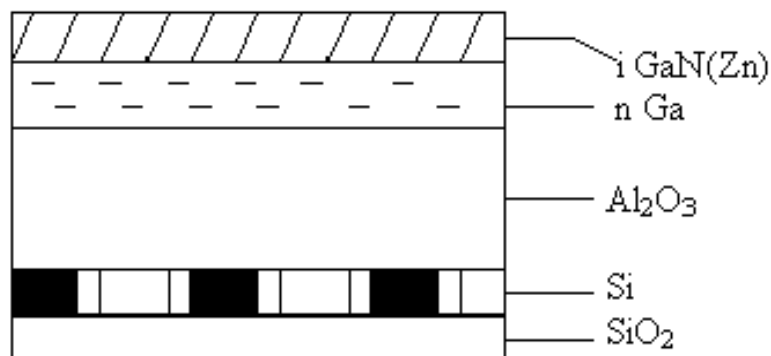
2. Гетероэпитаксиальное наращивание кремния пиролизом силана



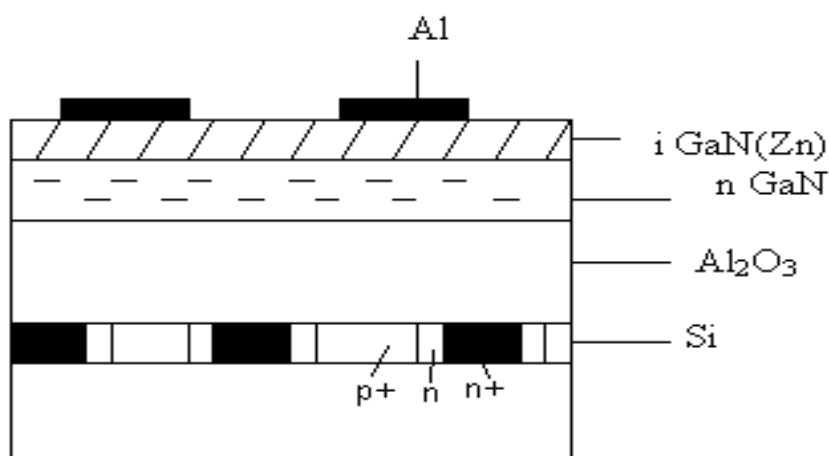
3. Изготовление фотодиодной структуры на основе КНС



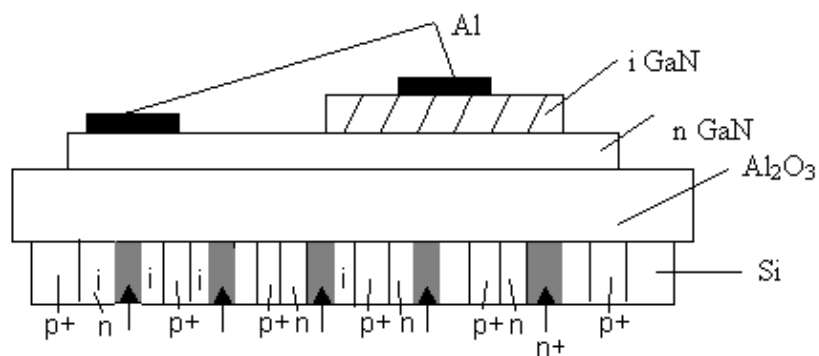
4. Защита фотодиодной структуры окисной пленкой



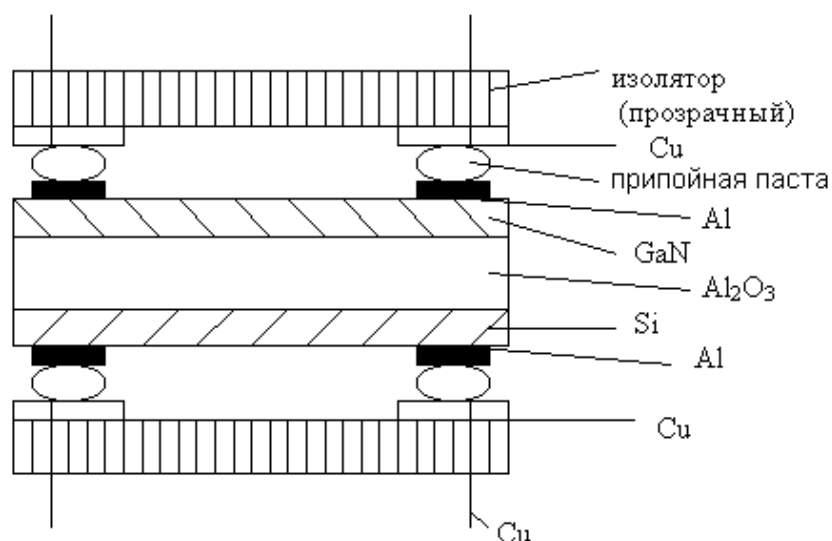
5. Гетероэпитаксиальное наращивание светоизлучающей структуры нитрида галлия



6. Резка структур на кристаллы со сформированными фотодиодами и светодиодами



7. Конструкция оптопары на монокристаллической подложке сапфира.



8. Посадка и сборка кристаллов со стороны свето- и фотодиодов осуществлялась через слой Al и припойную пасту к Cu выводам.

Рис. 4.11. Схема изготовления монолитной оптопары Si/Al₂O₃/GaN

При типичном спектре электролюминесценции GaN диода имеющего один пик с максимумом в интервале 460÷500 нм была проведена оценка эффективности работы оптопары по коэффициенту передачи тока и ее радиационной стойкости при внешнем воздействии быстрых нейтронов. Поток нейтронов Φ_n изменялся от $3 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ н/см², при этом никаких изменений в спектрах электролюминесценции ВАХ и ЛАХ не наблюдали (см. рис. 4.12-4.13), что свидетельствует о высокой спецстойкости нитрида галлия и светодиодов на его основе.

Фотодиоды на основе КНС с вертикальными p-n переходами характеризуются широкополосным спектром fotocувствительности. Быстродействие их оценивалось по времени включения и составляло менее 20нс. (точность измерений определялась параметрами измерительной аппаратуры, прим. авт)

Спецстойкость фотодиодов на основе КНС оценивали по изменению ВАХ и относительной fotocувствительности. Относительная fotocувствительность оставалась неизменной до величины потока нейтронов 10^{14} н/см², далее несколько уменьшалась. Обратная ветвь ВАХ фотодиодов практически не изменялась во всем исследованном интервале потоков, в то время как прямая ветвь изменялась не одинаково; наблюдалось равномерное

уменьшение или увеличение тока при облучении. Коэффициент передачи по току у оптопары при обратном напряжении на фотодиоде 6В составлял ~0,03 %, при этом величина темнового тока сравнима с рабочим режимом.

Быстродействие оптопары определялось быстродействием GaN диода и составляют ~ 40нс, при входном токе 5мА. Невысокий коэффициент передачи по току объясняется неоптимальной конструкцией и значительной разницей площадей излучателя и фотоприемника. Однако конструкция оптопары представляет интерес для разработок радиационнстойких оптоэлектронных устройств, в том числе устройств устойчивых к воздействию ЭМИ.

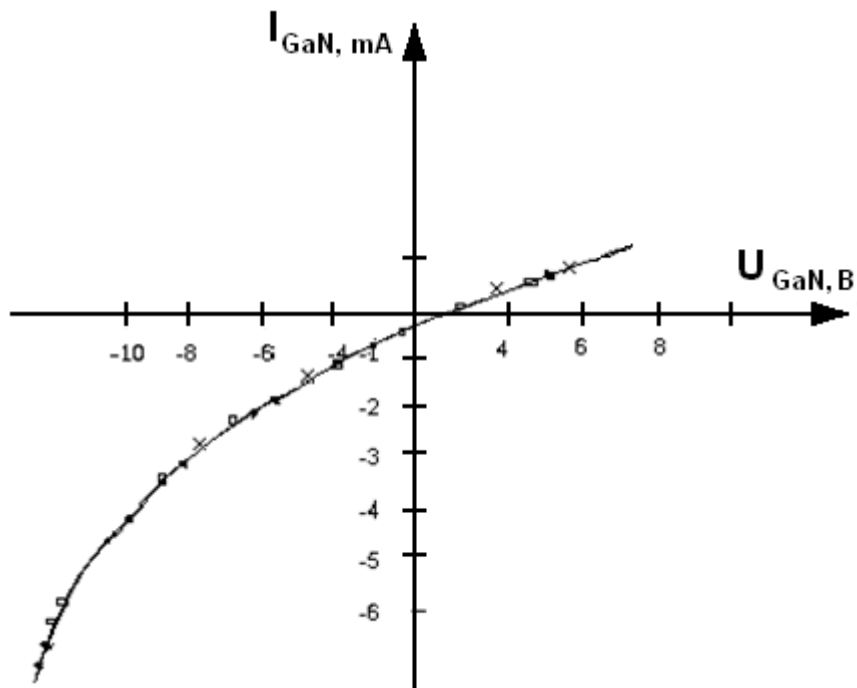


Рис. 4. 12. ВАХ GaN диода

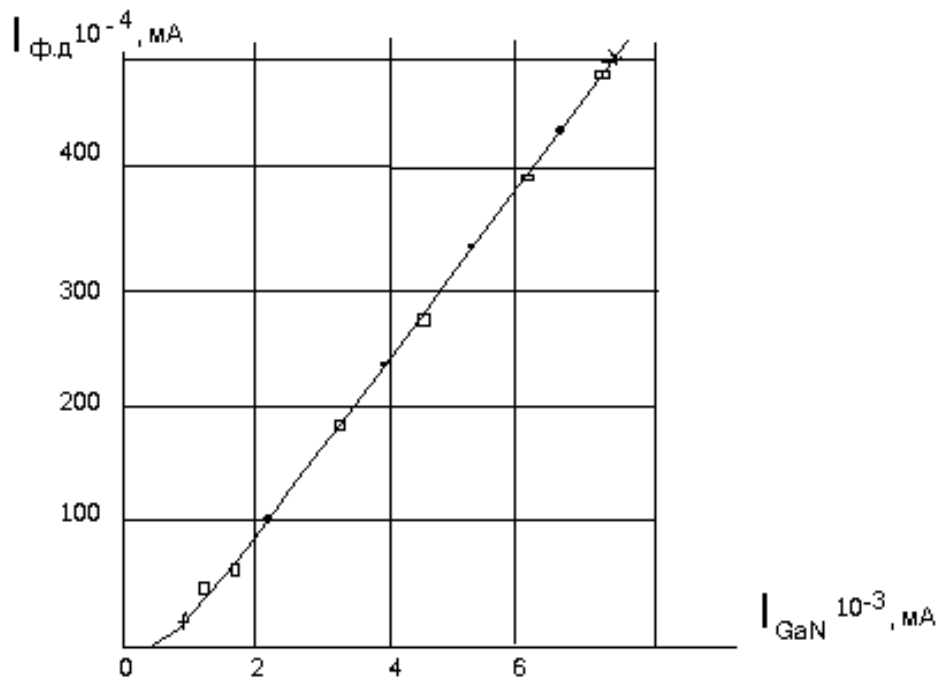


Рис. 4.13. ЛАХ GaN диода.

Φ_n (интегральный поток):

× - $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

● - $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

■ - $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

○ - исходный

Оптоэлектронные элементы

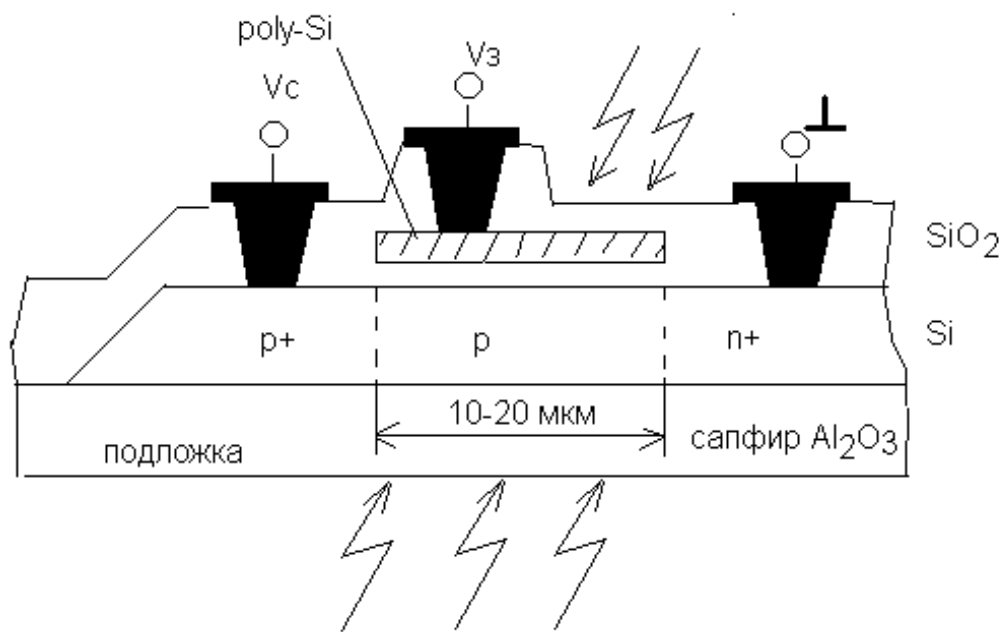
По технологии «кремний на сапфире» разработаны и изготовлены маломощные фотоэлектрические источники питания стандартных микросхем до 5В и на их основе разработан новый тип монолитных оптоэлектронных ИМС со встроенным питанием, использующих только энергию света.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на КНС-структурах

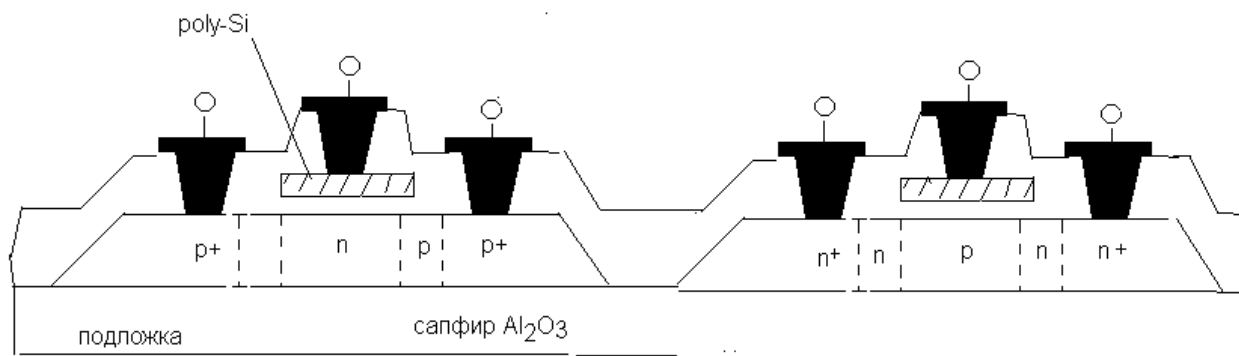
изготавливались как для автономного использования, так и для применения в составе ИС на одном кристалле. В качестве элементной базы использовались диодные структуры с дополнительным управляющим затвором, создаваемым над областью базы, которые изготавливались по стандартной КМОПКНС технологии:

Параметры диодных структур

Толщина подзатворного диэлектрика	45 нм
Толщина слоя кремния	0.6 мкм
Пороговое напряжение n-МОПТ	1.6 – 1.8 В
p-МОПТ	-(1.2 – 1.4) В
Межсоединения:	один слой поликремния один слой металла



(a)



(б)

Рис. 4.14. Диодная структура (а) и *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы (б), изготовленные с использованием КМОП КНС процесса.

Работа фотоэлектрического преобразователя основана на использовании дополнительного затворного диода. При напряжении на затворе значительно большем, чем пороговое напряжение МОП структуры ($V_{th}=1.0...1.5V$), область подложки под затвором становится полностью обедненной и существенно повышается эффективность фотоэлектрического преобразования [51-52]. Матрица 16x12 фотодиодов обеспечивает напряжение $V_G=6-8V$.

Для того, чтобы обеспечить выходную э.д.с. от 2.5 до 3.5 В при мощности 7...10мкВт потребовалась матрица из 16x4 фотодиодов.

4.3. Стабилитрон, изготовленный по технологии КНС

Высокие технические требования к стабилитронам определили необходимость использования сложных специальных технологических методов их изготовления, например локализацию рабочих областей *p*-*n* переходов в объеме полупроводника, ликвидацию влияния поверхностных эффектов и взаимодействия активных элементов структуры стабилитрона между собой через поверхностные состояния, увеличения концентрации основных носителей заряда и уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда.

Так, например, прецизионное уменьшение времени жизни неосновных

носителей заряда осуществляется в результате применения технологии обеспечивающей селективное формирование дополнительных рекомбинационных центров, осуществляемое за счет введения в запрещенную зону полупроводника глубоких термически стабильных энергетических уровней или точечных радиационных дефектов, путем легирования атомами тяжелых металлов или радиационно-термической обработки.

В то же время создание подобного стабилитрона на структуре кремний на сапфире, обладающего малым временем жизни носителей заряда может упростить и удешевить технологию изготовления стабилитронов, незначительным может быть влияние радиации и на параметры стабилитрона.

Аналогово-цифровые преобразователи, изготавливаемые по КНС – технологии, всегда работают в паре со стабилитроном, который используется как источник опорного напряжения.

Конструкция и технология изготовления стабилитрона по КНС технологии приведены ниже.

Конструктивно стабилитрон выполнен как МОП транзистор, у которого отсутствует затвор.



Рис. 4.15. Конструкция стабилитрона на основе структуры КНС МОП -

транзистора.

В дальнейшем описании:

L – длина базовой слаболегированной p-области

W – ширина p- области

h - толщина кремниевой пленки на сапфире.

Разработанные структуры имели $h= 0,6$ мкм, $W= 100$ и 400 мкм, $L= 2, 4, 6$ и 80 мкм.

Как видно из рис 4.15, в такой структуре реализован случай последовательного соединения обратно-смещенного p-p перехода (рабочего) и прямо-смещенного p-p перехода (компенсирующего) . то есть конструкция прецизионного стабилитрона.

Область базы легирована бором, а сильно-легированные области легированы фосфором, т.е. стабилитрона со структурой $p^+ - p - p^+$

При исследовании ВАХ наблюдались различные случаи поведения ВАХ в точке начала пробоя. Это случаи резкого или плавного пробоя перехода.

У стабилитрона на объемном кремнии напряжение стабилизации измеряется при токе равном $7,5$ мА. При площади p - p перехода равной $5 \cdot 10^{-5}$ см² плотность тока составляет $1,5 \cdot 10^2$ А/см² . Площадь p - p перехода стабилитрона на кремнии на сапфире равна $S=W \cdot h= 100 \cdot 10^{-4} \cdot 0,6 \cdot 10^{-4}= 6 \cdot 10^{-7}$ см². При такой площади плотность тока стабилизации будет равна $7,5 \cdot 10^{-3} / 6 \cdot 10^{-7}= 10^4$ А/см² . То есть стабилитрон на КНС при указанных размерах будет работать при существенно большей плотности тока, что может вызывать его перегрев. В то же время, от стабилитрона не требуется большого тока стабилизации, например при использовании в качестве источника опорного напряжения в схемах АЦП, поэтому величину тока стабилизации можно уменьшить и, тем самым, уменьшить вероятность перегрева p - p перехода стабилитрона.

Исходя из этих соображений, измерения характеристик стабилитрона проводились при токе равном 1 мА, а динамическое сопротивление

измерялось при приращении тока стабилизации на 5 мА.

Таблица 4.4. Результаты измерений параметров стабилитронов с длиной р области равной 6 и 80 мкм и шириной р- области равной 100 мкм

№ образца	Концентрация, см ⁻³	Длина р-области 6 мкм			Длина р-области 80 мкм		
		Уст, В	Rд, ом	Iут, мкА	Уст, В	Rд, ом	Iут, мкА
1	7,3 10 ¹⁶	33-40	1200	0,2	40-65	2500	0,001
2	2,2 10 ¹⁷	14	1100	0,1	14-15	2400	0,002
3	4,3 10 ¹⁷	8-9	1020	0,1	8-9	2350	0,002
4	1,4 10 ¹⁷	16-17	1000	0,1	16-17	2700	0,005
5	2,2 10 ¹⁷	10	1000	0,2	10-11	2350	0,006

Из приведенных данных видно, что с увеличением концентрации примеси в р –области напряжение стабилизации уменьшается .

Сравнение образцов 2 и 5 , имеющих одинаковую концентрацию примеси, показывает, что при имплантации примеси в середину кремниевой пленки достигается несколько меньшая величина напряжения стабилизации и динамического сопротивления.

Как видно из таблицы 4.4, напряжение стабилизации одинаково для длин р- области равных 6 и 80 мкм. Это свидетельствует о том, что ширина области пространственного заряда р-п перехода при пробое в них меньше 6 мкм.

Учитывая , что прямое падение напряжения на прямо- смещенном р- п переходе равно 0,6 – 0,7 В его заметное влияние на полученные значения напряжения стабилизации имеет место только для образцов 3 и 5.

Одной из причин большого динамического сопротивления у стабилитрона на КНС структуре является большое сопротивление пассивной части р –области (это практически вся длина р –области за исключением, как было получено выше, очень малой ширины области пространственного заряда перехода в ней). Ее сопротивление включено последовательно с сопротивлением р-п перехода и поэтому должно существенно увеличивать

общее динамическое сопротивление стабилитрона. Приведенные на рис 4.16 характеристики р –п переходов и р – области поясняют вышесказанное.

Учитывая полученную выше оценку ширины области пространственного заряда р – п перехода при пробое, длину р – области можно уменьшить до 2 мкм.

Что касается тока утечки стабилитрона, то здесь наблюдалось следующее. В первый момент подачи напряжения ток утечки мал (равен единицам наноампер). Однако со временем выдержки под напряжением он начинал увеличиваться до единиц и десятков мкА особенно у стабилитронов с малой длиной р – области и малой концентрацией примеси в р-области. По-видимому это связано с влиянием поверхностных эффектов (перезарядкой поверхностных состояний захвата на границе раздела кремний – воздух) , так как поверхности п и р -областей специально не защищались пассивирующей диэлектрической пленкой.

Из полученных результатов следует, что для уменьшения напряжения стабилизации надо увеличивать концентрацию примеси в р – области, а для уменьшения динамического сопротивления надо использовать стабилитроны с малой длиной р – области.

Таблица 4.5. Результаты измерений параметров стабилитронов с длиной р-области равной 80 мкм и шириной равной 100 мкм, с дополнительной имплантацией ионов бора различной концентрации.

№ образца	Концентрация примеси, см ⁻³	Напряжение стабилизации, в	Динамическое сопротивление, Ом	Ток утечки, мкА
1	7,3 10 ¹⁶	60 -78 -70		0,01 -0,02-0,02
2	2,2 10 ¹⁷	12 -13 -12	2000 -2100	0,001-0,01-0,003
3	4,3 10 ¹⁷	10 -10 -10	1100 -1150	0,005 -0.01-0,008
4	8,7 10 ¹⁷	8,5 -8,6-8,5	820 - 850	0,03 -0.04-0,02
5	1,4 10 ¹⁸	7,8 -7,8-7,7	650 -660	0,04 -0,04-0,05
6	1,7 10 ¹⁸	6,8 -6,8-6,8	400 -410	0,07 -0.08-0,08
7	3,5 10 ¹⁸	6,4 -6,4-6,4	320 -320	0,37 -0.33-0,35
8	6,2 10 ¹⁸	6,3 -6.3-6,3	250 -250	0,55 -0,63-0,72

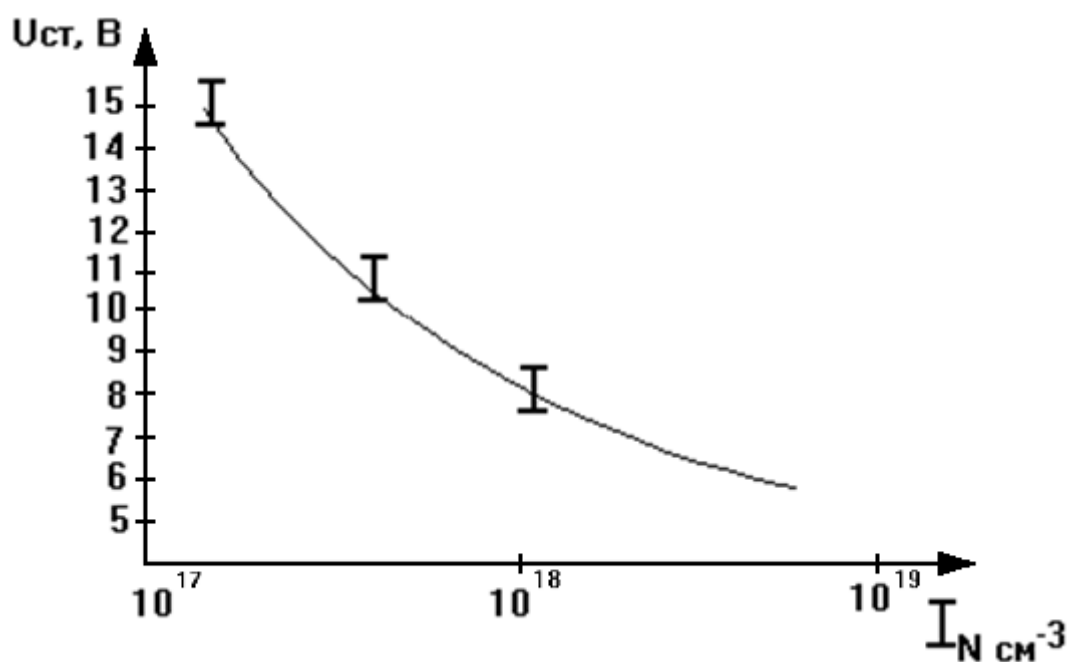


Рис. 4.16. Зависимость напряжения стабилизации стабилитрона на КНС от концентрации примеси в р области

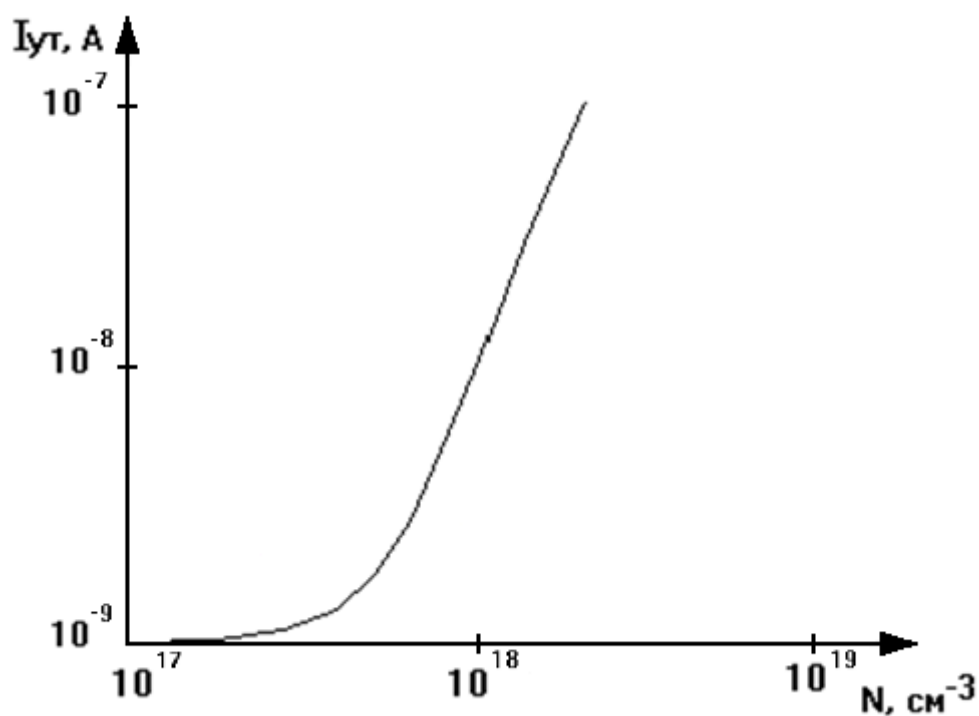


Рис. 4.17. Зависимость токов утечки стабилитрона на КНС от концентрации примеси в р области

Из полученных зависимостей видно, что с увеличением концентрации примеси в р – области напряжение стабилизации сначала резко уменьшается ,

а потом переходит в плавную зависимость (рис. 4.17). Увеличение концентрации бора с $3,5 \cdot 10^{18}$ до $6,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ уменьшает напряжение стабилизации всего на 0,1 В, то есть практически зависимость выходит на насыщение и дальнейшее увеличение концентрации нецелесообразно.

Динамическое сопротивление с увеличением концентрации примеси от $2,1 \cdot 10^{17}$ до $6,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ уменьшается почти на порядок. Однако, как видно из рис. 4.17 дальнейшее увеличение концентрации примеси мало уменьшает величину динамического сопротивления.

Ток утечки с увеличением концентрации примеси в р-области увеличивается. Появление избыточного тока утечки, по-видимому, связано с появлением туннельной составляющей тока, которая тем больше, чем больше концентрация примеси в п и р областях перехода.

Следует также отметить, что с увеличением концентрации примеси в р-области исчезла нестабильность тока утечки.

Одной из причин большого динамического сопротивления может быть сопротивление пассивной части р –области (это практически вся длина р – области за исключением ширины области пространственного заряда переходов в ней). Ее сопротивление включено последовательно с сопротивлением р-п перехода и поэтому должно увеличивать общее динамическое сопротивление стабилитрона.

С целью изучения влияния пассивной части р-области на динамическое сопротивление стабилитрона были изготовлены стабилитроны, с разной длиной р –области 2, 4, 6 и 80 мкм, ширина р- области равна 100мкм , а концентрация примеси в р- области была равна $6,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Как видно из приведенных в таблице 4.6 данных, напряжение стабилизации не зависит от длины р –области вплоть до длин равных 2 мкм, что подтверждает расчет о малой ширине области пространственного заряда р-п перехода при пробое.

Что касается динамического сопротивления, то оно с уменьшением длины р- области от 80 до 2мкм уменьшилось в 3 – 5 раз и уже при длине р –

области равной 4мкм достигало значений характерных для стабилитронов на объемном кремнии.

Таблица 4.6. Параметры стабилитронов, с различной длиной r -области

Длина r -области, мкм	Напряжение стабилизации, В	Динамическое сопротивление, Ом	Ток утечки, мкА
80	6,3-6.3-6,3	100-100-100	0,3-0,6 – 0,5
6	6,2-6,3-6,3	28- 29- 32	0,11-0,19-0,21
4	6,3-6,3-6.3	21- 22- 22	0,16-0,2 – 0,2
2	6,2-6,3-6,3	19- 20- 20	0,14-0,4 –0,32
80	6,3-6.3- 6,3	74-76 -78	0.6-0.9 -0,5
6	6,3-6,2-6,3	25-28 -27	0.3-0,4 -0,4
4	6,3-6,3-6,3	21-22 -21	0,5-0,6 -0,6
2	6,2-6,3-6,3	20-20 -20	0,4-0,9 -0,7

Приведенные данные показывают, что дальнейший путь уменьшения динамического сопротивления заключается в увеличении площади p^+ - p перехода.

Таблица 4.7. Результаты измерения параметров стабилитронов с шириной r -области равной 400мкм и концентрацией примеси в r -области равной $6,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

№ образца	Длина r -области, мкм	Напряжение стабилизации, В	Динамическое сопротивление, Ом	Ток утечки, мкА
5-1	6	6,2-6,3	16-16	0,6-1.4
	4	6,2-6,3	15-15	0,7-1.5
	2	6,2-6,3	15-15	0.6-2.0
6-3	6	6.3	16-20	0,07-0.08
	4	6.3-6,4	15-18	0,06-0.07
	2	6,3-6,3	15-16	0.06-0.07

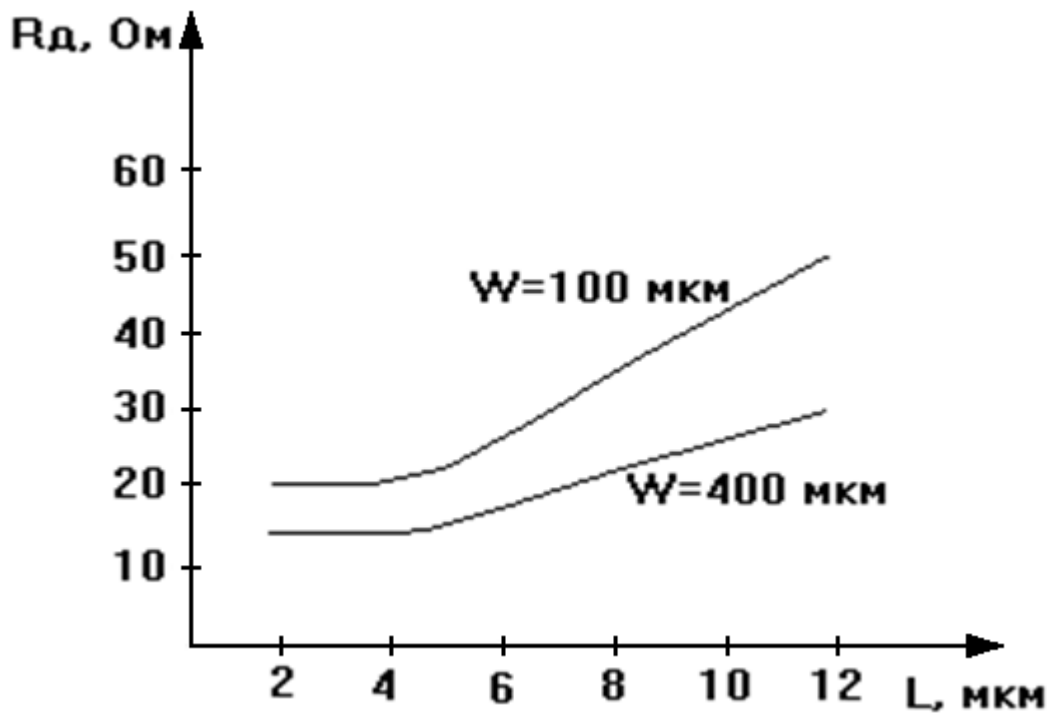


Рис. 4.18. Изменение динамического сопротивления стабилитрона на КНС от длины р-области для стабилитронов.

Сравнение результатов измерений динамического сопротивления для структур с шириной р- области равной 80 и 400 мкм показывает, что увеличение площади р-п перехода в 4 раза привело к уменьшению значения динамического сопротивления не в 4 раза, а только в 1,6 – 2 раза

Это свидетельствует о том, что на величину динамического сопротивления влияет не только сопротивление пассивной части р- области , но и сопротивления прямо- смещенного р-п перехода и сопротивления пассивных частей p^+ и р –областей.

Полученные экспериментальные данные позволяют заключить , что конструкция стабилитрона , изготовленная по технологии КНС, при концентрации примеси в р- области равной $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, длине и ширине р- области равной 2 и 400 мкм , соответственно обеспечивает получение прибора с напряжением стабилизации и динамическим сопротивлением как у стабилитрона на объемном кремнии, и делает ввиду простоты технологического маршрута и низкой себестоимости, технологию КНС

перспективной для создания коммерческих приборов.

4.4 Пассивные RC-цепочки и сенсоры

Как было показано ранее (4.2), для повышения радиационной стойкости отдельных узлов микросхемы, например ячейки памяти, с целью сохранения ее состояния, при воздействии ионизирующего излучения, к узловым точкам триггера через сопротивление (R) подсоединена емкость (C).

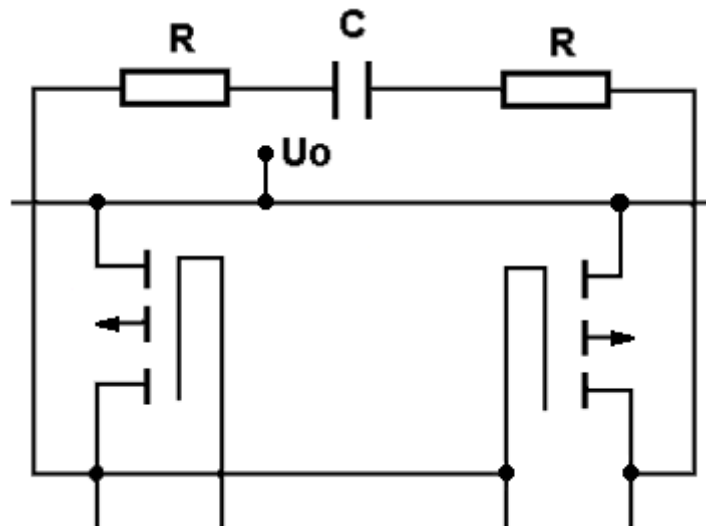


Рис. 4.19. Фрагмент ячейки памяти.

Постоянная разряда RC-цепи составляет $\tau_{rc}=36\text{нс}$. Такое схемотехническое решение предполагает сохранение разности потенциалов U_0 в указанных точках в течение облучения за счет слабого разряда конденсатора (C). Другими словами, сохранение состояния ячейки памяти будет определяться способностью конденсатора (C) сохранять напряжение U_0 при возникновении токов утечки. При условии пренебрежения токами утечки по сапфировой подложке и достаточности схемной защиты баланса сопротивлений утечки по каналам транзисторов, разряд конденсатора будет определяться токами утечки в собственном диэлектрике. Поэтому собственное сопротивление утечки конденсатора (C) является параметром стойкости ячейки памяти по сохранению информации в ячейке памяти.

Для обеспечения постоянной RC-цепи $\tau_{rc}\geq 30\text{нс}$ величина дополнительной емкости должна составлять $\sim 1\text{пФ}$, поэтому размеры такой емкости практически на два порядка превышают емкость затвора

транзистора, используемого в ячейке памяти. Естественно при создании такой емкости возникают дополнительные трудности, и главными критериями оценки технологического процесса являются чистота для исключения образования дефектов и проколов в диэлектрике, качество исходного материала и воспроизводимость номинала емкости после прохождения пластиной всего технологического цикла изготовления интегральной схемы. Учитывая большую поражающую площадь дополнительной емкости, схемы такого назначения относятся к разряду схем повышенной сложности. На базе разработанной КМОП КНС технологии, включающей изготовление дополнительных RC-цепочек, разработаны специальные статические ОЗУ, уровень бессбойной которых практически на три порядка превышает уровень бессбойной работы КМОП БИС, изготовленных на объемном кремнии.

При создании емкости в качестве диэлектрического слоя могут быть использованы оксид кремния, нитрид кремния или их комбинации.

Освоение технологического маршрута изготовления КМОП БИС с комбинированным диэлектриком (гл. 2) позволило решить параллельно задачи, связанные с контролем уровня легирования полупроводниковых слоев, а также, связанные с аттестацией и оценкой процессов и оборудования.

Высокая стабильность МДП-структур на базе $Al_2O_3/Si - SiO_2 - Si_3N_4$ позволила создать стандартные образцы удельной емкости, а также Государственный стандартный образец емкости, который использовался для калибровки ртутных манипуляторов при замерах уровня легирования эпитаксиальных структур, в том числе при отработке процесса ионной имплантации КНС структур 2-х зарядным фосфором.

Для повышения точности измерений с помощью ртутного манипулятора производят его аттестацию, для чего определяют площадь ртутного контакта путем измерения его сопротивления при контакте с металлической пластиной. Емкость ртутного контакта при рабочем давлении ртути определяют при приведении его в контакт с диэлектриком структуры

металл-диэлектрик с известной удельной емкостью. Полученные значения площади и емкости ртутного контакта сравнивают с эталонными значениями, полученными для чистой ртути в ртутном контакте манипулятора и определяют пригодность манипулятора к измерениям. Эталоном для калибровки ртутного манипулятора являлась разработанная структура сапфир-металл с контактами к диэлектрику, выполненная в ступенчатой форме, причем монокристалл из сапфира покрыт металлом, на части которого расположен двухслойный диэлектрик из оксида кремния и нитрида кремния.

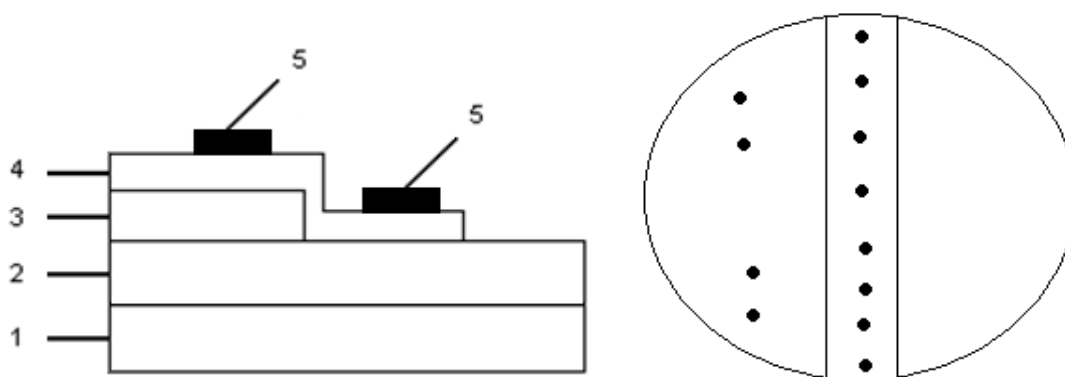


Рис. 4.20. Эталон для калибровки ртутного манипулятора. 1- сапфир, 2-металл(молибден), 3- SiO_2 , 4- Si_3N_4 , 5- Al

Нитрид кремния покрывает слой оксида кремния и часть металлического покрытия, а металлические контакты расположены на областях двухслойного диэлектрика и нитрида кремния.

Сравнивая значения измеренных емкостей системы, ртутный манипулятор-структура, и сравнивая с эталонными значениями емкостей на различных участках структуры, калибруют ртутный манипулятор.

Универсальность технологии, а особенно конструктивные преимущества сапфировой подложки в сравнении с кремнием по механической прочности, высокой устойчивости и агрессивным средам, возможность химической обработки сапфира любым составом, позволили опробовать применение КМОП КНС структур для создания твердотельных сенсоров.

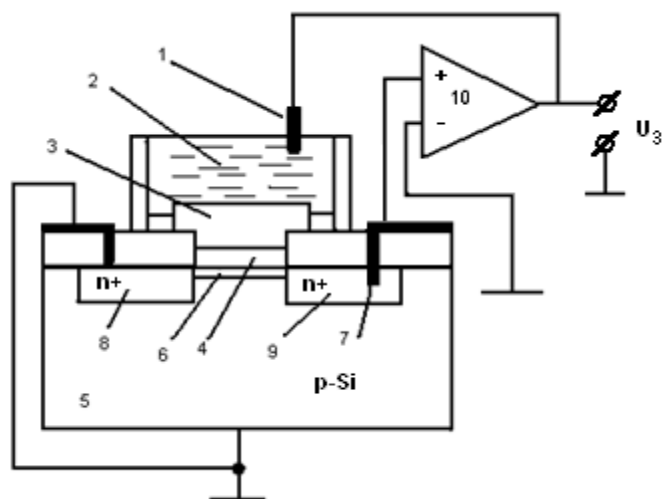


Рис 4.21. Структура ионо-селективного полевого транзистора (ИСПТ) 1-электрод сравнения; 2-исследуемый электролит; 3- мембрана; 4-диэлектрик; 5- полупроводниковая подложка; 6-канал; 7- металл; 8-исток; 9-сток; 10-операционный усилитель

МДП транзистор без металлизации на затворе представляет собой активный ионочувствительный прибор, изготавливаемый по технологии интегральных схем. При сравнении структуры ионоселективного транзистора, выполненного на объемном кремнии (рис 4.21), где необходимо применение специального электрода сравнения и защиты кремниевой подложки, технология КМОП КНС позволяет упростить конструкцию датчика.

Возможность изготовления транзисторов с комбинированным диэлектриком позволила реализовать КМОП КНС структуры с транзисторами, содержащими в качестве подзатворного диэлектрика SiO_2 , который использовался в качестве опорного транзистора, а транзистор с комбинированным подзатворным диэлектриком $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ или $\text{SiO}_2 - \text{Ta}_2\text{O}_5$ в качестве рабочего.

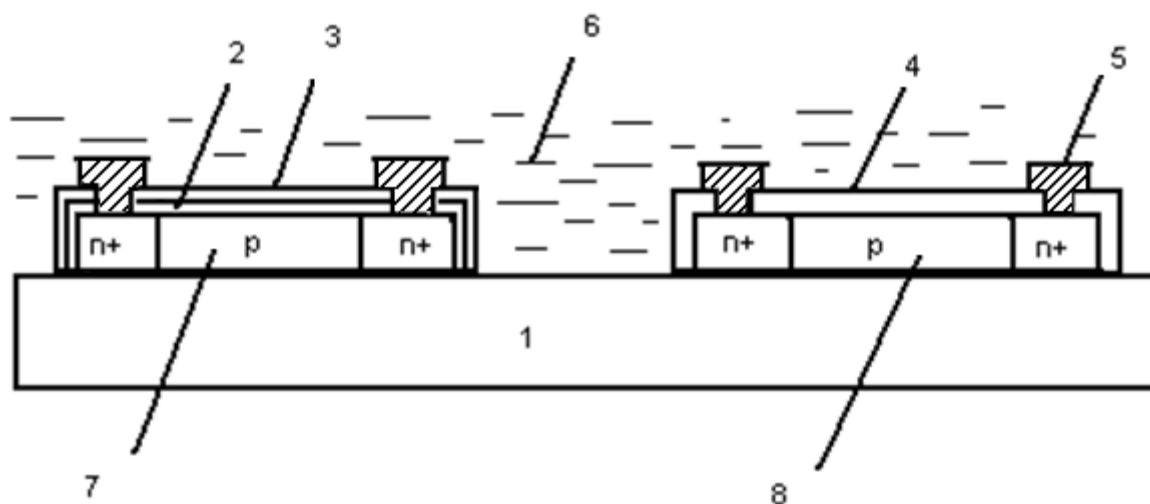


Рис. 4.22. Ионно-селективные полевые транзисторы на КНС.

1) Al_2O_3 ; 2) SiO_2 ; 3) Si_3N_4 ; 4) SiO_2 ; 5) Al; 6) исследуемый электролит; 7) рабочий транзистор; 8) опорный транзистор

Транзистор имеет длину канала $15 \div 20$ мкм и ширину канала равную 1000 мкм. С целью получения линейного участка переходной ВАХ транзистора в области нулевого потенциала на затворе и тем самым повышения их чувствительности к зарядам, осаждаемым на мембрану, транзисторы имели встроенный канал. В качестве мембраны использовались слои $SiO_2 - Ta_2O_5$ и $SiO_2 - Si_3N_4$.

ИСПТ изготавливались на КНС структурах и моно-кремнии, в последнем случае в качестве подложек использовался кремний p-типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 ом см для создания транзисторов со встроенным p-каналом и кремний p-типа проводимости с удельным сопротивлением 7,5 ом см для создания транзисторов со встроенным n-каналом.

Из приведенных переходных ВАХ и данных табл. 4.8 можно заключить, что транзисторы со встроенным n-каналом имеют большую крутизну переходной ВАХ, чем транзисторы со встроенным p-каналом.

Следует отметить, что линейный участок переходной ВАХ часто располагается не вблизи нулевого напряжения на затворе.

Таблица 4.8. Результаты измерений тока стока ЭДП транзисторов с мембраной при $U_{ст}=3В, мка$

№	Д	М	Воздух	Деонизован. вода	Электролит 0,1г-моль/л	Электролит 0,8г-моль/л	Сигнал, мка
Датчики с транзистором на КНС структуре и встроенным р-каналом							
4	0,2	Т	1340	2265			925
		Т	1360	2200			840
		Т	1214		1925		711
		Т	1200		1920		720
		Н	1188			1650	462
		Н	1240			1640	400
Датчики с транзистором на КНС структуре и встроенным n-каналом							
1	0,2	Т	3600	2920			-680
		Т	3780	3070			-710
		Т	4518		3670		-848
		Т	4265		3760		-505
		Н	4710			3730	-980
		Н	4850			3560	-1290
		Н	4808			3535	-1273

Примечание: К- крутизна переходной ВАХ транзисторов, мА/В

Д- доза легирования встроенного канала, мкКул/см²

М- мембрана со структурой Т (SiO₂ – Ta₂O₅)

Н (SiO₂ – Si₃N₄)

Полученные результаты обеспечивают крутизну переходной ВАХ (К=0,8 – 1,0 мА/В), которую имеют транзисторы, изготовленные на КНС структурах со встроенным n- каналом и мембраной SiO₂ – Ta₂O₅. Начальный ток стока менее 0,5 мА при $U_{ст}=3В$ обеспечивается у транзисторов на КНС структурах при легировании канала дозой 0,2 – 0,25 мкКул/см², что позволяет их использовать в прикладных задачах для определения в электролитах уровня рН и концентрацию ионов щелочных металлов.

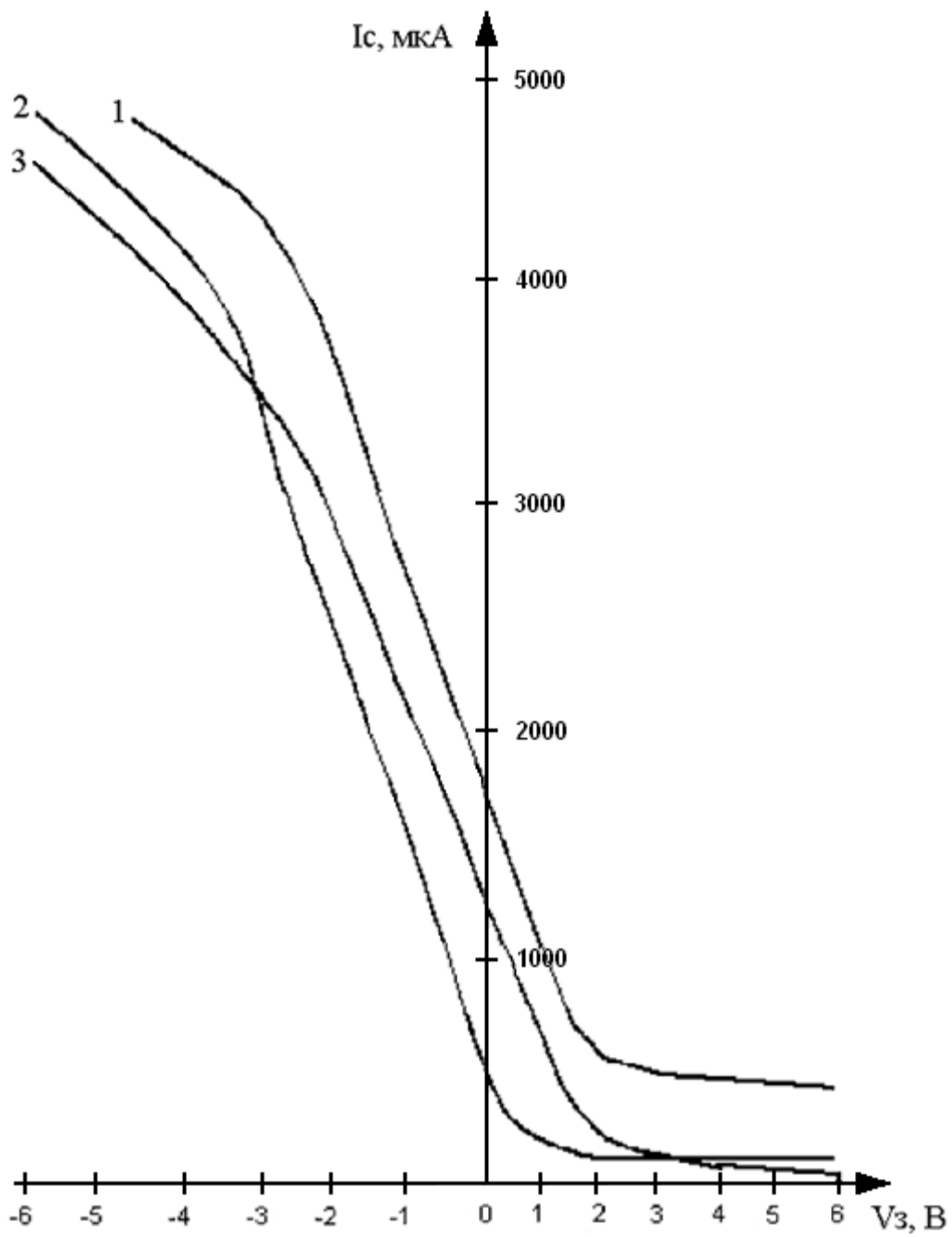


Рис. 4.23. Мембрана №1 КНС р-канал

1 - $\varnothing=0.2$ Ta₂O₅ K=0.66

2 - $\varnothing=0.3$ Ta₂O₅ K=0.75

3 - $\varnothing=0.2$ Si₃N₄ K=0.6

V_c=-3В

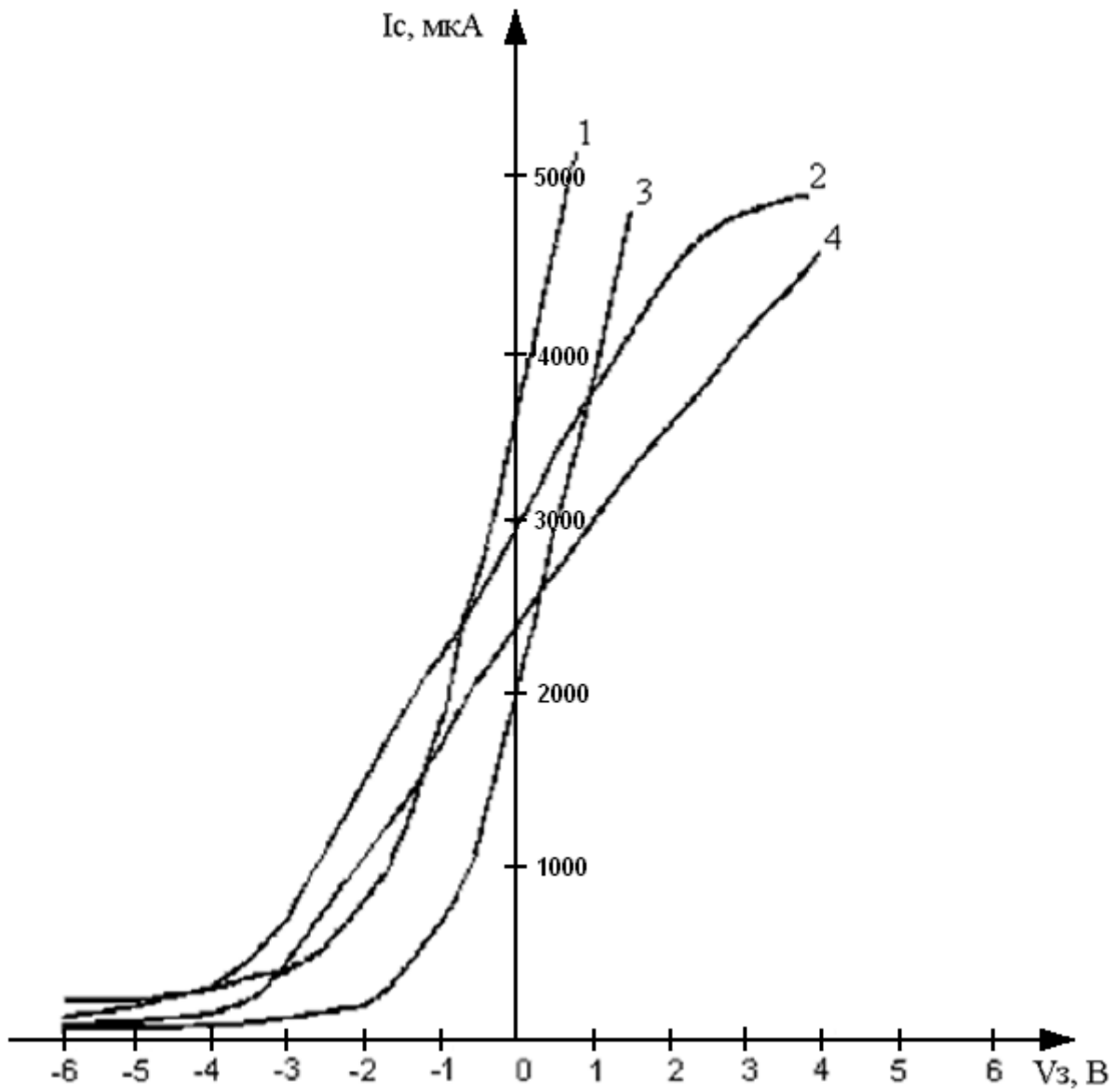


Рис. 4.24. Мембрана №4, p-канал

- 1- $\varnothing=0.1$ Ta₂O₅ K=1.6
- 2 - $\varnothing=0.1$ Si₃N₄ K=0.65
- 3 - $\varnothing=0.15$ Ta₂O₅ K=0.6
- 4 - $\varnothing=0.15$ Si₃N₄ K=0.6

V_c=+3В

ГЛАВА 5. Подсистема моделирования элементной базы радиационно-стойких КМОП БИС КНС

Специфической особенностью разработки ИМС, устойчивых к радиационному воздействию, является значительная трудоемкость, стоимость и продолжительность натуральных испытаний разработанных вариантов микросхем для определения области их надежной работы.

Поэтому, наряду с созданием методик испытаний [53] на радиационную стойкость в процессе разработки и производства БИС, важное значение приобретает моделирование характеристик элементной базы ИС с учетом радиационных эффектов. Расчет на ЭВМ позволяет существенно упростить и ускорить процедуру определения качественных показателей работы схемы и ее радиационной стойкости, а также является эффективным инструментом проведения оптимизации ее характеристик и параметров.

В ряде ведущих мировых фирм, таких как *Rockwell*, *Intersil*, *RCA*, *Medl* и др., ведутся работы по созданию специализированных подсистем проектирования радиационно-стойких ИС. Однако эффективность их применения для создания ИС и БИС с повышенной радиационной стойкостью пока еще не отвечает в достаточной степени требованиям практики. Это объясняется двумя причинами: во-первых, во всех подсистемах анализ радиационной стойкости начинается с транзисторного уровня, в результате чрезвычайно трудно, в случае неудачного решения вносить какие-либо целенаправленные изменения на стадиях выбора как исходных КНС структур, так и режимов технологического процесса. Во-вторых, отсутствуют точные и экономичные, с точки зрения вычислительных затрат, радиационные модели МДП транзисторов, особенно со структурой КНС/КНИ. Этот вид элементной базы является специфичным для изделий электронной техники и разработчики БИС не имеют такого большого теоретического и практического опыта в проектировании, технологии изготовления и применении в реальных объектах,

как в МДП ИС и БИС на объемном кремнии. Публикации по этому вопросу малочисленны, часто носят противоречивый характер и во многих случаях являются тщательно охраняемыми «ноу-хау» и секретами конкретных фирм-производителей.

5.1. Пятиуровневая методика моделирования радиационно-стойких КМОП/КНС БИС

На практике разработки специализированных БИС, однако, показывают экспериментальные результаты радиационных испытаний функционально – законченных микросхем. Они не позволяют получить однозначный ответ, какие конкретно элементы или даже схемные узлы являются “слабым звеном” с точки зрения радиационной стойкости и какие конструктивно-технологические меры следует предпринять разработчику, чтобы улучшить этот показатель с целью обеспечения требований ТУ. Эффективным средством решения этой проблемы является использование специальной методологии предсказания радиационной стойкости ИС.

Такая методология строится на двух ключевых принципах. Во-первых, это применение методов математического моделирования параметров и характеристик, ответственных за радиационную стойкость на каждом из основных этапов технологического процесса изготовления БИС. Во-вторых, это использование результатов измерения и контроля на тщательно подобранном наборе тестовых структур на каждом из этих этапов с целью подтверждения адекватности результатов моделирования и их соответствия требованиям ТУ.

В работах [54,55,56] использовалась трехуровневая методика оценки радиационной стойкости ИС:

первый уровень – отдельных транзисторов, второй уровень – стандартных цифровых и аналоговых ячеек и подсхем и последний третий уровень – функционально законченных ИС или БИС.

Такая методика жестко предполагает, что исходная информация на первом этапе поступает с уже изготовленных транзисторов с конкретными значениями параметров. При таком подходе разработчик практически лишен возможности заранее, на стадии проектирования и разработки варьировать параметрами исходного материала и вносить соответствующие коррективы в технологический процесс с целью повышения радиационной стойкости элементной базы.

Ниже приведена улучшенная пятиуровневая методология (рис. 5.1) предварительной оценки радиационной стойкости ИС и БИС, которая включает по сравнению с ранее известной трехуровневой методикой, два дополнительных уровня анализа и оценки: уровень исходного материала и уровень многостадийного технологического процесса.

Рассмотрим поэтапную реализацию предложенной методики на примерах создания отечественных радиационно-стойких КМОП БИС КНС.

5.2 Методика оценки чувствительности исходных КНС – структур к высокотемпературным обработкам и радиационным воздействиям.

При создании радиационно-стойких КМОП БИС КНС чрезвычайно важное значение имеет выбор исходных гетероэпитаксиальных КНС – структур, в наименьшей степени чувствительных к различным видам термической обработки и радиационного воздействия. Эта задача решается в рамках пятиуровневой методологии (рис.5.1) на этапе №1 «Уровень исходного материала». Продемонстрируем её решение на примере выбора КНС – структур для базового процесса изготовления КМОП БИС КНС для авиакосмической и специальной аппаратуры.

Исследовались эпитаксиальные слои КНС с толщиной слоя кремния 0,6; 0,3 и 0,1 мкм. Слои имели ориентацию на плоскости $\langle 100 \rangle$ и были выращены на сапфировой подложке с ориентацией $\langle 1012 \rangle$. Параметры слоев приведены в табл. 5.1.

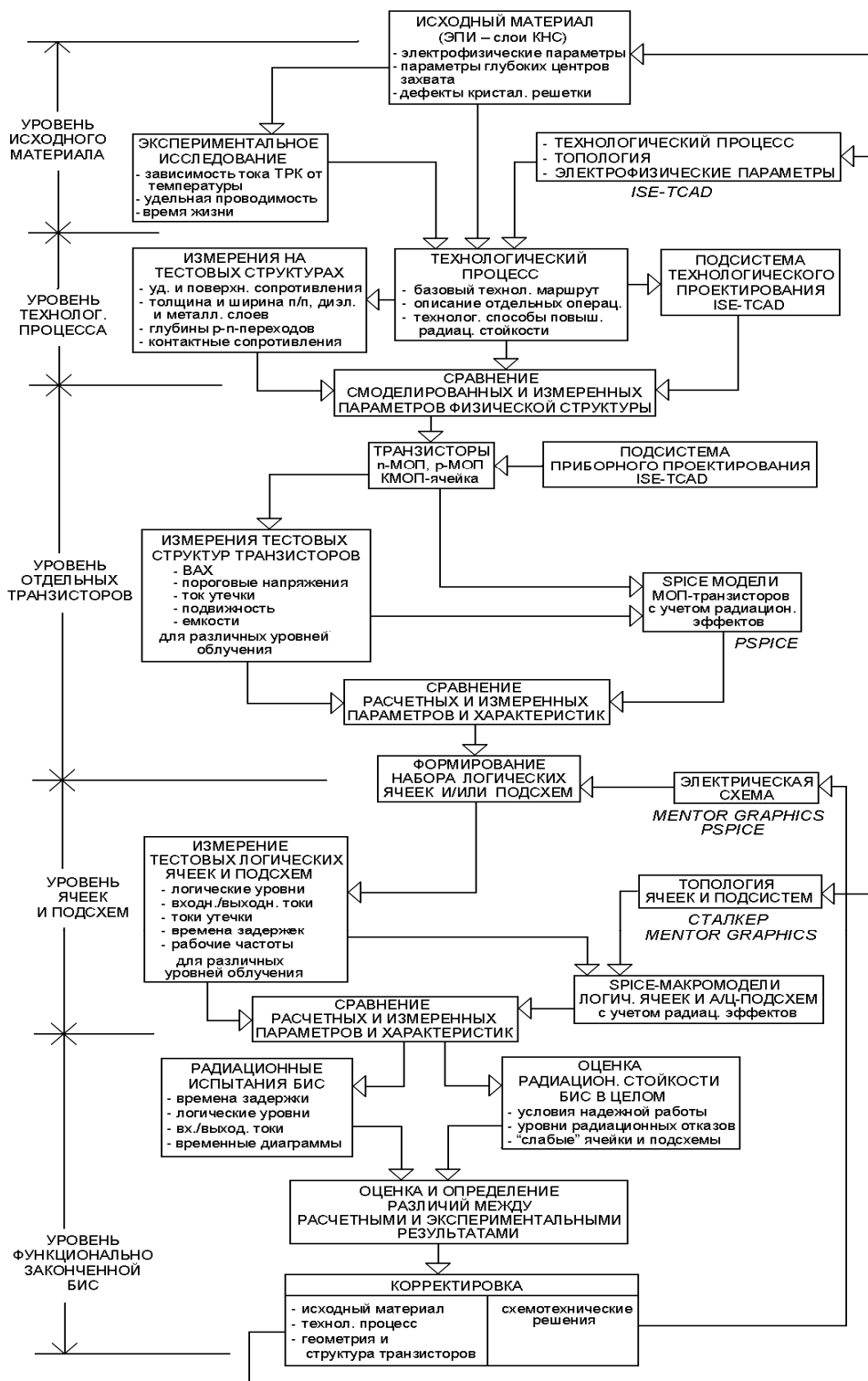


Рис. 5.1. Пятиуровневая методология предварительной оценки радиационной стойкости ИС и БИС

Таблица 5.1. Исследуемые структуры исходного материала
(гетероэпитаксиальные слои КНС)

Толщина слоя кремния, мкм	Удельное сопротивление, Ом·см	Концентрация примеси, см ⁻³
0,6	5-50	$5 \cdot 10^{15}$ - 10^{16}
0,3	Более 50	Менее $5 \cdot 10^{15}$
0,1	Более 50	Менее $5 \cdot 10^{15}$

Очень важно заранее оценить возможное возникновение дефектов в КНС – структурах после прохождения высокотемпературных обработок в ходе технологического процесса и после радиационного воздействия различных видов. С этой целью, исходные КНС–структуры были исследованы:

- 1) после отжига в инертной среде при температурах 890 и 950°С (время воздействия высокотемпературной обработки на образцы было эквивалентно суммарному времени термообработок в реальном технологическом маршруте);
- 2) после низкотемпературного лазерного отжига аргоновым лазером с длиной волны $\lambda=0,53$ мкм в течение 1ч;
- 3) после различных видов радиационной обработки.

В качестве метода исследования глубоких уровней, возникающих в структурах КНС, был выбран метод ТРК, математическое описание которого приведено в разд. 1.2. Исходной информацией для модели являлись измеренные спектры распределения отдельных уровней примесей в структурах КНС полученных с помощью метода термостимулированного разряда конденсатора ТРК, а выходными параметрами – энергия E_i , концентрация N_i и сечение захвата S_i глубоких примесных центров.

Концентрация глубоких центров N_i является наиболее информативным критерием качества исходных КНС структур, используемым для оценки потенциальной радиационной стойкости будущих приборов и схем. Величина N_i должна быть в 5 – 10 раз меньше концентрации легирующей примеси в слое кремния, в противном случае глубокие центры могут снижать подвижность

носителей заряда в слое КНС и являться причиной возникновения токов утечки в КМОП КНС БИС.

Поэтому для рассматриваемых структур КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм (см. табл. 5.1) в параметрах легирования нами было установлено максимальное допустимое значение $N_{tmax}=10^{15}$ см⁻³.

В табл. 5.2 и 5.3 приведены значения концентраций глубоких уровней N_t , возникших в КНС структурах с толщиной слоя кремния 0,3 мкм в результате соответствующих видов обработки. Значения N_t были получены с помощью метода ТРК, подробно описанного в главе 1.

Таблица 5.2. Концентрация глубоких центров, измеренная методом термостимулированной релаксации

Вид термообработки	$N_t, \text{см}^{-3}$
Необработанные образцы	10^{14}
Лазерный отжиг	$8с \cdot 10^{13}$
Высокотемпературный отжиг, при температуре, °С	
890	$5 \cdot 10^{13}$
950	$5 \cdot 10^{14}$

Таблица 5.3. Предварительная оценка радиационной стойкости исходных КНС-структур

Вид облучения	$N_t, \text{см}^{-3}$
γ = Облучение:	
Суммарная Доза, Мрад:	
0,1	10^{13}
1,0	$5 \cdot 10^{14}$
Мощность Дозы, рад/с:	
$5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{13}$
$5 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{13}$
$5 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{13}$
Нейтроны, см ⁻² :	
10^{12}	$2 \cdot 10^{14}$
10^{14}	$3 \cdot 10^{14}$
10^{15}	10^{15}

Из анализа данных табл. 5.2 следует, что в процессе изготовления радиационно-стойких БИС недопустимо использование термического отжига с температурой выше 950°C и нежелательно – лазерного отжига, так как оба эти процесса приводят к появлению высокой концентрации центров захвата N_t в слое кремния.

Данные, приведенные в табл. 5.3, позволяют сделать предварительное заключение о чувствительности исходных КНС-структур к воздействию различных видов облучения. В частности, наибольшая чувствительность наблюдается к воздействию нейтронов: при накопленной дозе нейтронов 10^{15} см⁻² концентрация центров N_t возрастает до своего предельно допустимого значения 10^{15} см⁻³. При воздействии γ -облучения, суммарная доза которого достигает 1,0 Мрад, концентрация центров $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ также близка к кристаллической $N_t = 10^{15}$ см⁻³. Наименьшая чувствительность КНС наблюдается при воздействии γ -импульса. Малые значения $N_t < 10^{14}$ см⁻³ наблюдаются практически вне зависимости от возрастания мощности дозы от $5 \cdot 10^9$ рад/с до $5 \cdot 10^{12}$ рад/с, что свидетельствует о высокой радиационной стойкости исходного материала к воздействию импульсного γ -излучения.

Таким образом, гетероэпитаксиальные структуры КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм могут быть рекомендованы для создания радиационно-стойких КМОП БИС КНС по технологиям, рассмотренным в главе 3.

Исследования показывают, что для образцов КНС с толщиной слоя Si 0,1 мкм (изготовленных по стандартной технологии) концентрация глубоких центров более чем на порядок превышает аналогичную концентрацию в образцах КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм, причем концентрация глубоких центров захвата $N_t > 10^{15}$ см⁻³ сопоставима с концентрацией легирующей примеси, поэтому глубокие центры могут снижать время жизни и подвижность носителей заряда, вызывая увеличение токов утечки и собственных шумов транзисторов. По этой причине отечественные образцы КНС структур с толщиной слоя кремния 0,1 мкм, полученные традиционным методом эпитаксиального наращивания, не используются для создания

радиационно-стойких КМОПБИС КНС.

5.3 Приборно-технологическое моделирование с помощью пакета Synopsys TCAD

Эффективным инструментом для моделирования технологического процесса изготовления КМОП КНС структур и их электрических характеристик является система приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD [7].

Описание системы приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD

Фирма *Synopsys* является признанным лидером в области создания коммерческого программного обеспечения для САПР, технологий и элементной базы микро- и наноэлектроники, оптоэлектроники, микросенсорики. Программные продукты этой компании используются практически во всех ведущих мировых фирмах-изготовителях полупроводниковых приборов и интегральных схем США, Европы, Японии, Южной Кореи.

Программное обеспечение имеет структуру, приведенную на рис. 5.2. и состоит из следующих основных подсистем:

1) GENESIS – программа взаимодействия пользователя с системой, включая языковые и интерактивные, формирования управляющей информации при описании задания на проект, управления базами данных и др.;

2) Sentaurus Process – модули одно- и многомерного моделирования технологических процессов диффузии, ионной имплантации, окисления, эпитаксии, нанесения и травления;

3) Sentaurus Structure Editor – двух- и трехмерный редактор структуры и трехмерный эмулятор процесса. Для более гибкого моделирования 3D структур позволяет совместно использовать операции изменения геометрии структуры и эмуляции процесса;

4) Techplot – модуль визуализации трехмерных геометрических форм исследуемой полупроводниковой структуры и наносимой на нее разностной сетки, а также результатов счета;

Inspect – модуль построения графиков и вывода ВАХ полупроводникового элемента на экран;

5) Sentaurus Device – модуль расчета статических ВАХ, переходных и частотных характеристик 1-, 2-, 3- мерных полупроводниковых структур;

Sentaurus Device Monte Carlo – модуль моделирования ВАХ сложных микронных и субмикронных структур с помощью метода статистических испытаний (Монте-Карло).

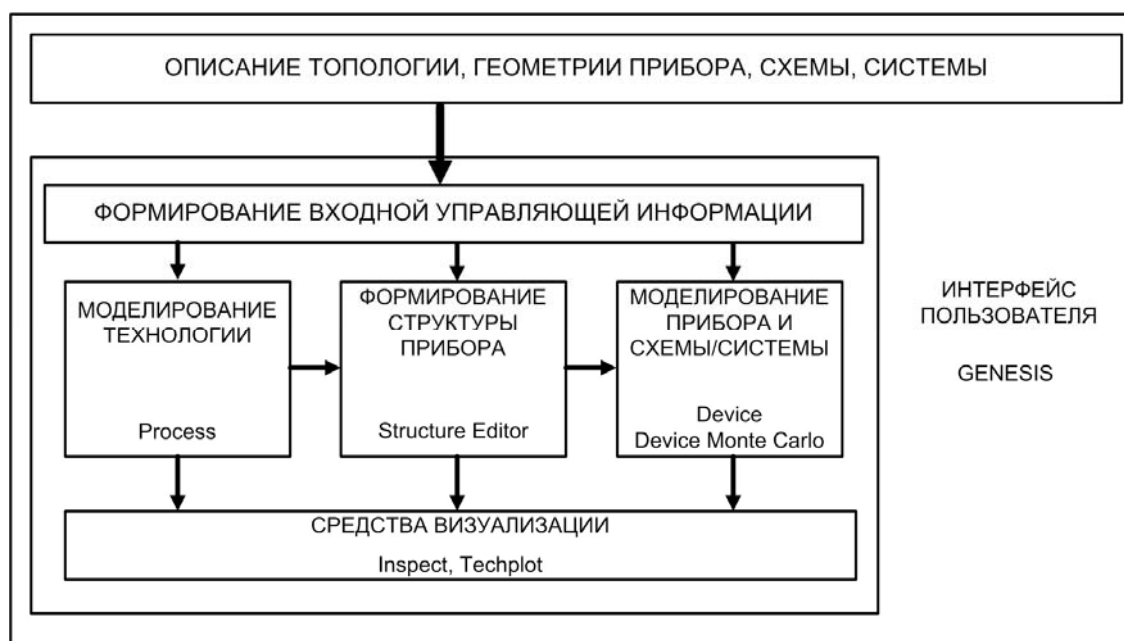


Рис. 5.2. Структура САПР Synopsys TCAD.

Все подсистемы описанного пакета протестированы на демонстрационных примерах, подтверждающих их работоспособность и функциональные возможности.

При моделировании КМОП ячейки со структурой КНС использовались модули Sentaurus Process и Sentaurus Device. Далее приведено краткое описание этих модулей.

Модуль *Sentaurus Process*

Process представляет собой систему программ, которая позволяет моделировать технологические процессы в двух основных направлениях. Пользователь в состоянии решать уравнения как непрерывные, так и зависящие от времени непосредственно после окончания моделирования технологического процесса (в большинстве случаев после нанесения сетки). Система использует простейшие элементы на треугольной сетке и простейшие структуры данных, которые позволяют организовать единую пользовательскую среду (график и входной синтаксис).

Process обеспечивает пользователю удобный язык описания исходных данных технологического процесса во входном файле. Перед началом процесса моделирования (длительного) файлы с исходными данными проверяются на наличие ошибок синтаксиса. Модуль поддерживает два режима: пакетный - исполнение в фоновом режиме и интерактивный - контроль исполнения команд входного файла, оснащенный удобным графическим интерфейсом. Входной файл представляет последовательность команд, моделирующих технологические операции.

Команда *SUBStrate* описывает исходную подложку, на основе которой создается структура. В команде описывается материал подложки и ее ориентация, типозадающая примесь и ее концентрация или сопротивление подложки (в Ом•см). Так же задаются толщина и позиция поверхности подложки во внутренней системе координат.

Для описания процессов осаждения материала и его параметров используется команда *deposit*. Параметрами команды являются осаждаемый материал, толщина материала или время и скорость роста, а также концентрация примеси, если нужно осадить легированный материал. Моделирование анизотропного осаждения требует задания модели и параметров для изменения скорости роста в угловых областях. Дополнительные модели можно задавать с целью удаления материала

специальным образом. Это может быть использовано для моделирования эффектов распыления.

Для моделирования процессов литографии перед операциями травления, имплантации и др. используется команда *mask*. Параметрами команды являются материал маски, ее толщина и координаты граней маски.

Любые слои материала, контактирующие с газовой средой, могут быть удалены командой *ETCHing*. Если не задан материал, то все слои материала одного типа, контактирующие с газовой средой будут удалены. Если не задается полное удаление слоев, используются время и скорость травления. Можно указать толщину удаляемого материала или прекращение травления при достижении слоев иной топологии. Могут быть заданы изотропные и неизотропные составляющие скорости травления.

Для моделирования процессов ионной имплантации в команде *implantation* необходимо указать имплантируемую примесь, энергию и дозу имплантации. Для вычисления профиля легирования используются аналитические функции подбора дозы. Кроме того можно использовать метод Монте-Карло со специальной версией *CrystalTrim*. По умолчанию точки функции распределения вычисляются из энергии имплантации параметров элемента соотносящиеся с внутренней таблицей. Точки так же могут быть определены отдельно для каждого материала.

Все высокотемпературные процессы описываются командой *DIFFusion*. Температура и время процесса или окончательная толщина должны задаваться в параметрах. Параметр *ATMOsphere* описывают среду процесса, по умолчанию среда инертная. Для изменяющейся температуры предусмотрен параметр скорости изменения температуры *TempRate* (К/мин). Либо можно задать список временных интервалов и соответствующие значения температур. Время процесса можно задать указанием скорости изменения температуры и температур в начале и конце процесса. Для процессов окисления необходимо задать толщину оксида, которая конвертируется во время окисления. Существует возможность детального описания атмосферы процесса.

Постоянная примесь в поликристаллических слоях, необходимая для увеличения скоростей окисления при больших концентрациях примеси, может задаваться при осаждении поликремния или в команде *DIFfusion*. При моделировании термообработки кремниевой подложки после процесса эпитаксии, должны быть описаны постоянное парциальное давление и продолжительность промежуточной фазы. При эпитаксиальном наращивании должны указываться скорость роста (нм/мин) и время. К тому же должно быть задано парциальное давление *PP* или равновесная концентрация эпитаксиального слоя.

Модуль Sentaurus Device

SDevice – программа многомерного электротермического моделирования одно-, двух- и трехмерных полупроводниковых приборов и цепей. Основные возможности программы SDevice представлены ниже:

Виды приборов	Виды условий	Моделирование цепей	Методы и условия решения
Одно-, двух- и трехмерные	Термодинамика	Электро-термические модели	Постоянный ток
	Гидродинамика		Переменный ток
	Диффузионно-дрейфовая модель		Переходные процессы
	Оптическая генерация		
Двумерные цилиндрические	Поверхностные эффекты	Моделирование аналогично Spice	Метод Монте-Карло
	Магнитосенсоры		
	Пьезоэлектронные эффекты		Метод итераций

SDevice предоставляет возможность моделирования как отдельных полупроводниковых приборов, так и включения их во внешние цепи в единичном и двойном экземпляре прибора.

Полупроводниковый прибор описывается указанием файлов, содержащих сведения о распределении примесей и о расчетной сетке (в раздел File), описанием контактов и термических режимов (в разделах Electrode,

Thermode и Interface), заданием физических моделей (раздел Physics), а также указываются необходимые для сохранения данные (раздел Plot).

Секция File

В этой секции задаются имена файлов, содержащие данные о конечно-разностной сетке для данного прибора, данные о концентрациях примесей в областях прибора, файлы параметров для моделей физических моделей секции Physics.

Секция Electrode

Электрические граничные условия описываются в секции Electrode. Кроме того, для электродов можно задать дополнительные параметры: сопротивление контакта, граничный ток, коэффициент площади электрода, контакт Шоттки, модель контакта по Шенку, скорость рекомбинации носителей.

Секция Thermode

В этой секции также описываются определенные контакты, как и в предыдущей. Здесь в скобках должны быть указаны имена термоэлектродов и температуры в них.

Секция InerfaceConditions

Этот раздел входного файла используется для описания условий на границах раздела различных областей. Номера областей можно получить с помощью модуля Sentaurus Structure Editor или Techplot. Ключевыми параметрами в данной секции являются: заряд на границе раздела, скорость поверхностной рекомбинации, плотность поверхностных состояний, учет туннелирования носителей через оксид, учет инжекции горячих носителей и т.д.

Учитывая большие универсальные возможности пакета программ Synopsys TCAD, на ряде отечественных электронных предприятии были проведены работы по адаптации пакета Synopsys TCAD к решению задач

моделирования КМОП/КНС технологий и приборов и созданию на его основе АРМ технолога [63].

В качестве примера, иллюстрирующего возможности технолога, разработанного АРМ, рассмотрим результаты моделирования основных этапов базового технологического маршрута изготовления 2 мкм – КМОП БИС на КНС – структурах с толщиной слоя кремния 0,3 мкм, а также результаты анализа физической структуры n- и p- канальных МОП – транзисторов и их электрических характеристик. Для технологов эти результаты явились чрезвычайно полезной дополнительной информацией, на основании которой данный технологический маршрут был практически отработан и внедрен в реальное производство.

Результаты технологического моделирования позволили сделать следующие выводы:

- предложенный технологический маршрут в целом пригоден для изготовления КМОП/КНС – структур с минимальными проектными нормами 2 мкм и, при соответствующих доработках, для изготовления КМОП/КНС – структур с минимальными размерами 1,5 – 1,25 мкм (см разд. 3.3);
- режимы и параметры основных операций, формирующих конечную физическую структуру КМОП – прибора, могут быть рекомендованы технологам для практического использования в условиях реального производства.

В ходе работы моделировались технологические параметры приборов для двух технологических процессов (табл. 5.4).

Таблица 5.4.

Параметр	Длина канала 1 мкм		Длина канала 2 мкм	
	Транзистор			
	п-канальный	р-канальный	п-канальный	р-канальный
Глубина залегания р-п переходов “сток-подложка” и “исток-подложка”, мкм	0,12	0,24	0,12	0,24
Распределение примеси в стоковой области, $1/\text{см}^3$	$2 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{20}$
Распределение примеси в канале, $1/\text{см}^3$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{17}$
Длина области боковой диффузии, мкм	0,15	0,25	0,1	0,2
Эффективная длина канала, мкм	0,7	0,5	1,8	1,6

Приборно-технологическое моделирование показало, что в приборах, сделанных по технологии «с длиной канала 1 мкм», глубины залегания р-п переходов, эффективные длины каналов, распределение примесей в стоковой области и в канале, а также длина области боковой диффузии мало отличаются от соответствующих параметров в приборах, сделанных на основе технологического процесса «с длиной канала 2 мкм». Разрезы полученных структур представлены ниже, на рис.5.3 – 5.9;

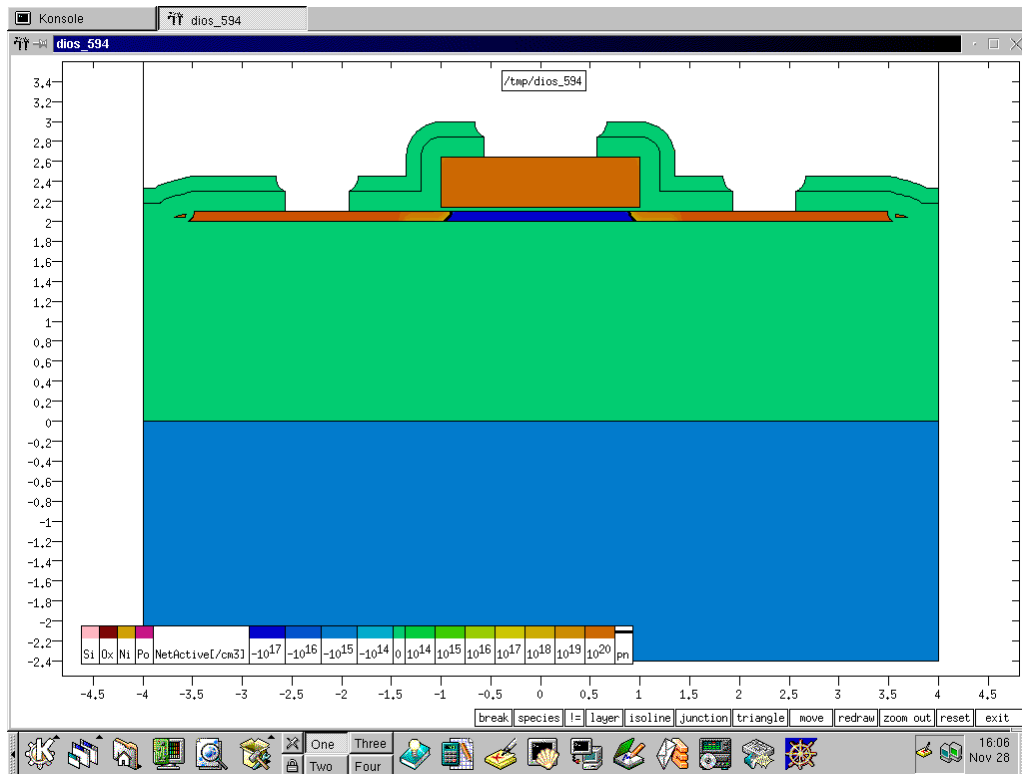


Рис. 5.3. Структура *n*-канального транзистора с активным слоем 0,1 мкм, длиной канала 2 мкм. Технология двухкарманная

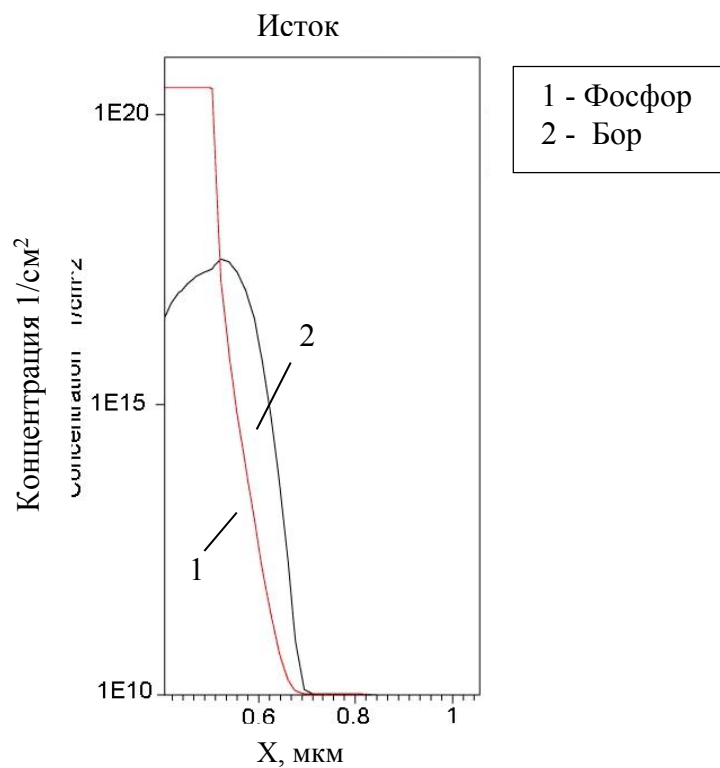


Рис. 5.4. Распределение концентрации примесей в области истока.

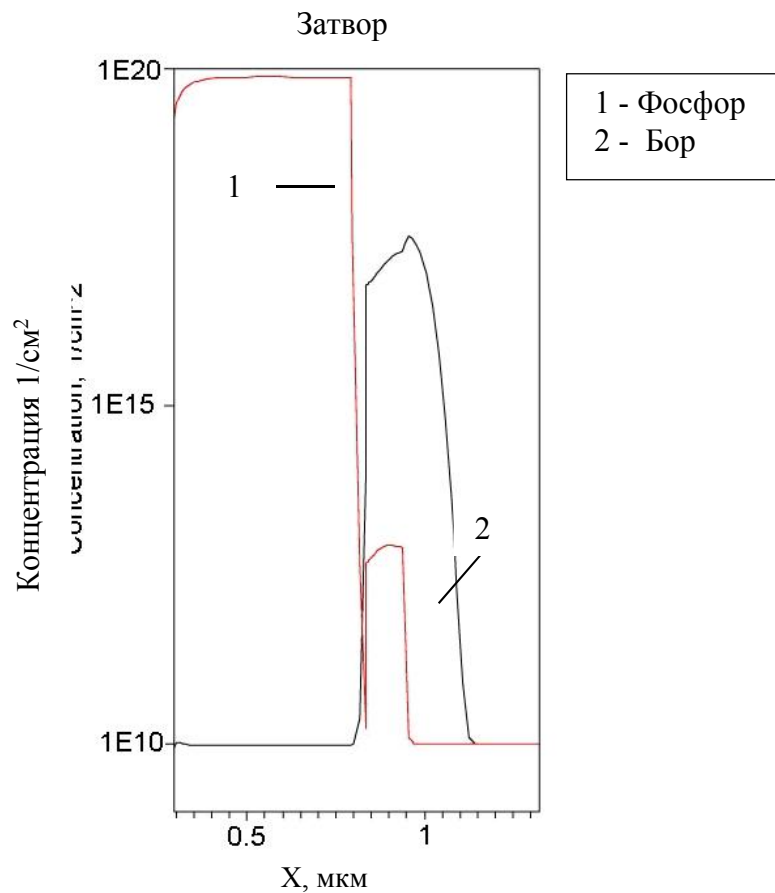


Рис. 5.5. Распределение концентрации примесей в области затвора.

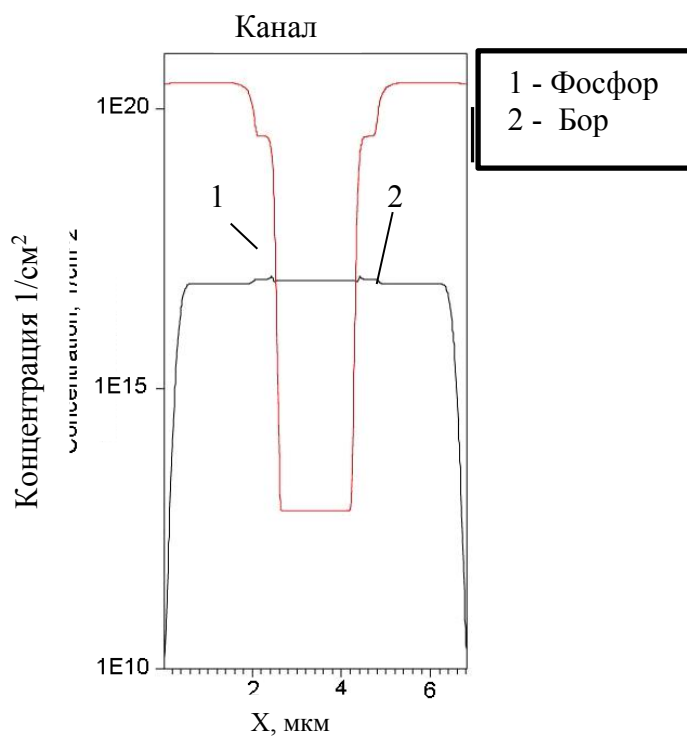


Рис. 5.6. Распределение концентрации примесей по каналу.

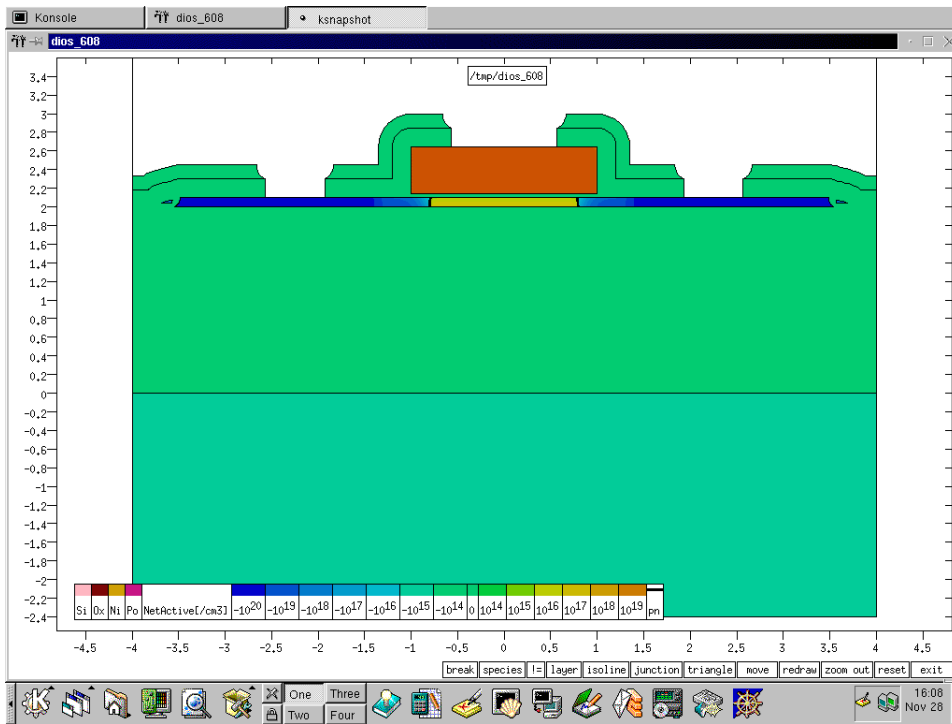


Рис. 5.7. Структура p-канального транзистора с активным слоем 0,1 мкм, длиной канала 2 мкм. Технология двухкарманная

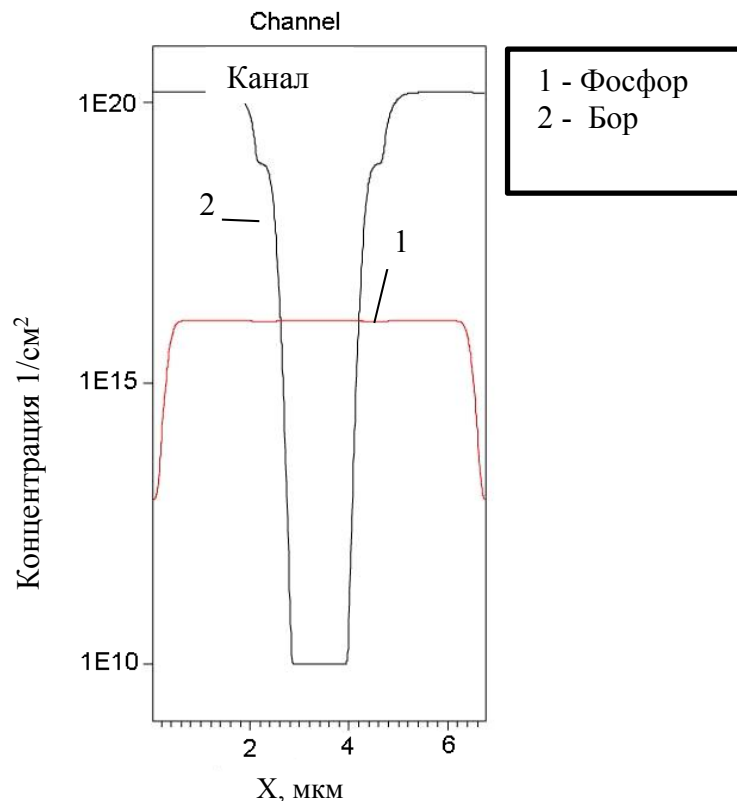


Рис. 5.8. Распределение концентрации примесей по каналу.

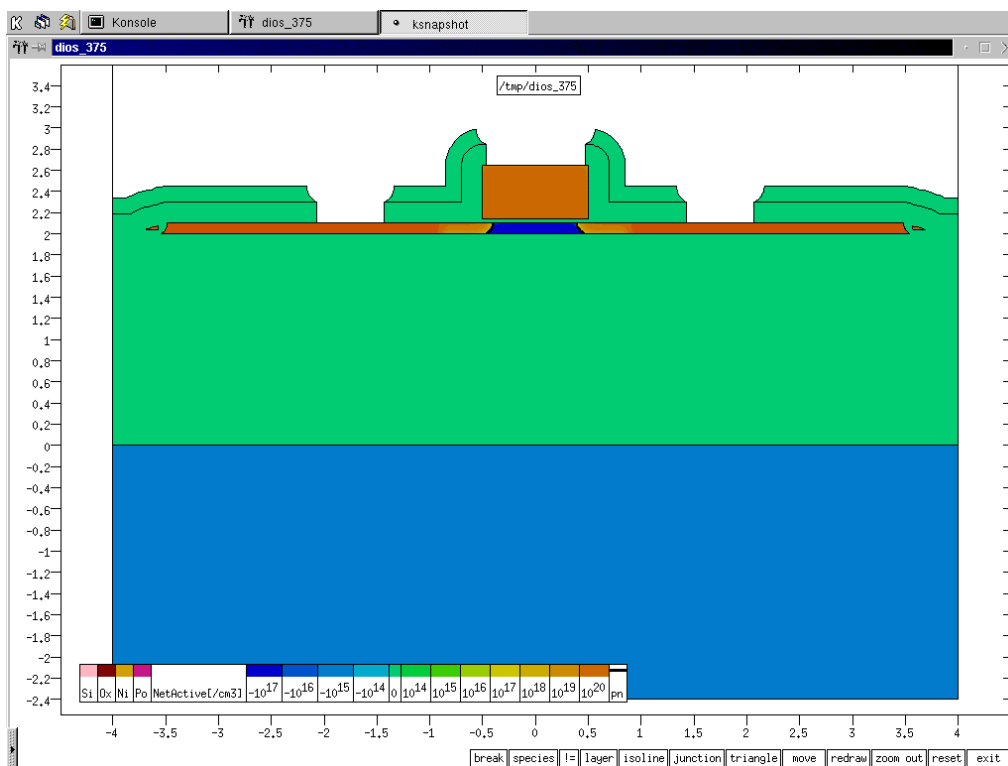


Рис. 5.9. Структура n-канального транзистора с активным слоем 0,1 мкм, длиной канала 1 мкм. Технология двухкарманная.

Для оценки возможностей технологического маршрута SOS4 и пригодности программного обеспечения для работы с UTSI-технологией, проводилось моделирование электрических характеристик КНС структур с ультратонким слоем кремния с помощью системы приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD.

С помощью модуля SDevice проводилось моделирование статических вольтамперных характеристик приборов и определение по ним электрических характеристик и параметров приборов.

В соответствии с особенностями КНС были внесены изменения в параметры некоторых моделей, используемых при расчете. По сравнению с моделями для КМОП структур на объемном кремнии была уменьшена подвижность в моделях рекомбинации для электронов и для дырок, уменьшено время жизни носителей, а так же изменена диэлектрическая проницаемость для изолирующей подложки. При моделировании в секции Electrode не был задан контакт к подложке, так как у приборов со структурой КНС подложка

полностью изолирована, что сказывается на виде стоковых характеристик прибора. В секции InterfaceCondition был увеличен заряд на границе раздела подзатворный диэлектрик – кремний.

В секции Physics указаны для подвижности: зависимость от легирования, зависимость подвижности от поля; для генерации-рекомбинации: рекомбинация по Холлу-Шокли-Риду, Оже-рекомбинация.

Расчет токов и напряжений проводился в рамках диффузионно-дрейфовой модели, решалось уравнение Пуассона, уравнение непрерывности для электронов и уравнение непрерывности для дырок.

По данным моделирования построены входные (Рис. 5.10 – 5.11) и выходные (Рис. 5.12– 5.13) характеристики для всех приборов. Из полученных сток - затворных характеристик определялось пороговое напряжение. Пороговое напряжение определяется из условия $I_c(U_p) = 50$ нА.

Полученные параметры сведены в Таблицу 5.5.

Таблица 5.5. Смоделированные электрические параметры приборов в ультра-тонком слое кремния

Параметр	Длина канала 1 мкм		Длина канала 2 мкм	
	<i>n</i> -МОП	<i>p</i> -МОП	<i>n</i> -МОП	<i>p</i> -МОП
Пороговое напряжение, В	1,75	-0,7	1,90	-1,1

В табл. 5.6. приводится сравнение экспериментальных значений порогового напряжения, рассчитанных с небольшим изменением в технологии, со значениями UTSi-технологий.

Таблица 5.6. Сравнение экспериментальных и смоделированных значений параметров КМОП КНС транзисторов в ультратонком слое кремния

	Эксперимент		UTSi – технология	
	Длина канала 1 мкм	Длина канала 2 мкм	<i>n</i> -МОП	<i>n</i> -МОП
	<i>n</i> -МОП	<i>n</i> -МОП		
Пороговое напряжение, В	0,62	0,77	0,35	0,8

Как видно из табл. 5.6, пороговое напряжение полученных моделей отличается от порогового напряжения UTSi-технологии. Поэтому для получения порогового напряжения более близкого к пороговым напряжениям UTSi-технологии, была откорректирована технология: была изменена доза при ионной имплантации бора ($0,2 \text{ мкКл/см}^2$ вместо заданной $0,5 \text{ мкКл/см}^2$) при создании р-кармана. Что привело к уменьшению порогового напряжения примерно на один вольт и практическому совпадению его со значениями UTSi-технологии.

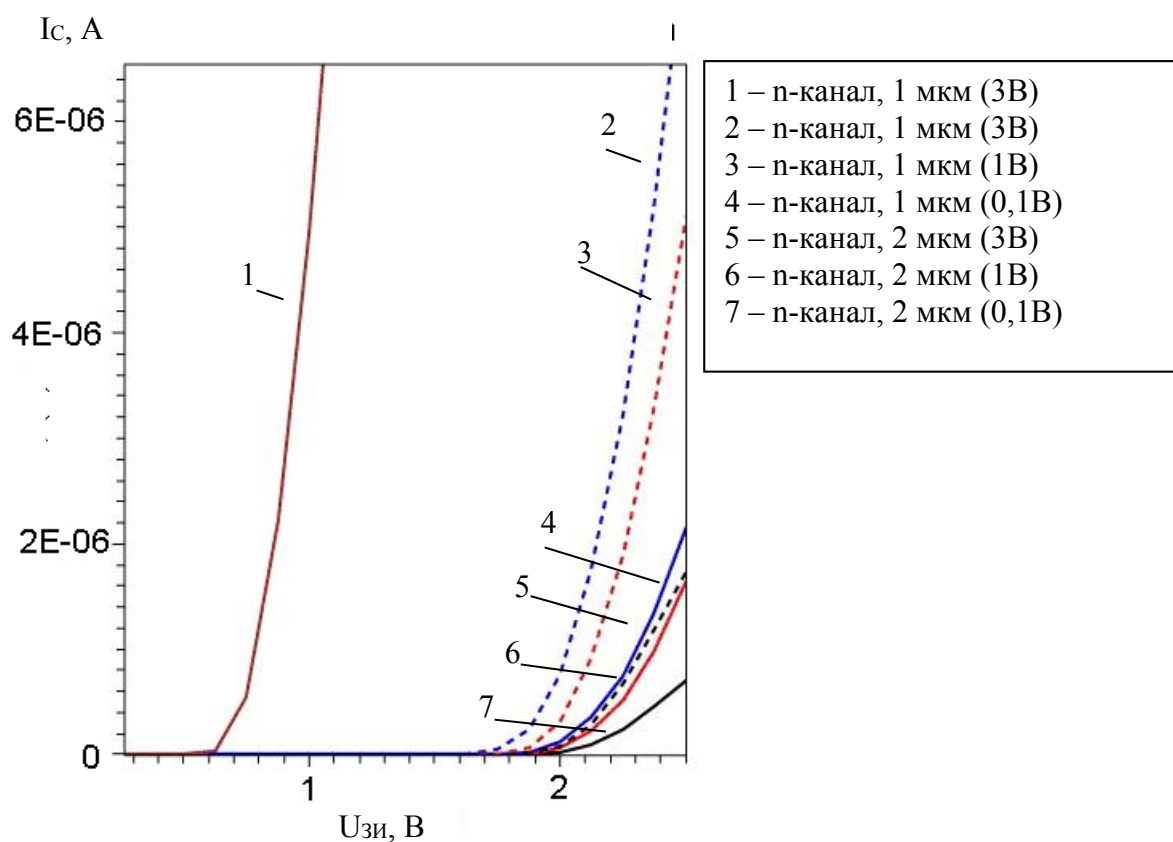


Рис. 5.10. Входные характеристики n-канальных транзисторов с длиной канала 2 и 1 мкм, изготовленных по UTSi – технологии, с толщиной активного Si-слоя 0,1 мкм

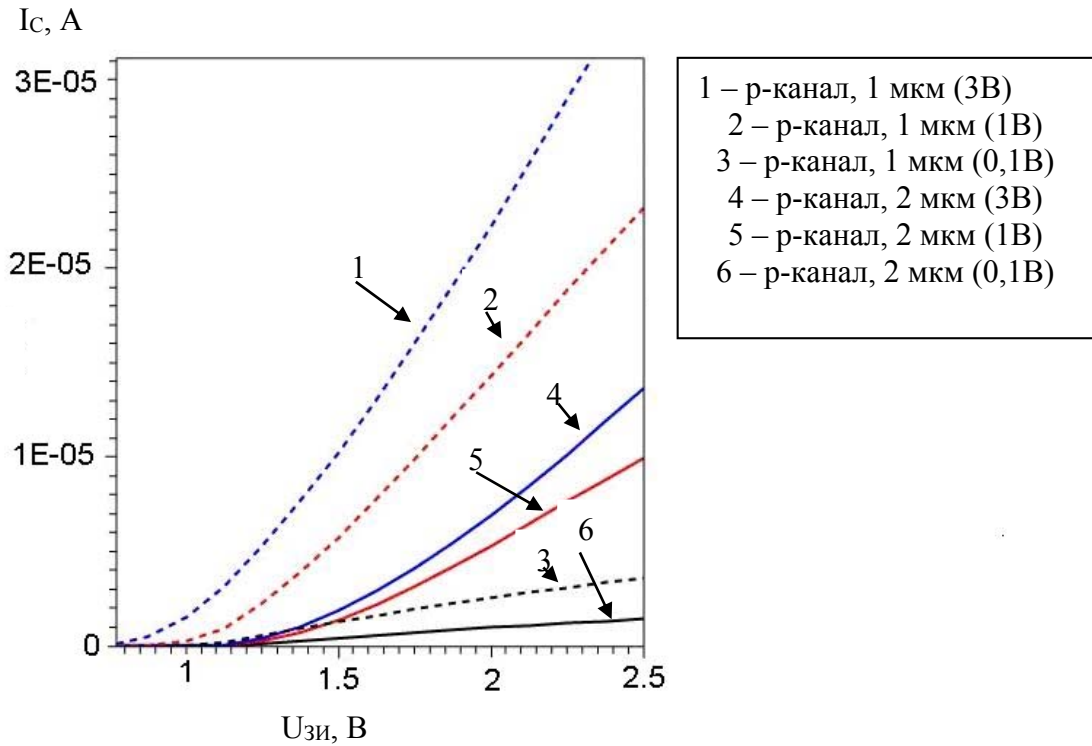


Рис. 5.11. Входные характеристики p-канальных транзисторов с длиной канала 2 и 1 мкм, изготовленных по UTSi – технологии, с толщиной активного Si-слоя 0,1 мкм

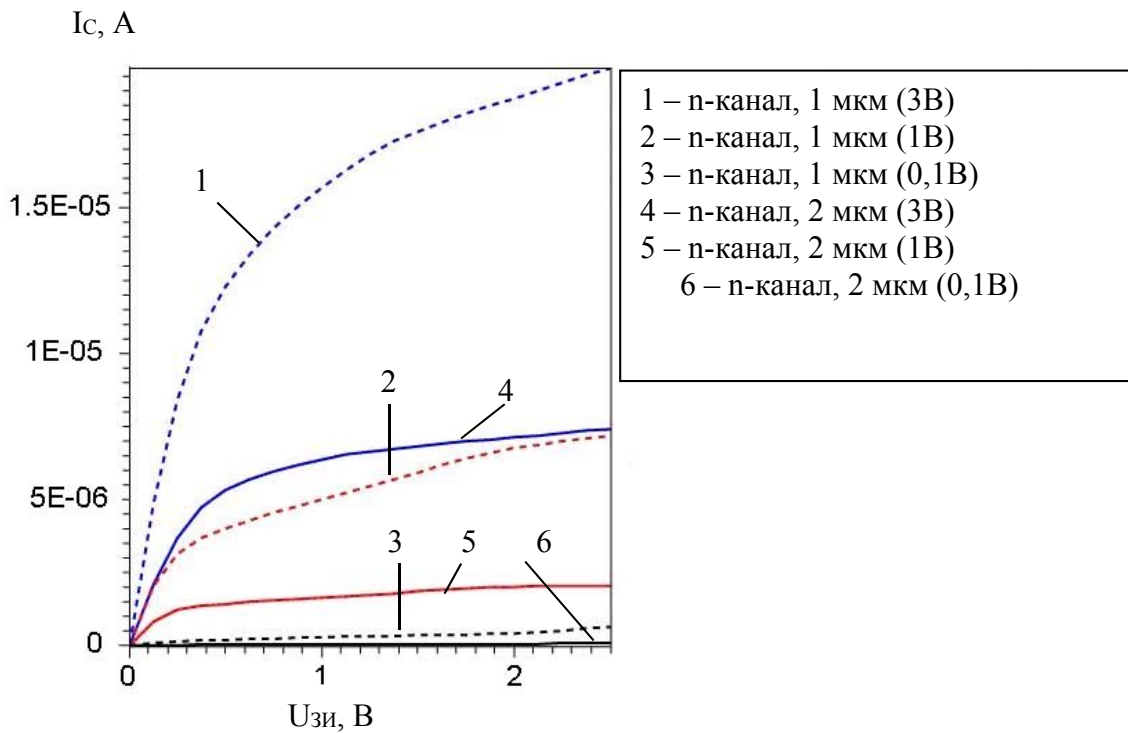


Рис. 5.12. Выходные характеристики n-канальных транзисторов с длиной канала 2 и 1 мкм, изготовленных по UTSi – технологии, с толщиной активного Si-слоя 0,1 мкм

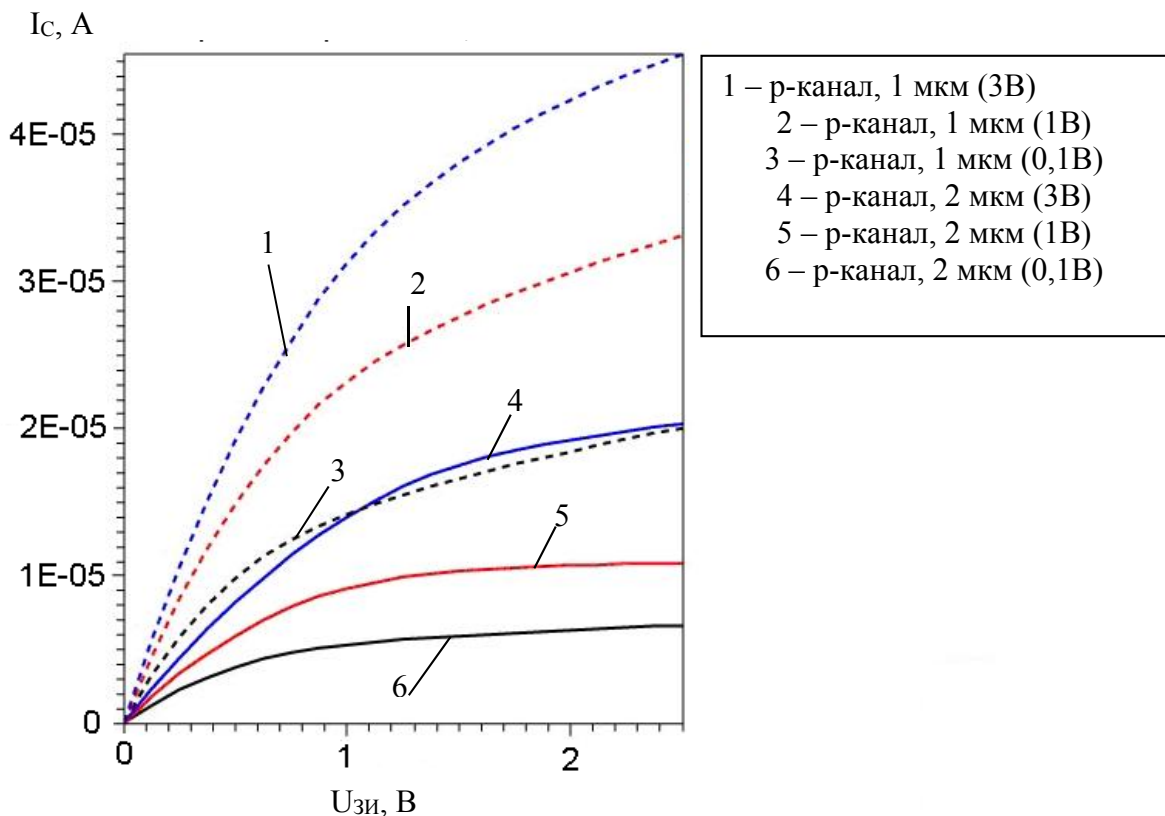


Рис. 5.13. Выходные характеристики p-канальных транзисторов с длиной канала 2 и 1 мкм, изготовленных по UTSi – технологии, с толщиной активного Si-слоя 0,1 мкм

5.4. Схемотехнические модели МОП-транзисторов на изолирующей подложке, учитывающие влияние радиационных эффектов

Эффективность схемотехнического моделирования во многом определяется используемыми математическими моделями элементов схем и способом включения в модель зависимостей изменения параметров моделей от уровня радиационного воздействия, а также корректностью решения задачи идентификации этих параметров. В настоящее время для расчета статических и динамических характеристик схем широко используются различные программы схемотехнического анализа, как отечественные, так и зарубежные, в частности SPICE.

К сожалению, следует отметить, что в настоящее время отсутствуют специализированные системы проектирования радиационно-стойких КНС/КНИ

схем. В стандартных программах схемотехнического анализа модели элементов схем не связаны с радиационным воздействием. В то же время существует большое число работ по моделированию на физическом уровне воздействия радиации на характеристики и параметры МДП транзисторов на диэлектрической подложке. Для эффективного моделирования КНС/КНИ схем в условиях облучения необходимы схемотехнические модели элементов, которые бы учитывали все (или почти все) физические эффекты, могли быть использованы в современных программах схемотехнического анализа и не увеличивали бы заметно времени счета.

Особенности схемотехнического моделирования МДП приборов со структурой КНС/КНИ

МДП транзисторам, выполненным на диэлектрической подложке, присущи свои особенности. К ним, прежде всего, относится плавающий потенциал подложки, приводящий к "кинк" эффекту" на выходных $I_{cu}=f(U_{cu})$ характеристиках. "Кинк" эффект наблюдается в пологой области характеристик, когда (в n-канальных транзисторах) дырки, генерированные в результате ударной ионизации в стоковом переходе, попадают в плавающую подложку. Причина этого эффекта заключается в том, что носители заряда, ускоряемые полем стока, приобретают энергию, необходимую для создания электронно-дырочных пар за счет лавинной генерации в переходе сток – подложка. Под влиянием продольного и поперечного электрических полей происходит разделение зарядов: одни дают вклад в ток стока, другие накапливаются в подложке, В объемных транзисторах этого не возникает, так как подложка имеет контакт и генерированные носители уходят во внешнюю цепь. Избыток дырок смещает потенциал подложки и уменьшает пороговое напряжение, приводя к скачкообразному росту тока стока. Накопившиеся в подложке носители приводят к отпираанию перехода исток – подложка, включению паразитного биполярного транзистора со

структурой "исток – подложка – сток", инжекции дополнительных носителей в подложку, и дальнейшему росту тока стока. Ток лавинной генерации $I_{проб}$ является генератором тока, управляющим базой биполярного транзистора. В случае изолированной подложки потенциал перехода база – эмиттер управляется только этим током. Эффективность работы биполярного транзистора, т.е. степень его проявления на стоковых характеристиках МДП КНИ транзистора, зависит как от генератора тока в цепи базы, так и от его коэффициента передачи тока. Поскольку базовый ток является током лавинной генерации, он сильно зависит от электрического поля и существенно возрастает в сильно легированных подложках и при больших полях. Ток лавинной генерации существенно больше для n -канальных приборов, чем для p -канальных. Это обусловлено различными коэффициентами лавинной генерации для дырок и электронов. Коэффициент усиления тока биполярного транзистора зависит от геометрии прибора, технологических особенностей, от приложенных напряжений. Коэффициент усиления увеличивается с уменьшением длины канала и степени легирования, а также увеличением напряжений на стоке и затворе. Данный коэффициент сильно зависит от времени жизни носителей в кремниевой подложке.

Для кремниевых подложек, выращенных на сапфире, времена жизни неосновных носителей лежат в диапазоне $10^{-8} - 10^{-10}$ с. При таких малых величинах времени жизни коэффициент усиления тока очень мал. Он становится заметным лишь при длинах канала < 1 мкм. При длинах канала 1 мкм, коэффициентом усиления тока биполярного транзистора можно пренебречь.

При изменении потенциала затвора изменяется потенциал подложки за счет емкостной связи и происходит инжекция дырок переходом исток – подложка. Это изменяет величину порогового напряжения и включает паразитный биполярный транзистор. Избыточные дырки, накопившиеся в подложке, не могут сразу покинуть ее. Изменяя потенциал подложки, они

приводят к избыточному току стока. Отмеченный эффект может оказывать заметное влияние на задержки в цифровых МДП схемах и ухудшает линейность аналоговых КМОП схем на диэлектрической подложке.

Другой эффект, который может иметь место в транзисторах с плавающей подложкой, это кратковременное протекание тока через запертый транзистор, у которого сначала длительное время исток и сток находились под высоким потенциалом, а затем потенциал истока, например, уменьшился до потенциала затвора, т.е. до нуля. В то время, когда потенциал истока и стока выше потенциала затвора, подзатворная область заряжается токами утечки $p-n$ -переходов сток (исток) – подзатворная область. При высоком качестве $p-n$ -переходов этот процесс может занимать сотни миллисекунд, а при плохом – единицы. При понижении потенциала истока через транзистор протекает ток разряда носителей из подзатворной области, усиленный паразитным биполярным транзистором. Суммарный заряд, протекающий в цепи сток – исток может превышать заряд емкости “подзатворная область – затвор” в несколько раз в зависимости от длины канала, концентрации примеси в подзатворной области, времени жизни носителей в ней и т.д., т.е. от коэффициента усиления биполярного транзистора.

Описанный эффект может вызывать нарушение работы таких узлов, как транзисторы связи в ячейках памяти ОЗУ, многоходовые схемы “ИЛИ – НЕ” и др. при малой частоте обращения. Данный эффект сильнее выражен у p -канальных транзисторов.

Для МДП транзисторов, выполненных по КНИ/КНС технологиям, с тонким (до 0.1 мкм) слоем кремния характерна работа в режиме полного обеднения подложки. Это приводит к тому, что в таких транзисторах эффекты узкого и короткого каналов проявляются слабее, чем для объемных МДП транзисторов и практически отсутствуют эффекты, связанные с плавающим потенциалом подложки.

Моделирование транзисторов, изготовленных по технологии кремний на сапфире, рассмотрено в работах [35, 55,56]. В них приведены выражения для

тока лавинной генерации, зависимости напряжения пробоя от размеров и конструктивно-технологических параметров транзистора. Предложенная модель за счет своей простоты может быть использована для целей схемотехнического моделирования.

Вопросы моделирования особенностей переходных процессов в МОП КНИ схемах, связанных с плавающей подложкой, рассмотрены в работе [57]. В ней приведены зависимости токов и времен задержки от состояния подложки и потенциала нижнего затвора. Показана зависимость быстродействия МОП КНИ схем от постоянных во времени процессов перезарядки емкостей подложки.

Таким образом, схемотехническая модель МДП транзистора на диэлектрической подложке должна включать схемы, учитывающие следующее:

- плавающий потенциал подложки;
- статический кинк эффект на выходных характеристиках;
- паразитный биполярный эффект;
- накопление заряда в подложке и изменение ее потенциала во время переходных процессов;
- паразитный ток утечки по нижней (нижней и боковой) поверхности кремниевого островка, в котором находится транзистор, после облучения.

Схемотехнические Spice-модели КНИ/ КНС МОПТ

Компактные схемотехнические модели являются связующим звеном между технологическим и схемотехническим моделированием. Для учёта влияния эффектов плавающего потенциала рабочей области КНИ / КНС МОПТ на схемотехническом уровне при моделировании КНИ / КНС БИС необходимо использовать эффективные с точки зрения вычислительных затрат, достаточно точные и компактные модели КНИ / КНС МОПТ.

В настоящее время в практике схемотехнического проектирования КНИ / КНС КМОП БИС используются несколько специализированных моделей КНИ /

КНС МОПТ, которые в той или иной степени удовлетворяют требованиям разработчиков - схемотехников и могут быть использованы для расчёта приборов со структурой КНИ / КНС. Наиболее известные из них:

- BSIMSOI совместной разработки Калифорнийского университета в Беркли и компании IBM, США (реализована во многих современных САПР);
- UFSOI разработки Флоридского университета, США (реализована в программах HSPICE и SOISPACE);
- SOI / SOS-MIEM разработки Московского государственного института электроники и математики, Россия (макромодель для Spice);
- FDSOI совместной разработки Университета Балеарских островов, Испания, и Лёвенского Католического университета, Бельгия (реализована в программе IsSpice4);
- EKV разработки Швейцарского федерального технологического института, Швейцария (реализована во многих современных САПР), и др.

Далее будут более подробно рассмотрены особенности организации вышеперечисленных моделей, систем их параметров, учёта эффектов плавающего потенциала рабочей области, а также проведено сравнение процедур идентификации.

Обобщённая блок-схема процесса экстракции

При любом выбранном методе идентификации одним из основных элементов этой процедуры является сравнение экспериментальных характеристик прибора с расчётными, полученными с использованием текущего набора параметров. На обобщённой блок-схеме процесса (рис.5.14) этап сравнения показан в виде ромба с надписью «Погрешность приемлема». Начальный набор параметров может быть получен из руководства пользователя на основе известных данных о структуре прибора и используемой технологии. Последовательные итерации включают в себя модификацию параметров (по одному или группами). Затем идет повторное моделирование с новым набором параметров, после чего снова сравнение. Окончательный набор параметров

должен позволять расчётным характеристикам с достаточной степенью точности совпадать с экспериментальными. Абсолютно точное совпадение невозможно в принципе, но конкретная степень соответствия (выражаемая, например, среднеквадратическим или максимальным отклонением) должна отвечать требованиям решаемой задачи.

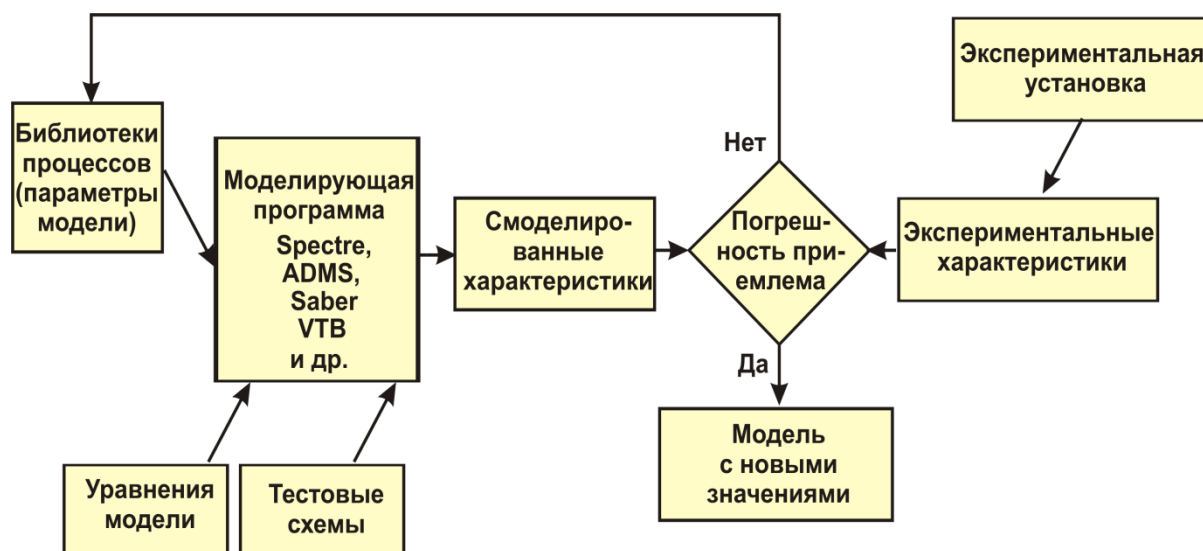


Рис.5.14. Обобщённый процесс экстракции

Модель BSIMSOI

Модель BSIMSOI разработана для КНИ МОП транзисторов в Калифорнийском университете в Беркли группой под руководством проф. Ч. Ху при участии фирмы IBM. Данная модель построена на базе модели BSIM3: она использует большинство уравнений и параметров базовой модели для описания поведения внутренней МОП структуры и учитывает дополнительные эффекты, возникающие вследствие плавающего потенциала рабочей области.

BSIMSOI, одна из наиболее точных компактных моделей КНИ / КНС МОПТ, моделью активно пользуются специалисты фирмы IBM и ряда других компаний. Модель учитывает основные физические эффекты, имеющие место в НО КНИ МОП транзисторах: лавинное умножение тока в обеднённых областях; туннельный ток затвор рабочая область $I_{ЗР}$, который заряжает рабочую область и меняет линейность характеристики $I_{СИ} = f(U_{ЗИ})$;

неидеальность контактов; гистерезис порогового напряжения, паразитный горизонтальный биполярный транзистор; паразитный нижний затвор, выбросы и насыщение скорости носителей и др.

Версии этой модели включены в популярные программы схемотехнического моделирования, в частности HSpice.

Модель для полного (ПО), неполного (НО), динамического обеднения реализована в виде единого модуля, имеющего переключатель режима *soiMod*: “0” – НО, “2” – идеальный ПО, “1” – объединённая модель. Значения “0” и “2” форсировано задействуют только необходимые части модели. Значение “1” позволяет динамически менять режим работы прибора в зависимости от значения внутреннего параметра – снижения встроенного потенциала рабочая область–исток ΔU_{bi} . В модели для НО, где потенциал рабочей области не зависит от ΔU_{bi} , ΔU_{bi} не рассчитывается. И, наоборот, в модели для ПО, где потенциал рабочей области равен ΔU_{bi} , не рассчитываются токи / заряды рабочей области.

По сравнению с базовой моделью добавлен дополнительный внутренний узел В (рис. 5.15) для рабочей области (который может быть выведен наружу через сопротивление при использовании контакта к подложке).

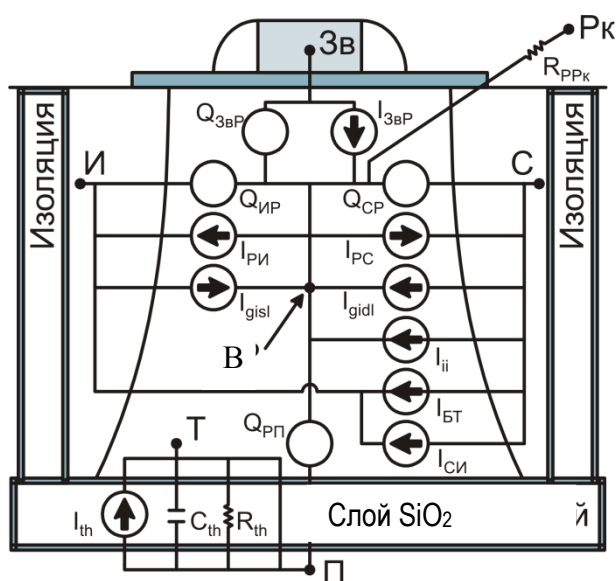


Рис.5.15. Эквивалентная схема модели BSIMSOI

Для описания специфических КНИ эффектов используется токовая модель: к узлу В подсоединены источники тока, описывающие добавление зарядов в рабочую область и их удаление оттуда. Баланс компонентов тока рабочей области как раз и определяет потенциал узла В.

Общее выражение для суммы токов узла В рабочей области:

$$(I_{PI} + I_{PC}) + I_{PPK} - I_{ii} - (I_{gidl} + I_{gisl}) - I_{3eP} = 0, \quad (5.1)$$

где $I_{PI/C}$ – суммируют токи инжекции и рекомбинации в p - n -переходах сток / исток – рабочая область (без учёта рекомбинации в нейтральной рабочей области); I_{PPK} – учитывает влияние сопротивления контакта к рабочей области; I_{ii} – ток ударной ионизации, связанный с токами базового МОП и паразитного БТ; I_{gidl} и I_{gisl} учитываются при низких значениях $U_{3И}$ или высоких значениях $U_{СИ}$; I_{3P} – туннельный ток затвора, имеющий значение при $t_{ox} < 20 \text{ \AA}$.

В зарядовой модели заряды выводов ($Q_3 + Q_C + Q_{II} + Q_{II} + Q_P = 0$) пересчитываются в заряды инверсионного слоя Q_{inv} , затвор–рабочая область Q_{P3e} , стокового / истокового перехода $Q_{jИ}$, Q_{jC} .

По сравнению с базовой моделью добавлено ёмкостное смыкание рабочей области с нижним затвором и паразитный МОП конденсатор сток / исток–захороненный слой–кремниевая подложка, ёмкость которого зависит от смещения (имеет существенное влияние в случае большой площади диффузионных областей стока/ истока).

В выражениях токовой и зарядовой моделей широко применяются упрощения физических закономерностей, задаваемые в виде квадратических аппроксимаций, сглаживающие функции, используемые для получения единого выражения без разрывов производных, а также ограничительные функции, используемые для удержания значений внутренних и выходных параметров в разумных пределах.

Для учёта температурной зависимости порогового напряжения, подвижности носителей, последовательного сопротивления, скорости

насыщения используются выражения базовой модели. Однако введены модифицированные зависимости для диодных характеристик (биполярного, диффузионного и рекомбинационного токов).

Для учёта эффектов саморазогрева строится дополнительная параллельная тепловая RC-цепочка, вводящая в схему тепловой узел T. Источник тока, расположенный параллельно цепочке, создаёт ток, равный рассеиваемой мощности прибора $I_c \times U_c$.

Эффекты, обусловленные воздействием различных видов радиации на параметры МОП приборов, модель BSIMSOI не учитывает.

Идентификация параметров этой модели вызывает однако некоторые затруднения. BSIMSOI –полуэмпирическая модель с очень большим количеством параметров (~450), причём существует взаимозависимость между некоторыми из параметров. Большая часть параметров – подгоночные.

При экстракции параметров применяется автоматическая или полуавтоматическая процедура с использованием отдельного оптимизатора (UTMOST, ICCAP) или встроенного в моделирующую программу. Так как целевая функция (уравнения модели) данного оптимизационного процесса является сильно нелинейной функцией, то применяется алгоритм Лебенбурга–Маркардта, Ньютона–Рафсона или аналогичный.

Для промышленной идентификации модели BSIMSOI наиболее выгодной следует считать групповую стратегию экстракции и локальную стратегию оптимизации. Групповая экстракция подразумевает одновременное моделирование нескольких приборов с разными длинами и ширинами затворов (включая «короткие» и «узкие» приборы) на каждом шаге процесса. Локальная оптимизация подразумевает разбиение параметров на группы и извлечение за один шаг параметров только одной группы в определённом режиме работы.

Для идентификации BSIMSOI требуется большой набор экспериментальных зависимостей, включая данные приборов с контактом к рабочей области и без такового. Результирующий набор параметров применим

к приборам с размерами затвора, ограниченными снизу размерами затворов тех приборов, которые использовались при идентификации.

На рис. 5.17 показана эквивалентная схема модели BSIMSOI

На рис. 5.18 показано сравнение рассчитанных с помощью модели BSIMSOI и экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ) МОПТ со следующими параметрами

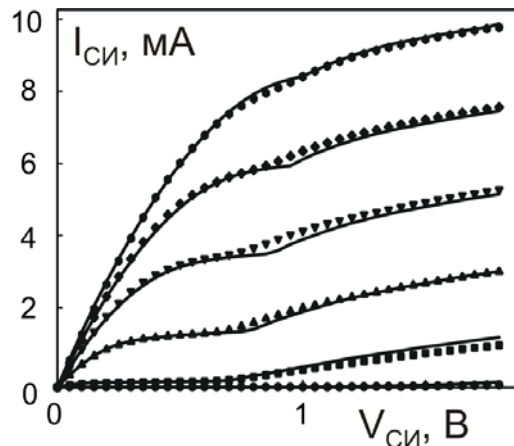


Рис.5.18. Сравнение экспериментальных (значки) и рассчитанных с помощью BSIMSOI (линии) характеристик

Блок-схема процесса идентификации модели BSIMSOI приведена на рис. 5.19.

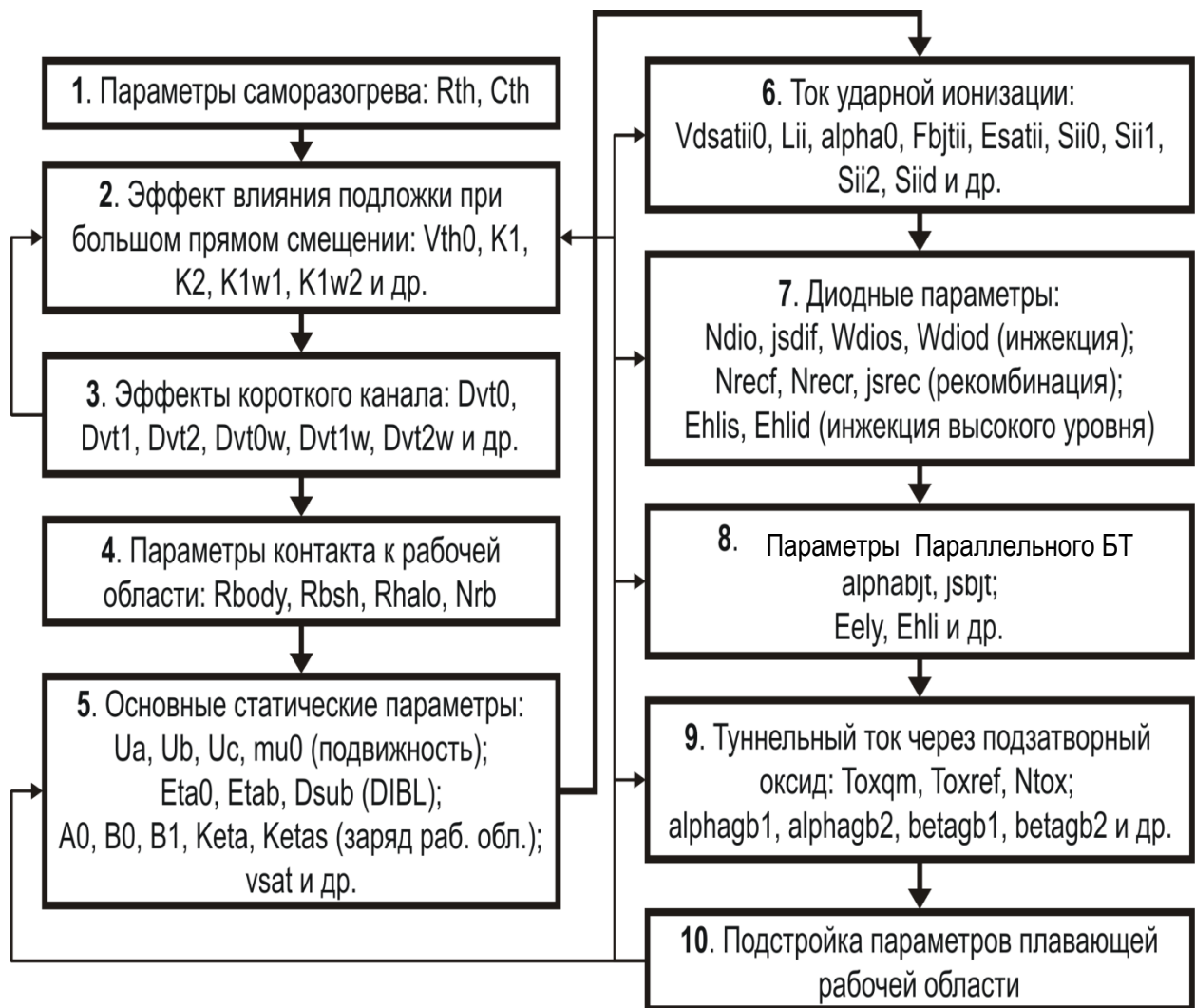


Рис.5.19. Блок-схема идентификации модели BSIMSOI

Модель UFSOI

Модель UFSOI, содержащая отдельные версии для полностью (ПО) и неполностью (НО) обеднённых КНИ транзисторов, разработана во Флоридском Университете группой под руководством проф. Дж. Фоссума и включена в собственную программу SOISPICE, а также в HSpice.

В основе модели UFSOI лежат сложные фундаментальные дифференциальные уравнения, решение которых производится в численном виде.

Выражения для токов через выводы МОП транзистора получены с помощью концепции управления зарядом на основе квазистатических аппроксимаций, выражающих сохранение заряда:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \sum \frac{\partial Q_i}{\partial U_{iS}} \frac{dU_{jS}}{dt}, \quad (5.2)$$

где $i = C, И, Зв, Зн, Р$ (выводы); $j = И, Зв, Зн, Р$ (выводы).

Как видно из эквивалентной схемы модели, заряд во внутренней точке рабочей области задаётся балансом медленных генерации и рекомбинации и быстрой ёмкостной связи с другими выводами:

$$I_G - I_R = \frac{dQ_P}{dt}, \quad (5.3)$$

где Q_P – заряд, задаваемый контактом к рабочей области; I_R и I_G – суммарные токи рекомбинации и генерации, соответственно.

Модель пригодна для приборов с полным, а также неполным обеднением области канала под затвором и учитывает следующие параметры: плавающий потенциал подложки, паразитный биполярный транзистор, лавинное умножение носителей заряда в обедненной области стока, влияние нижнего паразитного затвора, выбросы и насыщение скорости носителей и др. Модель наиболее полно в физическом виде описывает динамические составляющие токов в различных областях прибора.

Учёт в модели UFSOI эффектов, обнаруживаемых в транзисторах с ультратонкими (до единиц ангстрем) рабочими и изолирующими слоями, позволяет более надёжно моделировать такие приборы, а также оценивать поведение перспективных технологий.

В основе моделирования механизмов ударной ионизации и выбросов скорости носителей, особенно важных для сильно масштабированных транзисторов, лежит упрощённое уравнение баланса энергии (момент второго порядка транспортного уравнения Больцмана):

$$\frac{d}{dy}(T_C(y) - T) + \frac{(T_C(y) - T)}{(5v\tau_w/3)} = \frac{2qE_y(y)}{5k_B}, \quad (5.4)$$

где T_C – температура носителей, обусловленная кинетической энергией, которая определяет темп ударной ионизации α и подвижность носителей μ ; E_y – величина продольной компоненты электрического поля; τ_w – время релаксации энергии.

Тепловые и шумовые эффекты учитываются без введения дополнительных параметров посредством соответствующего автоматического изменения физических параметров.

Несколько более сложная структура уравнений модели обуславливает, по меньшей мере, в два раза большее время моделирования БИС с использованием модели UFSOI, чем с помощью модели BSIMSOI.

Эффекты, вызванные воздействием различных видов радиации, модель не учитывает, поэтому для расчёта радиационно-стойких ИС она не пригодна.

UFSOI, одна из наиболее старых КНИ / КНС моделей, поэтому она постоянно дорабатывается, в настоящее время эта модель относительно нешироко распространена в практике схемотехнического проектирования КНИ/ КНС БИС. Существенной причиной этого, наряду со сложностью её математического описания, является сложность, разветвлённость и непривычность процедуры идентификации.

Общее число параметров модели достаточно небольшое (~50), причём большинство из них являются физико-технологическими, а не электрическими, полученными из измерений. Количество подгоночных параметров невелико.

На первом шаге идентификации UFSOI важно точно задать начальные значения технологических и физических параметров (например, геометрических размеров областей, концентраций примесей, подвижности носителей, скорости насыщения). Если эти значения заданы правильно, то в дальнейшем они лишь незначительно подстраиваются; в противном случае существенно возрастёт количество шагов экстракции.

Групповая оптимизация здесь не используется. Обмеряются лишь два транзистора: с длинным и коротким каналом, – оба с плавающей рабочей областью. При необходимости итерации производятся вручную.

Группирование параметров (локальная экстракция) также не используется; параметры извлекаются индивидуально, по одному или цепочками.

При наличии у пользователя достаточного опыта он может выполнить идентификацию UFSOI гораздо быстрее, чем идентификацию какой-либо другой модели, основанной на оптимизации.

Результирующий набор параметров теоретически будет пригоден для описания приборов в широком диапазоне значений длины и ширины затвора, в том числе и тех, которые физически не обмерялись.

На рис. 5.20 приведена эквивалентная схема модели UFSOI;

На рис. 5.21 показано сравнение рассчитанных с помощью модели UFSOI и экспериментальных ВАХ МОПТ с параметрами L/W , t_{si} .

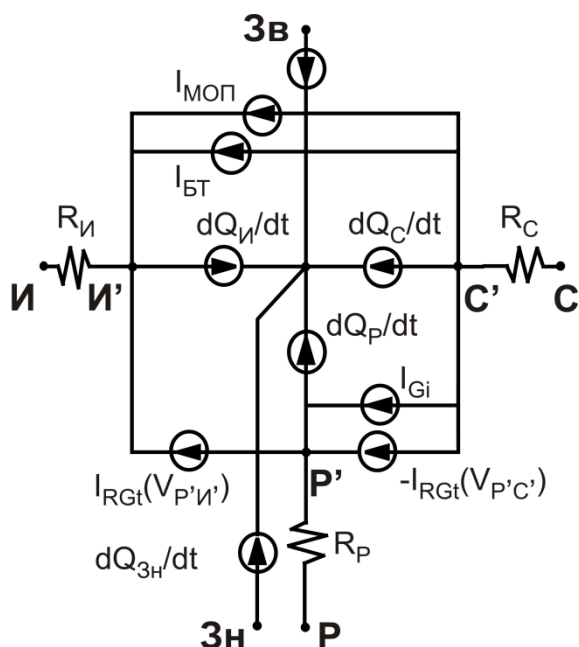


Рис. 5.20. Эквивалентная схема модели UFSOI

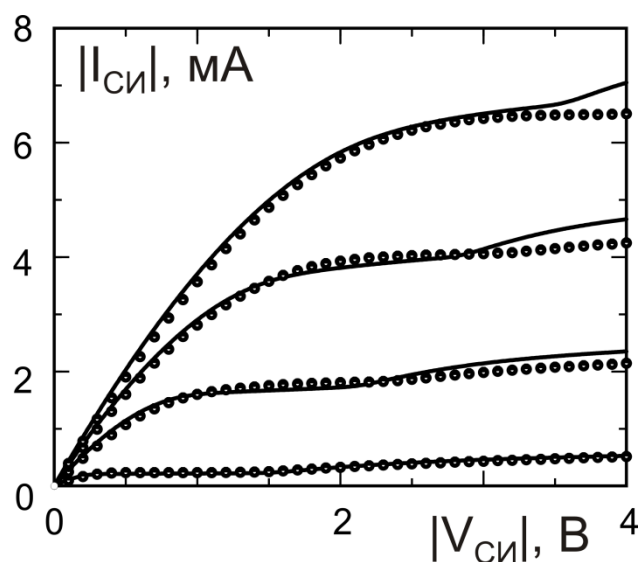


Рис. 5.21. Сравнение экспериментальных (значки) и рассчитанных с помощью

Модель SOI / SOS-МИЕМ

Модель SOI / SOS-МИЕМ для полностью (ПО) и непольностью (НО) обеднённых КНИ / КНС МОПТ разработана в Московском государственном институте электроники и математики (техническом университете) группой под руководством проф. К.О.Петросянца. Она построена в виде макро модели для

Spice и может, в отличие от программных моделей, быть встроена в любую версию Spice.

Модель учитывает следующие эффекты:

- плавающий потенциал рабочей области;
- паразитный биполярный транзистор, лавинное умножение носителей заряда в обеднённых областях;
- кинк-эффект, гистерезис порогового напряжения, накопления заряда в подложке и изменение её потенциала во время переходных процессов;
- влияние нижнего паразитного МОП транзистора, а также радиационные эффекты суммарной поглощённой дозы, импульсного γ -излучения и воздействия тяжёлых заряженных частиц.

Модель состоит из внутренней и внешней частей. Внутренняя часть представляет собой обычный объёмно-кремниевый МОПТ (модель BSIM3). Эффекты диэлектрической подложки и радиационного воздействия учитываются во внешней части, путём подключения дополнительных схемных элементов и введения дополнительных аналитических физических и радиационных зависимостей, описывающих следующие параметры модели:

- паразитный биполярный транзистор (модель Гуммеля-Пуна);
- источник тока ударной ионизации I_{ii} зависящий от напряжения, ёмкости C_{sp} и C_{sp} ;

паразитный нижний МОПТ (для случая КНИ) или паразитное сопротивление сапфира (для случая КНС).

Параметрами модели являются параметры составляющих её элементов. Для определения параметров отдельных элементов требуется изолировать их электрически и использовать стандартные полуавтоматические процедуры, что сводит идентификацию к общепринятым и общепонятным методикам. Так как модель является полуэмпирической, оптимизационная процедура позволяет получить для неё более хорошее совпадение в широком диапазоне экспериментальных данных, несмотря на то, что она более трудоёмка, и принимая во внимание определённую погрешность измерений.

Групповая экстракция и локальная оптимизация применяются на уровне компонентов.

Результирующий набор параметров применим к приборам с размерами затвора, ограниченными снизу размерами затворов тех приборов, которые использовались при идентификации.

На рис. 5.22 приведена эквивалентная схема модели SOI/ SOS-MIEM; на рис. 5.23 показано сравнение рассчитанных с помощью модели SOI/SOS-MIEM и экспериментальных ВАХ МОПТ с параметрами: L/W , t_{si} ...

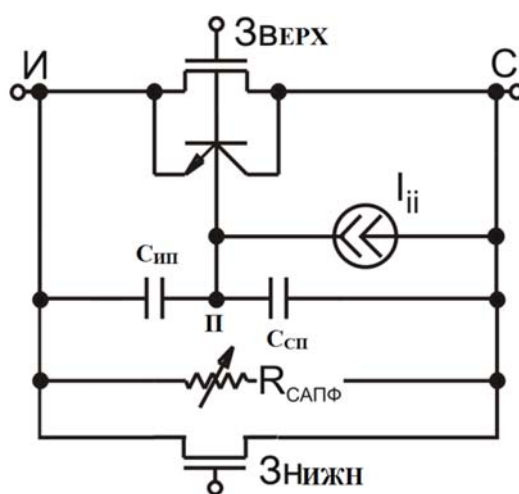


Рис. 5.22. Эквивалентная схема модели SOI/ SOS-MIEM

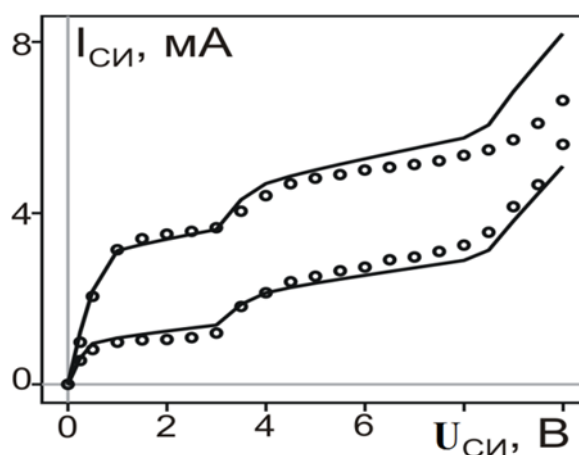


Рис. 5.23. Сравнение экспериментальных (значки) и рассчитанных с помощью SOI/ SOS-MIEM (линии) характеристик

Модель FDSOI

Модель FDSOI для полностью (ПО) обеднённых КНИ МОПТ разработана группой специалистов из Университета Балеарских островов, Испания (Б. Инигез), и Лёвенского Католического университета, Бельгия (рук. проф. Д. Фландр) и реализована в программе Is SPICE 4.

Модель оформлена в программе в виде двух частей: внутренней и внешней. Математическое описание внутренней части основано на модели поверхностного заряда и непрерывных аппроксимирующих квазистатических выражениях для плотностей токов и зарядов, а также их производных для всех режимов работы транзистора; также оно включает учёт эффектов короткого канала. Ёмкости перекрытия затвором областей стока и истока, а также ёмкости p–n-переходов включены в модель в качестве внешних элементов. Внутренний узел, соответствующий рабочей области, здесь отсутствует.

В выражениях для слабой и сильной инверсии используются разные значения порогового напряжения, что позволяет более естественным способом учесть увеличение поверхностного потенциала на несколько тепловых потенциалов kT/α при сильной инверсии.

Зависимость канального тока от напряжений выводов выражается посредством вычисления поверхностного потенциала и плотности заряда инверсионного слоя:

$$I_{CH} = -W \mu \left(Q_{nf} \frac{d\phi_{sf}}{dx} - v_T \frac{dQ_{nf}}{dx} \right) = \frac{\mu_n}{1 + U_{CHeff} \frac{\mu_n}{L_{eff} v_{th}}} \frac{W}{L_{eff}} \left[v_T (Q_{nf,C} - Q_{nf,H}) - \frac{Q_{nf,C}^2 - Q_{nf,H}^2}{2nc_{of}} \right], \quad (5.5)$$

где v_T – тепловой потенциал, L_{eff} – эффективная длина канала, $Q_{nf,H/C}$ – плотность заряда инверсионного слоя вблизи истока и стока:

$$Q_{nf} = c_{of} m v_T \left(1 - \sqrt{1 + 4Q_{nf,2}^2 / (c_{of} m v_T)^2} \right). \quad (5.6)$$

Выражения для полного заряда истока и стока получены с помощью метода секционирования заряда канала, предложенного Уордом. Выражения

для полного заряда верхнего и нижнего затвора получены с помощью интегрирования плотности заряда верхнего и нижнего затвора вдоль канала.

Модель FDSOI ориентирована на расчёт аналоговых схем, где требуются непрерывность, точность и гладкость вычисления производных токов, зарядов и емкостей. Особенно это важно для микромощных аналоговых ИС, МОП транзисторы в которых работают, как правило, в режиме слабой инверсии, а также для схем с накоплением заряда (например, на переключаемых конденсаторах).

Модель обеспечивает достаточную точность описания для приборов с длиной канала до 1,0 мкм в гигагерцовом диапазоне частот.

Эффекты, обусловленные воздействием на параметры прибора различных видов радиации, модель FDSOI в программе Spice 4 не учитывает.

Большинство параметров модели имеют достаточно понятное физическое значение, поэтому их начальные значения извлекаются напрямую на определённых участках характеристик транзистора. Так, параметр n определяется по пологому участку кривой; $g_{m36}(I_{CH})$, U_{thf0} определяются в точке максимума производной; dg_{m36}/dU_{36} , $V_{thf0,i}$ принимается равным $U_{thf0} - 2V_T$, параметры σ и κ определяются на основе экстракции порогового напряжения при различных U_C и $U_{3в}$, коэффициент снижения подвижности α находится из графика зависимости $I_{CH} / \sqrt{g_{m36}}$ от $U_{3в}$ в линейной области, l и v_{sat} находятся в области насыщения, параметры S_{NT} и A_{TS} определяются на границе предпороговой области и области сильной инверсии и на границе линейной области и области насыщения, соответственно. После этого значения параметров уточняются при помощи глобальной оптимизации.

Оценка возможностей модели FDSOI в программе Is Spice 4 была проведена на основе результатов измерений статических ВАХ тестовых МОП КНИ транзисторов, изготовленных по технологии Dele Cut.

С параметрами $W/L=10/1,2$ мкм. Толщина окисла под верхним затвором: $t_{ox}=33$ нм; под нижним затвором – $t_{BOX}=300$ нм.

На рис. 5.24 приведены экспериментальные и смоделированные ВАХ МОПТ при напряжении на затворе $U_{зв} = 1 \dots 5$ В.

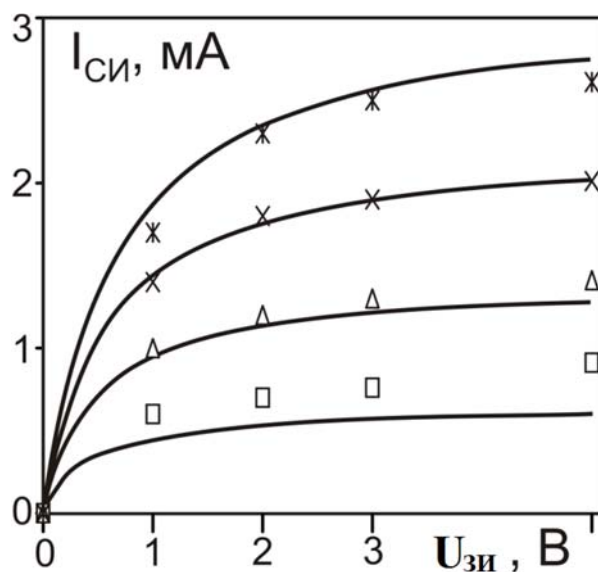


Рис.5.24. Сравнение экспериментальных (значки) и рассчитанных с помощью UFSOI (линии) характеристик МОПТ с $W/L = 10/1,2$ мкм

Модель EKV

Модель EKV для МОПТ разработана в Швейцарском федеральном технологическом институте, авт. К. Энц, Ф. Круменахер, Э. Виттоз.

Вместо классического выражения Ван-дер-Вилля для тока стока, используемого в ряде известных моделей МОП транзисторов, авторы модели EKV предложили единую эмпирическую формулу, которая обеспечивает непрерывность и гладкость производных первого и более высоких порядков относительно внешних напряжений на выводах прибора во всех режимах работы МОП транзистора:

$$I_c = I_s \left[\ln^2 \left(1 + e^{\frac{UP - U_{и}}{2\phi_t}} \right) - \ln^2 \left(1 + e^{\frac{UP - U_c}{2\phi_t}} \right) \right], (5.7)$$

где $UP = \frac{U_{зи} - U_T}{n}$ – напряжение отсечки; U_T – пороговое напряжение; n – линеаризованный коэффициент влияния подложки; $I_s = 2n\mu C_{ox} \phi_t^2 \frac{W}{L}$ – ток насыщения.

Специфическими параметрами для модели EKV, в отличие от других моделей, являются: напряжение отсечки U_P и фактор подложки (или угловой коэффициент) n .

Модель EKV является масштабируемой для размеров W , L , t_{ox} . Она состоит из внутренней и внешней частей. Внутренняя модель учитывает все основные эффекты, свойственные транзисторам с субмикронными размерами. Внешняя часть модели включает в себя сопротивления диффузионных областей стока и истока, а также ёмкости p–n-переходов.

Эффекты перераспределения заряда в рабочей области учитываются во внутренней части. Используемые в модели напряжения вводятся относительно потенциала подложки, что обеспечивает симметричность выходных параметров по отношению к стоку / истоку, а также их непрерывность при $U_{зи} = 0$.

Модель EKV применима для моделирования полностью (ПО) обеднённых КНИ МОПТ, однако убедительная статистика по её использованию в практических задачах разработки КНИ КМОП БИС в литературе отсутствует. Некоторые результаты моделирования для конкретных КНИ МОП приборов и их сравнение с экспериментом приведены в [legwww.epfl.ch/ekv/].

Модель EKV в основном ориентирована на расчёт аналоговых низковольтных и микро/ наноамперных ИС (прежде всего операционных усилителей), а также смешанных аналого-цифровых схем, изготовленных по субмикронной КНИ КМОП технологии.

Эффекты, обусловленные воздействием на прибор различных видов радиации, модель EKV не учитывает.

При достаточно малом числе основных (24) и подгоночных (3) параметров модель обеспечивает очень хорошую точность моделирования. Также она обладает достаточно быстрой и удобной методикой определения параметров из результатов экспериментальных измерений.

Последовательность экстракции:

1. Широкий длинный	VTO, GAMMA, PHI	UP(U _{ЗВ})
	KP, E0	I _C (U _{ЗВ})
2. Широкий короткий	IBA, IBV, IBN (ток ударной ионизации)	I _P (U _{ЗВ})
	LETA, Q0, LK	UP(U _{ЗВ})(в диапазоне длин)
	UCRIT, LAMBDA	I _C (U _C)
3. Узкий длинный	WETA	UP(U _{ЗВ})
4. Узкий короткий	Окончательная подстройка	

Сравнение процедур идентификации

Методология экстракции: может использоваться оптимизация или прямая экстракция. Для полуэмпирических моделей, таких как BSIMSOI или SOI / SOS-MIEM, более хорошие результаты в широком диапазоне размеров приборов и режимов работы может дать оптимизация. В то же время требуются специальные навыки в области оптимизации. Параметры модели UFSOI непосредственно соответствуют физическим и технологическим параметрам структуры прибора, поэтому в этом случае более быстрый результат может быть получен при использовании прямого метода. Для этого, в свою очередь, требуется детальное знание структуры и принципов работы прибора, технологической информации.

Сложность идентификации: процедуры идентификации моделей BSIMSOI и UFSOI достаточно сложные и долгие, процедура идентификации модели SOI / SOS-MIEM в большей степени традиционная (принимая во внимание, что составляющие элементы стандартны и идентифицируются по отдельности стандартными методиками).

Точность модели: сравнение экспериментальных и рассчитанных с помощью моделей характеристик приборов в широком диапазоне длины и ширины затвора показывает, что модель UFSOI даёт наилучшую точность моделирования, BSIMSOI немного отстаёт, SOI / SOS-MIEM с некоторым отрывом замыкает этот список.

По результатам сравнения моделей по следующим критериям: способ и точность учёта специфических эффектов плавающего потенциала рабочей области прибора, сложность и длительность процедуры идентификации. Можно предложить следующие области применения моделей:

- UFSOI преимущественно в исследовательских проектах субмикронной и ультрасубмикронной технологии;
- BSIMSOI преимущественно в практических проектах субмикронной и ультрасубмикронной технологии, в том числе при меняющейся степени обеднения;
- SOI / SOS-MIEM в практических проектах микронной и субмикронной технологии для моделирования характеристик с учетом радиационных воздействий;
- FDSOI даёт наилучший результат при расчёте микромощных аналоговых схем и схем на переключательных конденсаторах (только на полностью обеднённых транзисторах);
- EKV возможно использовать для предварительного расчёта субмикронных аналоговых и смешанных схем (только на полностью обеднённых транзисторах);

Модели МОП КНС транзисторов с учетом эффектов стационарного ионизирующего излучения

В соответствии с методологией многоуровневого проектирования радиационно-стойких схем (см. рис. 5.1), обеспечить достаточно точное моделирование статических и динамических характеристик радиационно-стойких МДП схем возможно при наличии моделей *транзисторов*, параметры которых зависят от облучения. Наибольшее влияние на статические и динамические параметры интегральных МДП схем различной сложности, изготовленных как по “объемной”, так и КНС/КНИ технологиям, при их облучении оказывает следующие факторы:

- сдвиг порогового напряжения и вольт-фарадных характеристик транзисторов;
- уменьшение крутизны вольт-амперной характеристики транзисторов;
- возникновение паразитных токов утечки.

Влияние накопления заряда в подзатворном оксиде на характеристики КНС/КНИ структур ничем принципиально не отличается от процессов в объемных МОП структурах. Однако при прочих равных условиях КНС/КНИ МОП транзисторы в принципе менее устойчивы к полной накопленной дозе стационарного излучения из-за наличия у них лишней дополнительной границы раздела кремний–скрытый оксид (сапфир) и боковых граней кремниевого островка в структурах с изоляцией мез.

Так как граница раздела кремний–сапфир характеризуется высокой дефектностью, то эта обратная граница раздела может порождать значительные токи утечки, что необходимо учитывать в схемотехнической модели. При этом в случае радиационно стойкой технологии при поглощении значительной дозы γ -излучения в сапфире вблизи границы раздела с кремнием создается встроенный положительный заряд. В р-канальных транзисторах это повышает пороговое напряжение на обратной стороне и уменьшает токи утечки, а в n-канальных транзисторах увеличивает токи утечки.

Специфичной для всех КНС/КНИ технологий является технологическая операция травления кремниевых островков, на которых расположены транзисторы. В этом случае МОП транзистор, расположенный на кремниевом островке, можно представить состоящим из четырех параллельно соединенных транзисторов: основного, расположенного на верхней грани кремниевого островка, двух боковых, расположенных на боковых гранях, и нижнего, связанного с границей раздела кремний-изолятор. Первые три транзисторы управляются затвором, последний неуправляемый.

С учетом сказанного схемотехническая модель должна учитывать наличие паразитных транзисторов с параметрами, зависящими от полученной дозы облучения.

Существуют два возможных подхода для описания зависимости параметров схемотехнических моделей транзистора от дозы:

- а. полуэмпирическая зависимость непосредственно от дозы;
- б. зависимость от наведенных облучением зарядов, которые в свою очередь зависят от полученной дозы.

Первый подход используется в "PSPICE guide" (инструкции по использованию программы PSPICE). В этом случае параметры модели MOS3 следующие: пороговое напряжение U_{To_Dose} и подвижность U_{o_Dose} являются функциями полученной дозы облучения:

$$U_{To_Dose} = 1.65 * (1 - 4.18e-6 * Dose + 2.76e-12 * Dose * Dose);$$

$$U_{o_Dose} = 600. * (1 - 5.e-7 * Dose).$$

Недостатком данного подхода является его формальность и отсутствие связи между деградацией параметров транзистора и физико-технологическими особенностями прибора, что не позволяет оценивать влияние конструктивно-технологических факторов на радиационную стойкость с использованием разработанных физических моделей деградации.

В данной книге предлагается использовать второй подход, так как он более предпочтителен для моделирования БИС и позволяет связать параметры схемотехнической модели и технологические параметры. Кроме того, такой подход дает возможность использовать для целей схемотехнического моделирования модель, предложенную автором и достаточно разработанные **физические модели накопления зарядов в диэлектриках**.

Воздействие ионизирующего излучения приводит к образованию дырочного заряда в слоях диэлектрика (оксида) Q_{ot} (oxide traps) и увеличению плотности поверхностных состояний на границах раздела кремний-диэлектрик Q_{it} (interface traps). Величина и локализация заряда дырок определяется величиной и полярностью напряжения на затворе и на стоке транзистора в момент облучения. Данные эффекты наблюдаются при

облучении МДП структур частицами различных видов: электронами, гамма квантами, рентгеновскими лучами, протонами, нейтронами.

Процесс накопления дырочного заряда в подзатворном диэлектрике при стационарном облучении описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dN_{ot}(t)}{dt} = v_p \sigma_p(E) N_{ot}(t) p(t) - v_n \sigma_n(E) N_{ot}^+(t) n(t); \quad (5.8)$$

$$p(t) = K_g D(t) f(E), \quad (5.9)$$

где $p(t)$, $n(t)$ – концентрации свободных дырок и электронов, соответственно;

$N_{ot}^+(t)$, $N_{ot}(t)$ – плотности ловушечных центров в диэлектрике с захваченными дырками и свободных, соответственно;

v_p , v_n - скорости движения дырок и электронов;

$\sigma_p(E)$, $\sigma_n(E)$ –сечения захвата дырки на свободную ловушку и электрона на уровень ловушки с захваченной дыркой;

E –электрическое поле в данной точке подзатворного диэлектрика;

K_g – константа генерации (Кл/см³/рад);

$D(t)$ – интенсивность дозы (рад/с);

$f(E)$ – функция, описывающая выход носителей заряда при облучении (в %), в зависимости от электрического поля.

По мере накопления заряда в оксиде (заполнения ловушек) электрическое поле между слоем ловушек с дырками и затвором уменьшается. Это вызывает соответствующее изменение сечений захвата и "процент выхода" носителей при облучении. В результате при достаточно больших дозах наступает состояние равновесия между захватом дырок на ловушки и их отжигом [43]. Дифференциальное уравнение (5.8) существенно нелинейно, поэтому различными авторами предлагаются его решения с различными упрощающими допущениями [44]. В работе [45] приведены результаты численного решения уравнений (5.8) – (5.9). Данные работы показывают, что при дозах порядка нескольких десятков мегарад наступает

равновесие между захватом дырок на ловушки и их рекомбинацией. В результате этих процессов сдвиг порогового напряжения достигает насыщения. При этом величина сдвига зависит от толщины оксида, знака и величины приложенного напряжения, места положения центра заряда. Для описания процесса накопления дырочного заряда часто используются выражения вида:

$$Q_{ot}(D, U_{зи}) = Q_{ot \text{ нас}}(U_{зи})(1 - \exp(-e_{ot}D)), \quad (5.10)$$

где $Q_{ot \text{ нас}}(U_{зи})$ – максимальное значение накапливаемого заряда;

e_{ot} – подгоночный коэффициент, определяемый из измерений;

D – величина полученной дозы.

Для небольших доз облучения (до единиц мегарад) можно использовать выражение вида:

$$Q_{ot}(D, U_{зи}) = a_{ot}(U_{зи}) D^{-bot}, \quad (5.11)$$

a_{ot}, e_{ot} – подгоночные коэффициенты.

Поскольку реальные значения радиационной стойкости КМОП/КНС микросхем не превышают нескольких единиц Мрад, авторы в наших моделях использовали выражение (5.11).

Образование новых **поверхностных состояний** на границе раздела кремний–диэлектрик продолжается во время всего облучения, пока не достигается насыщения. Исследование ВФХ МДП структур показало, что поверхностные состояния наиболее интенсивно образуются в дефектных слоях переходной области от Si к SiO₂. Разные материалы затвора (металл или поликремний) дают разные величины наведенных поверхностных состояний, постоянных времени их образования и зависимости от приложенного напряжения.

Упрощенно, появление новых поверхностных состояний описывается следующей схемой. Структура кремний–диоксид кремния характеризуется

наличием в ней механических напряжений. Механические напряжения возникают уже в неокисленной пластине кремния при обработке ее поверхности. Причиной возникновения механических напряжений может быть также различие в строении материалов полупроводника и диэлектрика. Переходная область от диэлектрика к полупроводнику характеризуется изменением химического состава от SiO_2 к Si . Электроактивные центры в этой области активно обмениваются зарядом с приповерхностной областью полупроводника и являются поверхностными состояниями в запрещенной зоне полупроводника. Время перезарядки центров, расположенных в дефектном слое, примыкающем к кремнию, составляет несколько микросекунд и называется быстрыми поверхностными состояниями. Поверхностные состояния в дефектном слое, прилегающем к окислу, обмениваются зарядом с поверхностью кремния посредством туннелирования. Постоянная времени процесса их перезарядки порядка миллисекунд, поэтому такие состояния называются медленными.

При воздействии облучения атомы ионизируются и образуются дефекты, что создает условия для перехода структуры в равновесное состояние. Таким образом, эффект ионизации в структуре диэлектрик–полупроводник вызывает релаксацию механических напряжений, сопровождающуюся образованием дефектов.

Существует несколько различных моделей образования поверхностных состояний. Они различаются физическими особенностями образования состояний и, соответственно, постоянными времени и зависимостями от условий получения оксида и условий облучения. Модели можно разделить на две группы:

- модели, в которых происходит перенос генерированных облучением дырок и последующее высвобождение водорода;
- модели с переносом дырок к границе раздела Si-SiO_2 и последующим их захватом вблизи границы с генерацией поверхностного состояния.

Различные модели позволяют получить разные зависимости величины поверхностных состояний от условий облучения и разные временные зависимости.

Q_{ot} используют достаточно универсальную и точную для практических применений формулу

$$Q_{it} = a_{it} D^{b_{it}} \quad (5.12)$$

Предельная величина плотности поверхностных состояний определяется материалами диэлектрика и полупроводника, а также ориентацией поверхности. При напряженности электрического поля под затвором более 10^6 В/см эффективность накопления зарядов уменьшается вследствие уменьшения сечений взаимодействия от поля [46].

Наведенный облучением заряд в оксиде Q_{ot} изменяет пороговое напряжение U_t в соответствии с выражением

$$\Delta U_t = \frac{Q_{ot}}{C_{ox}} \quad (5.13)$$

Наведенные облучением поверхностные состояния оказывают влияние на характеристики транзисторов.

Так, дополнительный сдвиг порогового напряжения МДП транзистора может отразить следующее выражение:

$$\Delta U_{it} = \frac{qt_{ox}}{\epsilon\epsilon_0} \int_{E_v}^{E_F} \Delta N_{it}(E) dE, \quad (5.14)$$

где $N_{it}(E)$ – плотность дополнительных поверхностных состояний;
 E_F – уровень Ферми;

Наведенные поверхностные состояния уменьшают также подвижность носителей в канале, ухудшая крутизну транзистора. Для описания зависимости подвижности от облучения в работе [47] использовано выражение:

$$\mu(D) = \frac{\mu_0}{1 + \alpha N_{it}(D)}, \quad (5.15)$$

где μ_0 – значение подвижности в необлученном приборе;
 $N_{it}(D)$ – плотность поверхностных состояний;

Значение α в выражении (5.15) для n- и p-канальных приборов равно $(8\pm 2)\cdot 10^{-13}$ см² для n-канальных и $(9\pm 2)\cdot 10^{-13}$ см² для p-канальных транзисторов.

Дополнительные поверхностные состояния уменьшают наклон входной ВАХ МОП транзистора $\ln(I_{си}) = f(U_{зи})$ в предпороговой области:

$$n = \frac{\Delta U_{зи} / \Delta \ln I_{си}}{\varphi_t}, \quad (5.16)$$

$$n = \frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox}}, \quad (5.17)$$

где C_{ox} — емкость подзатворного оксида;

C_D — емкость обедненного слоя под затвором;

C_{it} — емкость поверхностных состояний.

Большая толщина нижнего оксида в КНИ МДП структурах обуславливает накопление в нем большего дырочного заряда и большего сдвига порогового напряжения в отрицательную сторону для n-канальных транзисторов по сравнению с подзатворным оксидом, вплоть до инверсии поверхности кремния и появления токов утечки.

Методика определения параметров схемотехнической модели

Для определения параметров облученных МДП транзисторов предложено достаточно много методик. В простейших случаях производится независимая экстракция параметров для каждой дозы облучения. Например, в работе [48] производится определение параметров МДП транзисторов до облучения и после нескольких доз для схемотехнической модели, предложенной авторами. При этом получают дискретный ряд не связанных между собой параметров для разных доз. Однако при своей простоте данный способ имеет существенные недостатки:

— невозможность получить параметры для промежуточных доз;

— оторванность от физических особенностей деградации параметров.

Методика состоит из двух этапов:

- 1) определение параметров модели для необлученных транзисторов;
- 2) определение зависимостей соответствующих параметров транзисторов от дозы:

— определение наведенных облучением зарядов в оксиде и на границе раздела Si–SiO₂;

— определение коэффициентов зависимости зарядов от полученной дозы.

Рассмотрим эти два этапа подробнее.

Определение параметров модели для необлученных транзисторов

Параметры разработанных моделей определяются по сложившимся общепринятым методикам и по группам параметров в результате единой оптимизационной процедуры. Исходной информацией являются типовые семейства входных и выходных характеристик прибора, снимаемых по стандартной методике. На основании этой информации с помощью специально разработанной программы идентификации получают значения параметров модели, обеспечивающие наилучшее совпадение результатов измерений с результатами моделирования.

Измеряют зависимости тока стока $I_{си}$ от напряжения на затворе $U_{зи}$ при $U_{си}=0,05...0,1$ В. Параметры VFB_0 , DL , DW определяются по методу наименьших квадратов путем подгонки упомянутых модельных выражений к зависимостям порогового напряжения от размеров транзисторов, полученным в результате измерений. По измеренным предпороговым вольт-амперным характеристикам определяется коэффициент "n" наклона кривой $\ln(I_{си}) = (U_{зи})$ (единая величина для транзисторов одного типа проводимости с разными размерами). Из выражения (5.17) определяется плотность заряда N_{it} [$1\cdot\text{см}^{-2}$] на границе раздела Si–SiO₂ в необлученных транзисторах. Остальные параметры модели, в частности коэффициент крутизны, определяют методом

наименьших квадратов по измеренным вольт-амперным характеристикам транзисторов в области сильной инверсии.

Определение параметров модели для облученных транзисторов

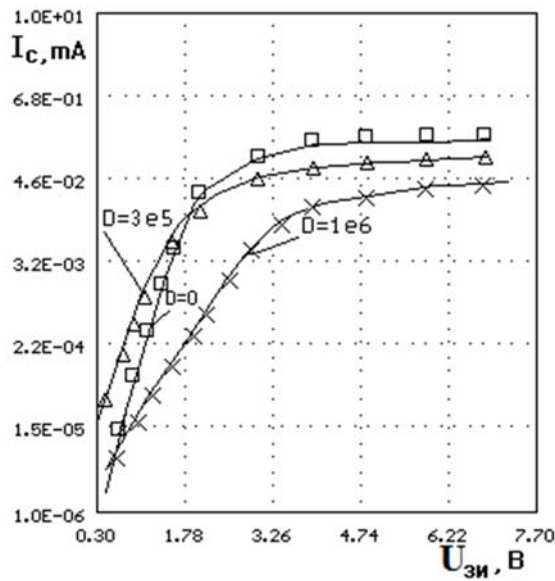
Для этого определения величин наведенных облучением зарядов используется метод предпороговых вольт-амперных характеристик [49]. Данный метод оперирует непосредственно с вольт-амперными характеристиками облученных транзисторов, поэтому он более предпочтителен по сравнению с методом C-U-характеристик. Измеряются зависимости тока стока $I_{си}$ от напряжения на затворе $U_{зи}$ при $U_{си}=0,05...0,1$ В для ряда полученных доз. Из величины наклона предпороговых характеристик по выражениям (5.16)– (5.17) определяются плотности зарядов N_{it} [$1\cdot\text{см}^{-2}$] на границе раздела Si–SiO₂ для каждой полученной дозы. Из крутизны сток-затворной характеристики транзистора в области сильной инверсии получают величину $A1$ для зависимости подвижности от поверхностных состояний в выражении (5.17). Плотность заряда в оксиде определяется из величины сдвига порогового напряжения после облучения и известного значения заряда поверхностных состояний.

По полученным зависимостям наведенных облучением зарядов от дозы определяются коэффициенты выражений (5.11), (5.12). Коэффициенты определяются, по методу наименьших квадратов по критерию наилучшего описания зависимостей $Q_{от}$ и Q_{it} от дозы, полученных из измерений.

Результаты определения параметров схемотехнических моделей

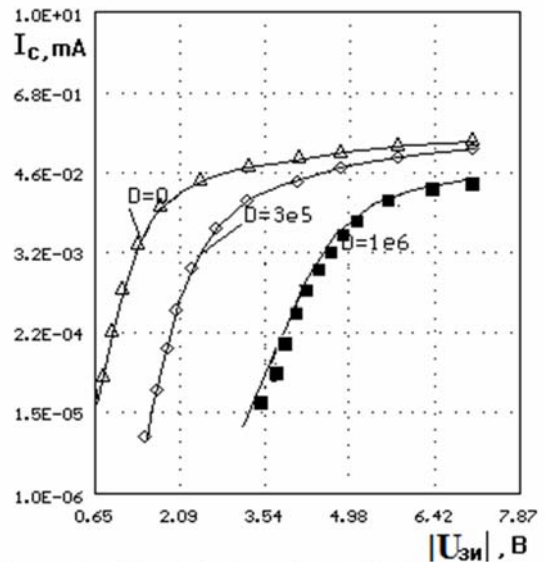
Параметры моделей МДП транзисторов, изготовленных по **КНС технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм** приведены в табл. 5.7, а измеренные и смоделированные входные и выходные ВАХ транзисторов, в том числе с LDD-областями, снятые при различных полученных дозах, приведены на рис. 5.26–5.28. Как видно из приведенных данных, предложенный вариант технологии позволяет повысить крутизну транзисторов примерно в 2,5 раза за счет уменьшения длины канала. Видно также, что предложенная модель обеспечивает для данных транзисторов с

уменьшенной длиной канала несколько худшую, но, тем не менее, удовлетворительную для практических целей точность описания ВАХ в 20%.



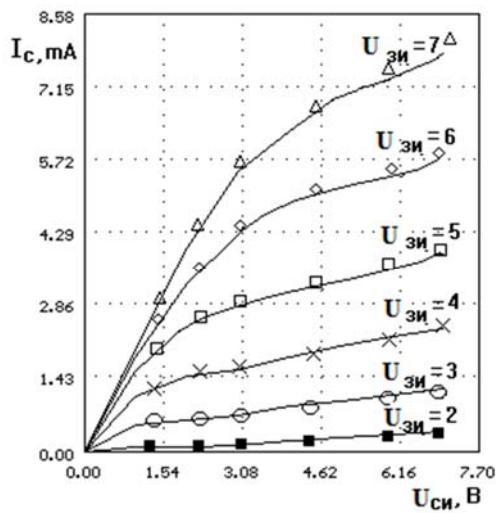
п-канал, SOS 0.6 мкм W/L = 100/6 45-5

а



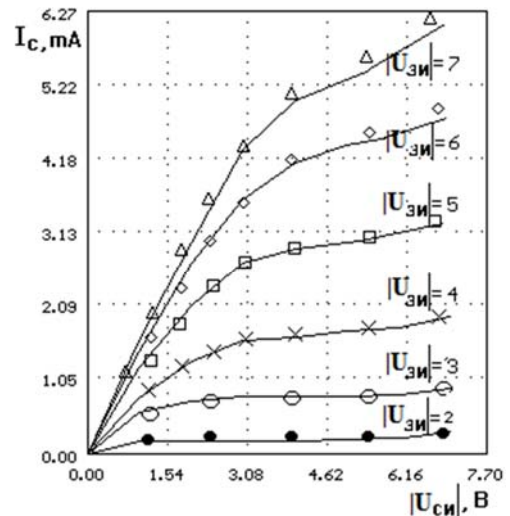
р-канал, SOS 0.6 мкм W/L = 100/6 45-5

б



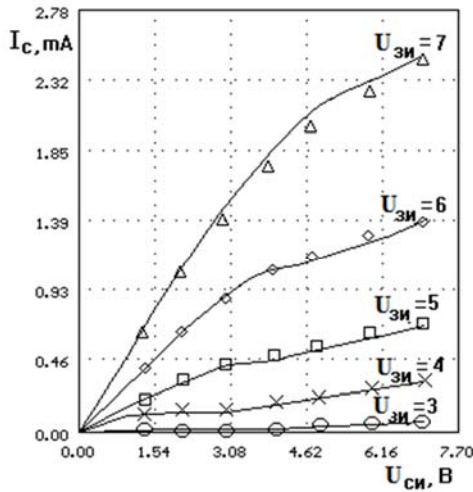
п-канал, сапфир 0.6 W/L = 100/6 D=0

в



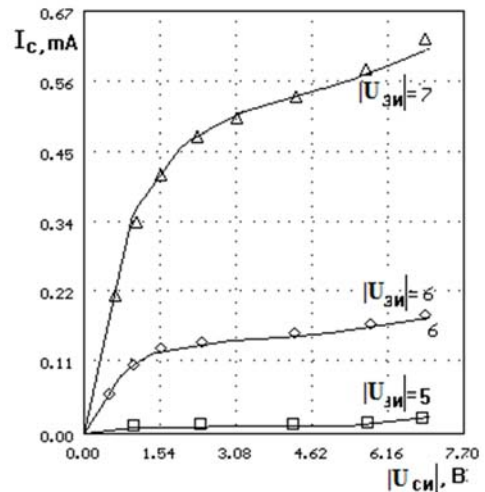
р-канал, сапфир 0.6 W/L = 100/6 D=0

г



n-канал, сапфир $0.6W/L = 100/6$ D=1Мрад

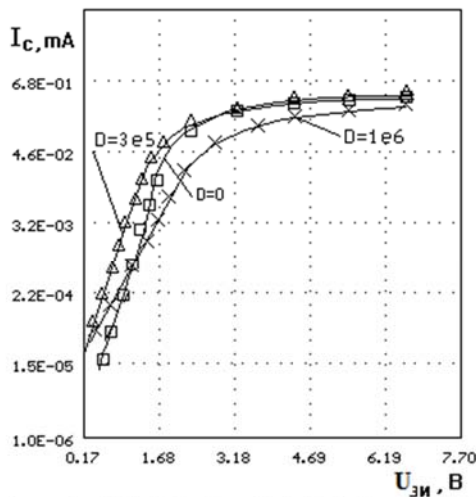
д



p-канал, сапфир $0.6W/L = 100/6$ D=1Мрад

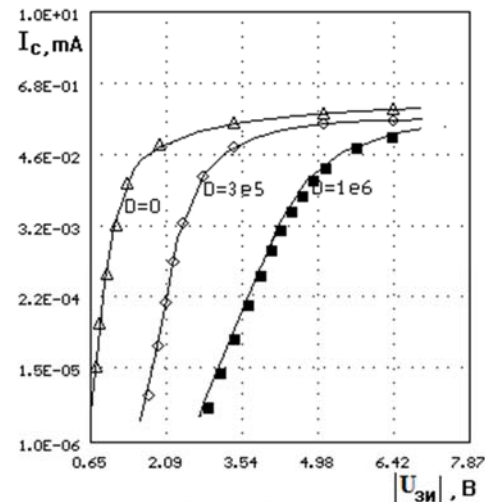
е

Рис. 5.26. Входные (а), (б) и выходные (в)–(д) вольт-амперные характеристики n-канального (а), (в), (д) и p-канального (б), (г), (е) МДП-транзисторов с $W/L=100/6$ мкм, изготовленных по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм. Значки – экспериментальные значения, сплошная линия – расчет по предлагаемой модели. Данные приведены для необлученного транзистора (а)–(в) и после полученной дозы 1 Мрад (д), (е)



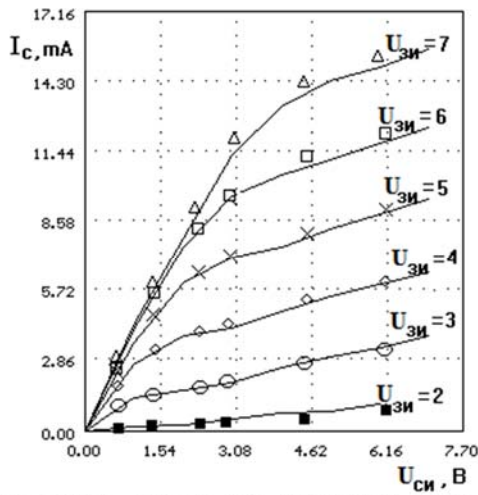
n-канал, SOS $0.6\mu\text{m}W/L = 100/445-5$

а



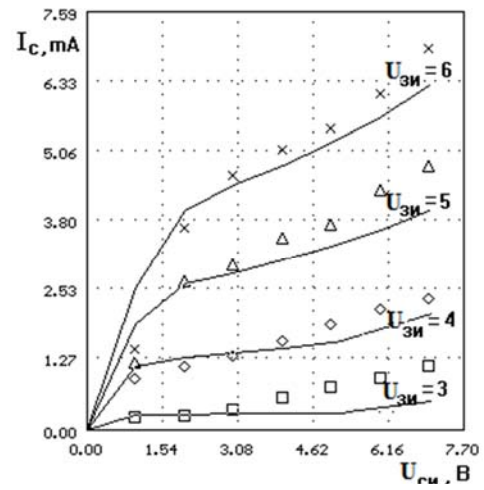
p-канал, сапфир $0.6W/L = 100/6$ 45-5

б



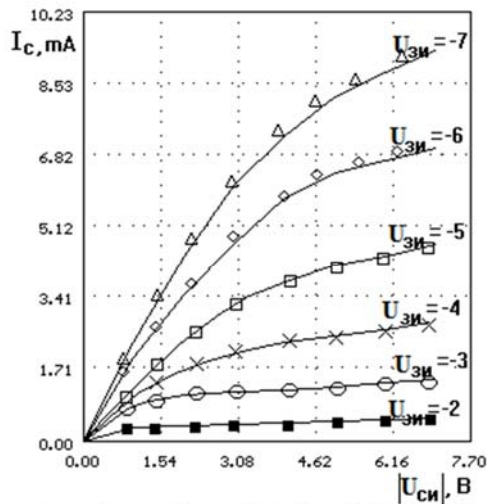
п-канал, сапфир $0.6W/L = 100/4D=0$

В



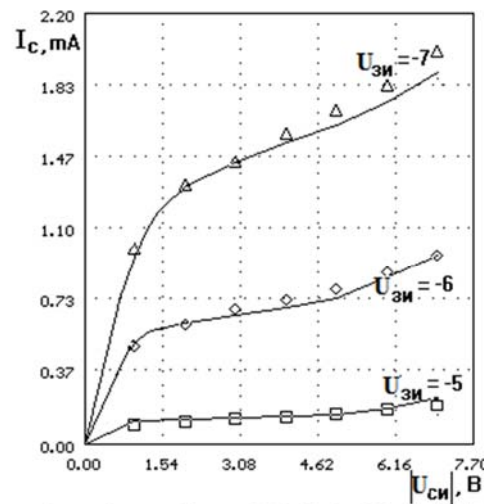
п-канал, сапфир $0.6W/L = 100/4D=1\text{Мрад}$

Г



р-канал, сапфир $0.6W/L = 100/4D=0$

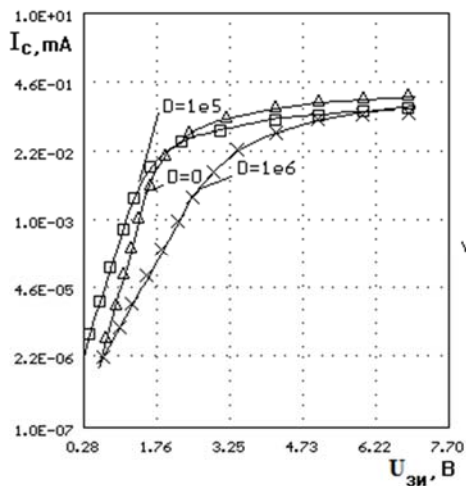
Д



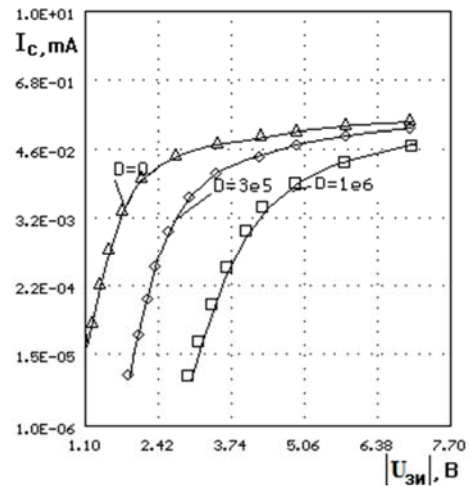
р-канал, сапфир $0.6W/L = 100/4D=1e6$

Е

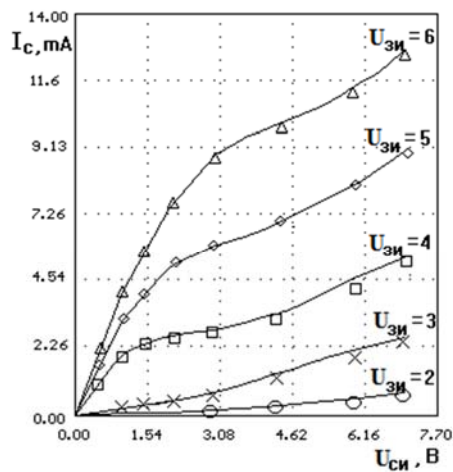
Рис. 5.27. Входные (а), (б) и выходные вольт-амперные характеристики *n*-канального (в), (г) и *p*-канального (д), (е) МОП-транзисторов с $W/L=100/4$ мкм, изготовленных по КНС технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм. Значки—экспериментальные значения, сплошная линия— расчет по предлагаемой модели. Данные приведены для необлученного транзистора (в), (г) и после полученной дозы 1 Мрад (д), (е)



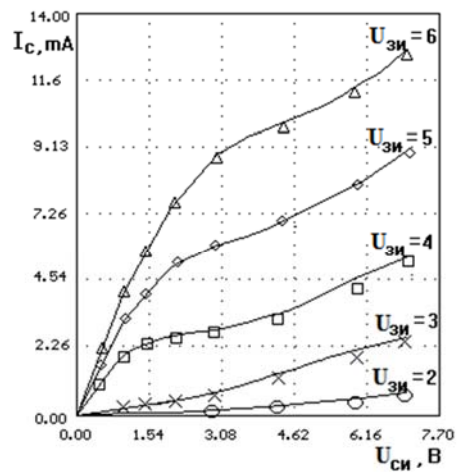
а n-канал, сапфир $0.3W/L = 100/6$



б p-канал, сапфир $0.3W/L = 100/6$



в n-канал, сапфир $0.3W/L = 100/6D=6$



г n-канал, сапфир $0.3W/L = 100/6D=0$

а б в г

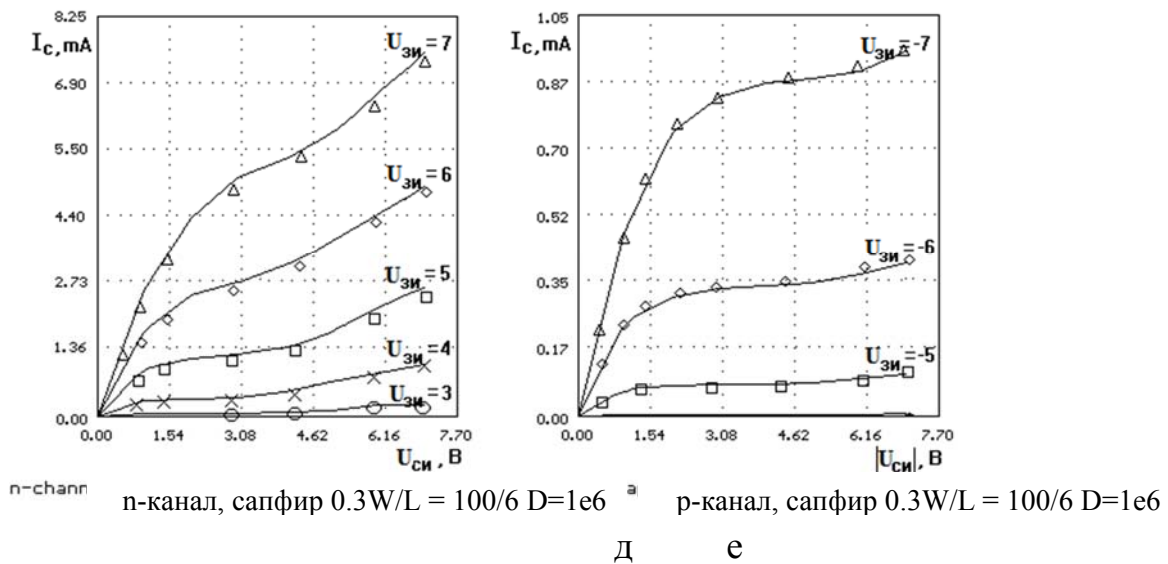


Рис. 5.28. Входные (а), (б) и выходные (в)–(д) вольт-амперные характеристики n -канального (а), (в), (д) и p -канального (б), (г), (е) МДП-транзисторов с $W/L=100/6$ мкм, изготовленных по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,3 мкм. Значки – экспериментальные значения, сплошная линия – расчет по предлагаемой модели. Данные приведены для необлученного транзистора (а)–(в) и после полученной дозы 1 Мрад (д), (е)

Экспериментальные данные для транзисторов при стационарном облучении показывают немонотонную зависимость порогового напряжения n -канальных МОП-транзисторов от полученной дозы: сначала пороговое напряжение уменьшается, а затем возрастает. Это объясняется разной крутизной зависимости наведенных облучением зарядов от дозы: заряд дырочных ловушек N_{ot} растет медленнее, чем заряд поверхностных состояний N_{it} . В качестве примера на рис. 5.25 приведены полученные зависимости N_{ot} и N_{it} от дозы облучения D для n - и p -канального МОП-транзисторов, изготовленного по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм.

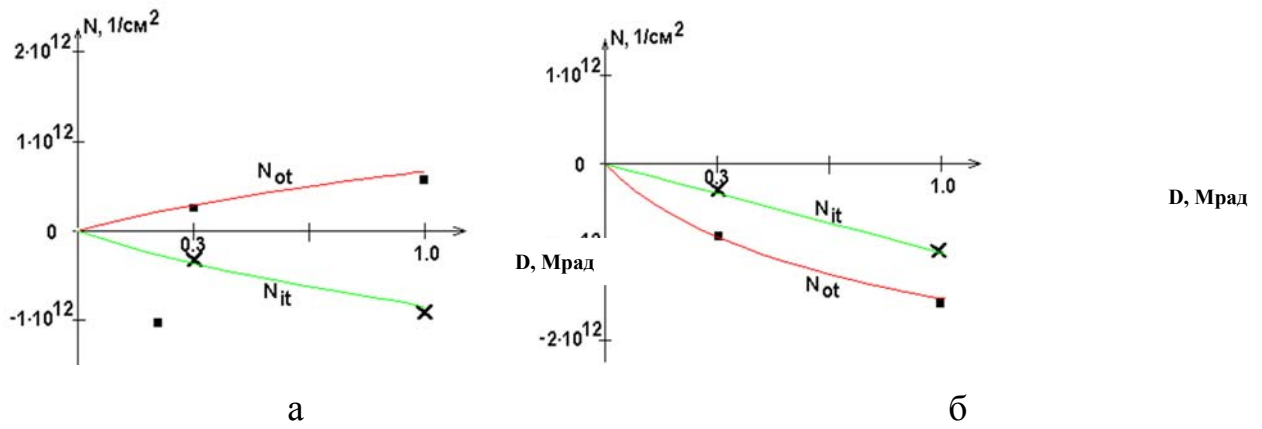
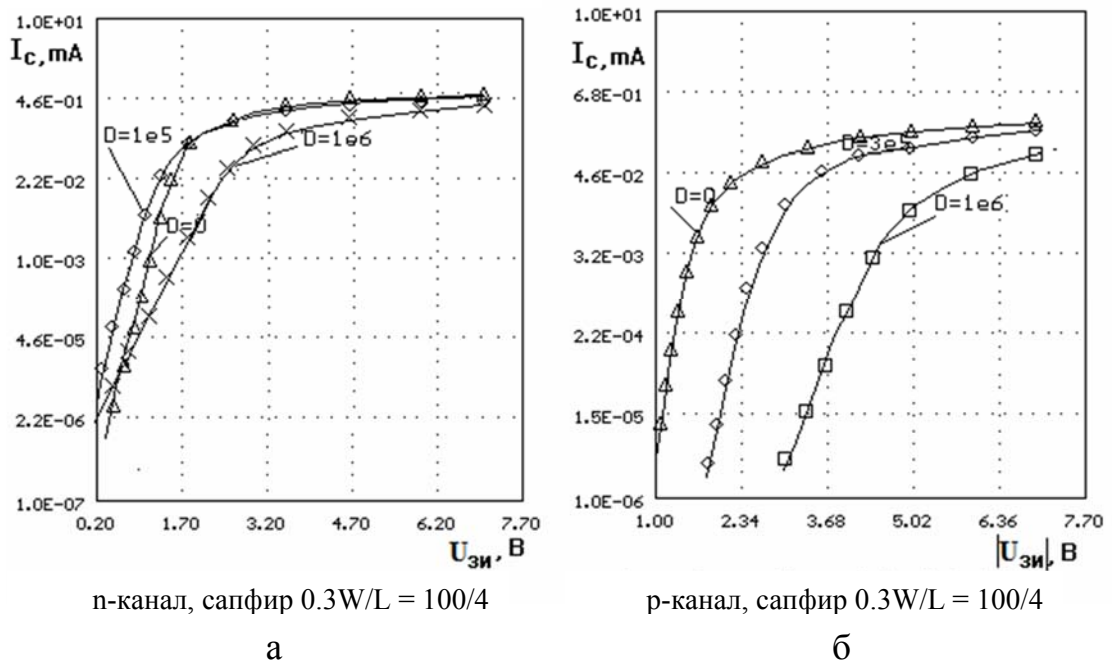
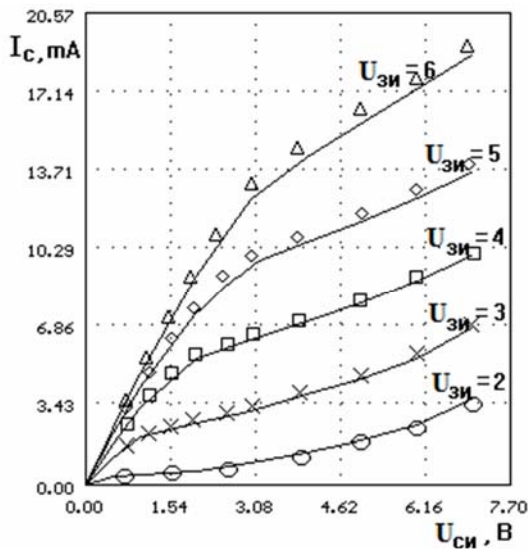
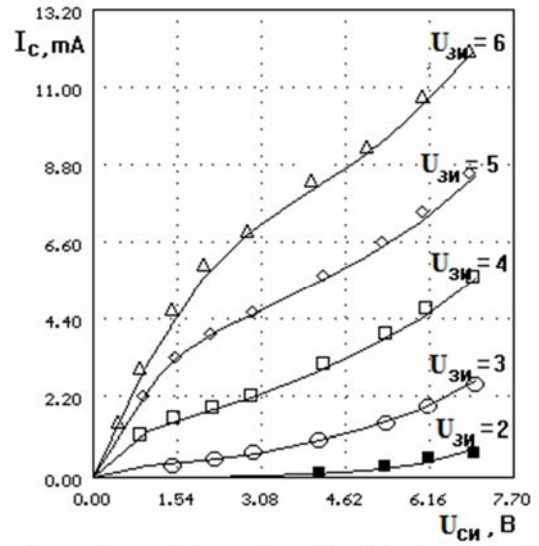


Рис. 5.25. Зависимости плотностей наведенных облучением зарядов в окисле N_{ot} и поверхностных состояний N_{it} для n -канального (а) и p -канального (б) МОП-транзисторов с $W/L=100/4$ мкм, изготовленных по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм. Значки—экспериментальные значения, сплошная линия—расчет по предлагаемой модели



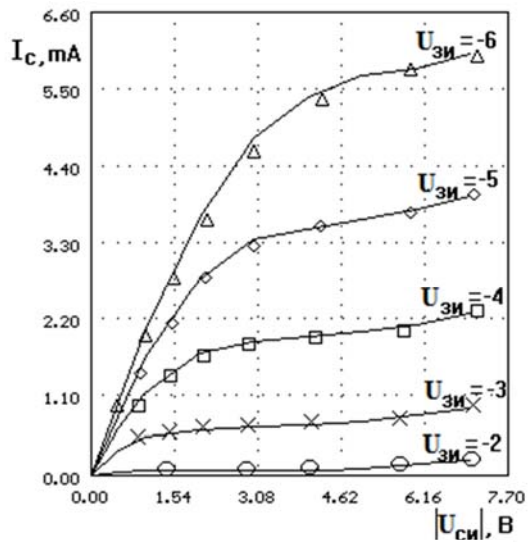


п-канал, сапфир $0.3W/L = 100/4D=0$



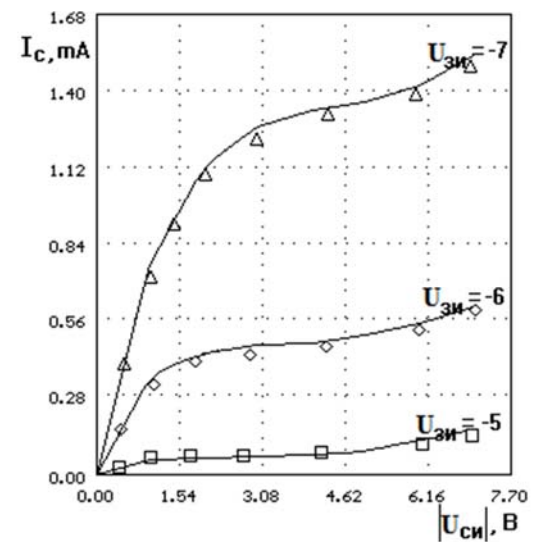
п-канал, сапфир $0.3W/L = 100/4 D=1e6$

В



р-канал, сапфир $0.3W/L = 100/4D=0$

Г

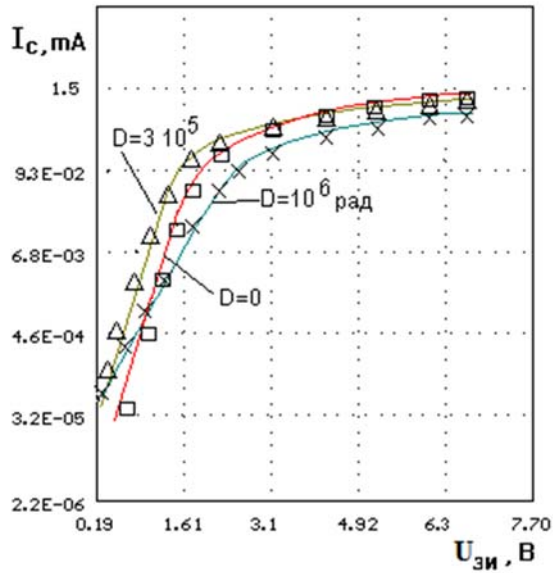


р-канал, сапфир $0.3W/L = 100/4 D=1e6$

Д

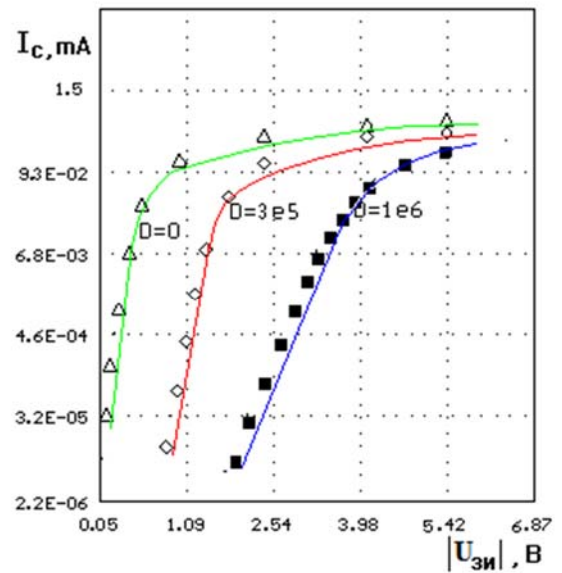
е

Рис. 5.29. Входные (а), (б) и выходные (в)–(д) вольт-амперные характеристики *n*-канального (а), (в), (д) и *p*-канального (б), (г), (е) МДП-транзисторов $W/L=100/4$ мкм, изготовленных по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,3 мкм. Значки–экспериментальные значения, сплошная линия–расчет по предлагаемой модели. Данные приведены для необлученного транзистора (а)–(в) и после полученной дозы 1 Мрад (д), (е)



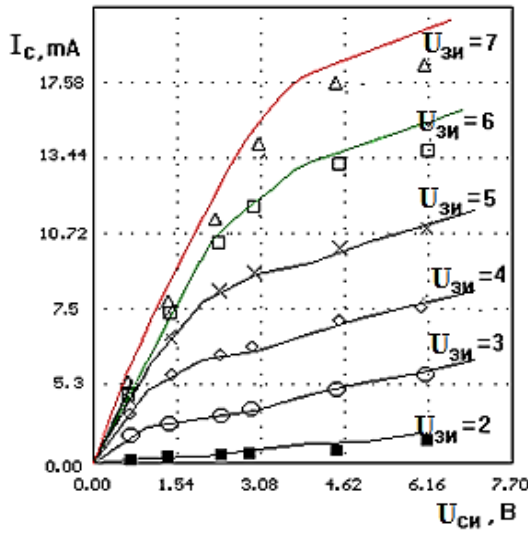
п-канал, SOS 0.6мкм W = 100,спейсер

а



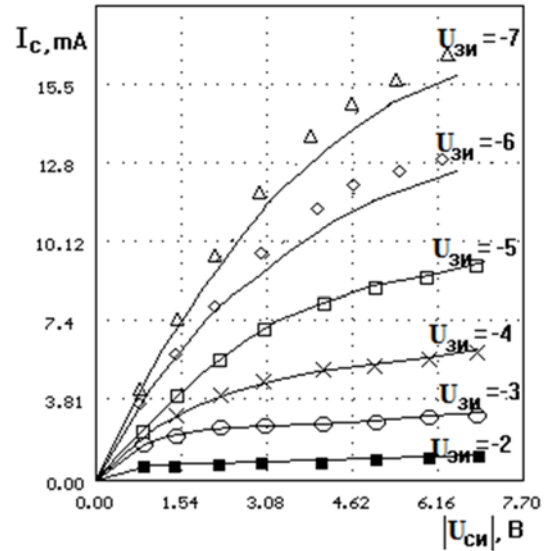
р-канал, SOS 0.6мкм W = 100, спейсер

б



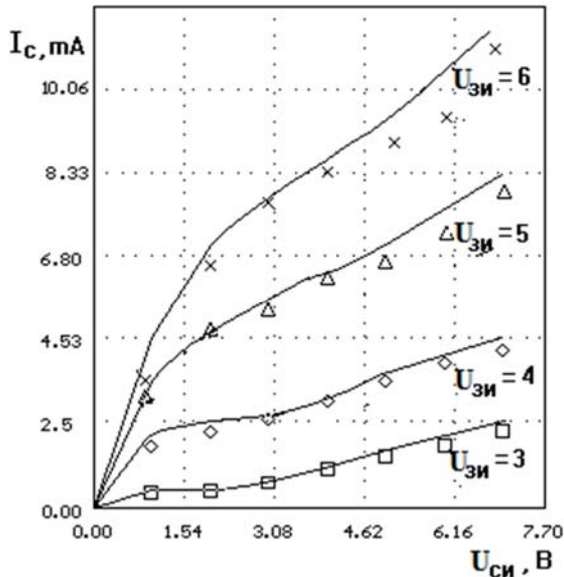
п-канал, сапфир 0.6W = 100,спейсер, D=0

в

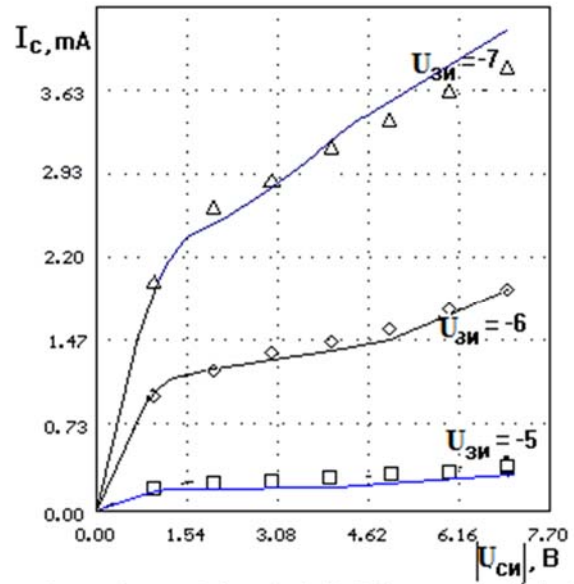


р-канал, сапфир 0.6W = 100,спейсер, D=0

г



п-канал, сапфир $0.6W = 100$, спейсер, 1Мрад
д



р-канал, сапфир $0.6W = 100$, спейсер, $D=1e6$
е

Рис. 5.30. Входные (а), (б) и выходные (в)–(д) вольт-амперные характеристики *n*-канального (а), (в), (д) и *p*-канального (б), (г), (е) МДП-транзисторов с $W/L=100/1,1$ мкм, изготовленных по КНС технологии со слабо легированными областями стока и истока с толщиной слоя кремния 0,6 мкм. Значки–экспериментальные значения, сплошная линия– расчет по предлагаемой модели. Данные приведены для необлученного транзистора (а)–(в) и после полученной дозы 1 Мрад (д), (е).

n-канальные транзисторы

Параметр	$D=0$	$D=3 \cdot 10^5$ рад	$D=10^6$ рад	Единицы измерения
U_{to}	1,26			В
$U_{to}(D)$		0,3	1,4	Вt
U_o	455			$\text{см}^2/\text{Вс}$
$U_o(D)$		217	161	$\text{см}^2/\text{Вс}$
N_{sub}	$1,2 \cdot 10^{16}$			см^{-3}
T_{ox}	$5,0 \cdot 10^{-8}$			м
R_j	$0,4 \cdot 10^{-6}$			м
U_{max}	$1,3 \cdot 10^7$			см/с
Θ	0,27			
κ	0,62			
Δ	0,19			
η	3,4			

Ld	$1,2 \cdot 10^{-7}$			м
Wd	$1,0 \cdot 10^{-7}$			м
Параметры, описывающие зависимость от облучения.				
aot	$2,2 \cdot 10^{-10}$			
bot	0,65			
ait	$4,4 \cdot 10^{-10}$			
bit	0,97			
A1	$0,8 \cdot 10^{-7}$			
Паразитный биполярный транзистор				
Is	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	А
Bf	5	4	4	
Стабилитрон, учитывающий лавинную генерацию.				
Is	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	А
Bv	4	4	4	В
Ibv	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	А
Rs	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	Ом

p-канальные транзисторы

Параметр	D=0	D= $3 \cdot 10^5$ рад	D= 10^6 рад	Единицы измерения
Uto	-0,99			В
Uto(D)		-2,79	-4,9	Вт
Uo	213			см ² /Вс
Uo(D)		154,4	88	см ² /Вс
Nsub	$3 \cdot 10^{14}$			см ⁻³
Tox	$5,0 \cdot 10^{-8}$			м
Rj	$0,6 \cdot 10^{-6}$			м
Umax	$1,3 \cdot 10^7$			см/с
Theta	0,32			
Kappa	0,51			
Delta	0,2			
Eta	4,4			
Ld	$1,2 \cdot 10^{-7}$			м
Wd	$1,0 \cdot 10^{-7}$			м

Параметры, описывающие зависимость от облучения.				
aot	$0,12 \cdot 10^{-8}$			
bot	0,54			
ait	$4,6 \cdot 10^{-11}$			
bit	0,98			
A1	$0,7 \cdot 10^{-7}$			
Паразитный биполярный транзистор				
Is	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	A
Bf	2,5	2,4	2,4	
Стабилитрон, учитывающий лавинную генерацию.				
Is	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	A
Bv	4	4	4	B
Ibv	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	A
Rs	$15 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	Ом

Таблица 5.7. Параметры схемотехнической модели SOS/MIEM для тестовых МДП-транзисторов, изготовленных по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм

5.5. Моделирование КМОП КНС БИС с использованием библиотек стандартных ячеек и функциональных схемных блоков

Рассмотрим два последних уровня моделирования БИС по схеме, приведенной на рис. 5.1: уровень 4 - стандартные ячейки и специализированные схемные блоки; уровень 5 - функционально законченные ИС или БИС.

На **уровне 4** создаются две библиотеки:

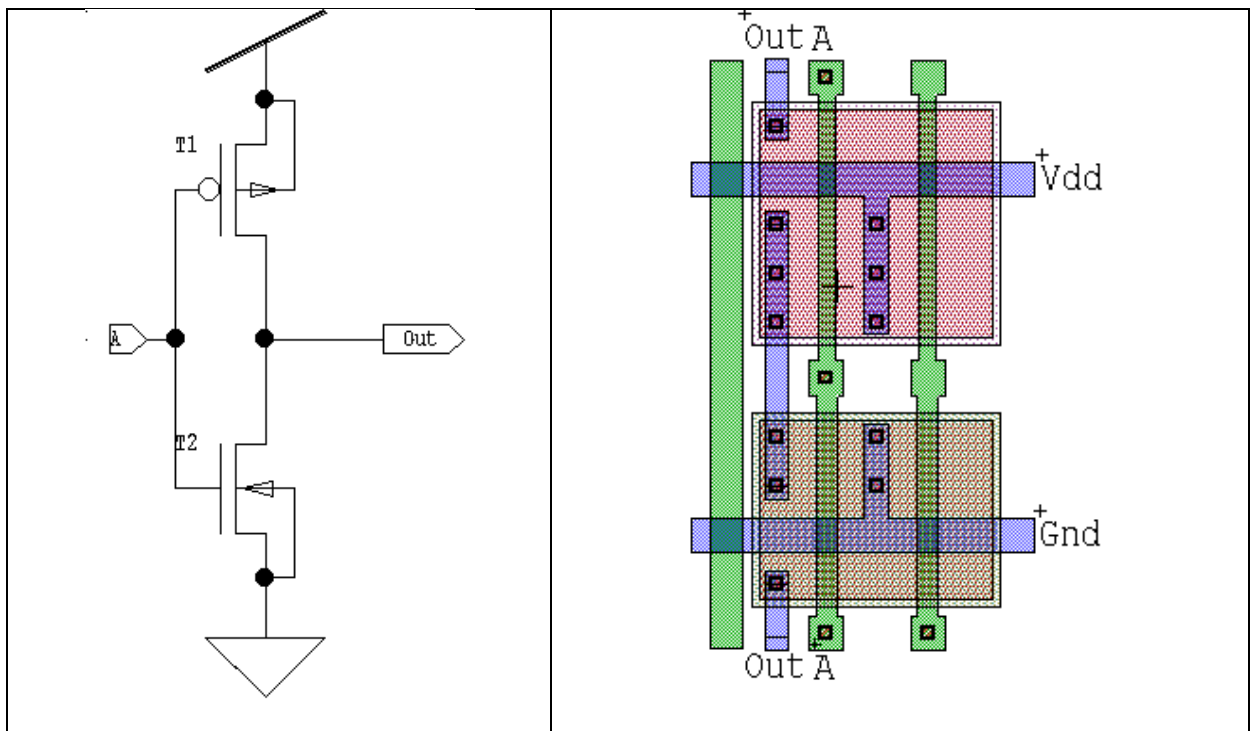
- 1) библиотека стандартных цифровых ячеек для цифрового КМОП КНС БМК "Мелисса";

2) библиотека функциональных схемных блоков для полузаказных радиационно-стойких АЦ БИС. Каждая из перечисленных библиотек строится на базе n- и p-канальных МОП-транзисторов, изготовленных по технологиям SOS2, SOS3 и SOS4, аттестованных с точки зрения радиационной стойкости.

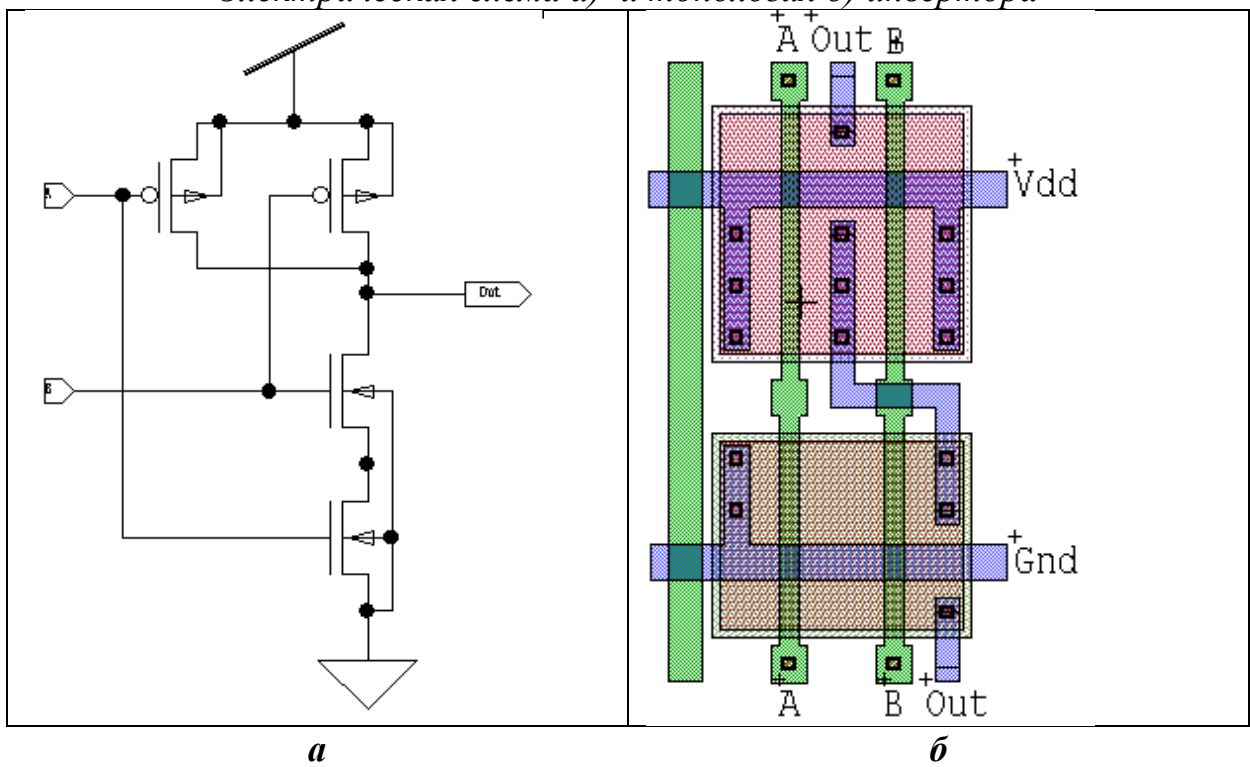
Для отработки схемотехнических решений цифровых ячеек и функциональных блоков использовался пакет моделирования T-SpicePro, а для создания их топологии – интерактивный графический редактор L-Edit, входящие в систему проектирования интегральных схем Tanner.

Рассмотрим библиотеку цифровых стандартных ячеек на примере нескольких ячеек (рис. 5.31), входящих в набор элементов цифрового радиационно-стойкого БМК “Мелисса”, конструкция и характеристики которого подробно описаны в разделе 6.2.

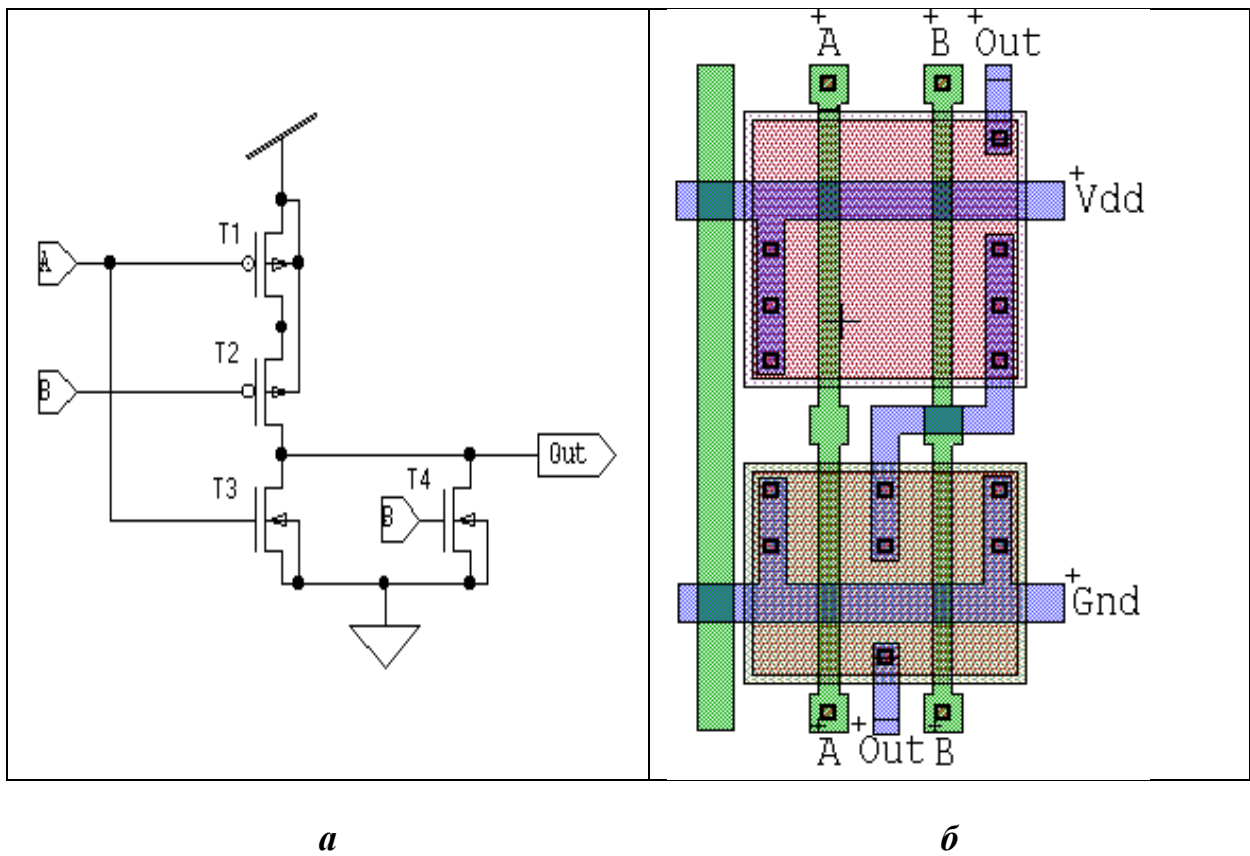
Важное место в номенклатуре полузаказных радиационно-стойких АЦ БИС, изготавливаемых отечественными предприятиями по технологии SOS3, занимают БИС аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. Это сложные функциональные изделия, проектирование которых является трудоемкой задачей и слабо поддается автоматизации, в отличие от чисто цифровых схем. Использование библиотеки основных функциональных схемных блоков, входящих в состав БИС АЦП/ЦАП, сильно облегчает решение данной задачи.



а *б*
 Электрическая схема *а*) и топология *б*) инвертора



а *б*
 Рис. 5.31 *а*). Электрическая схема *а*) и топология *б*) элемента 2И-НЕ



Электрическая схема а) и топология б) элемента 2ИЛИ-НЕ

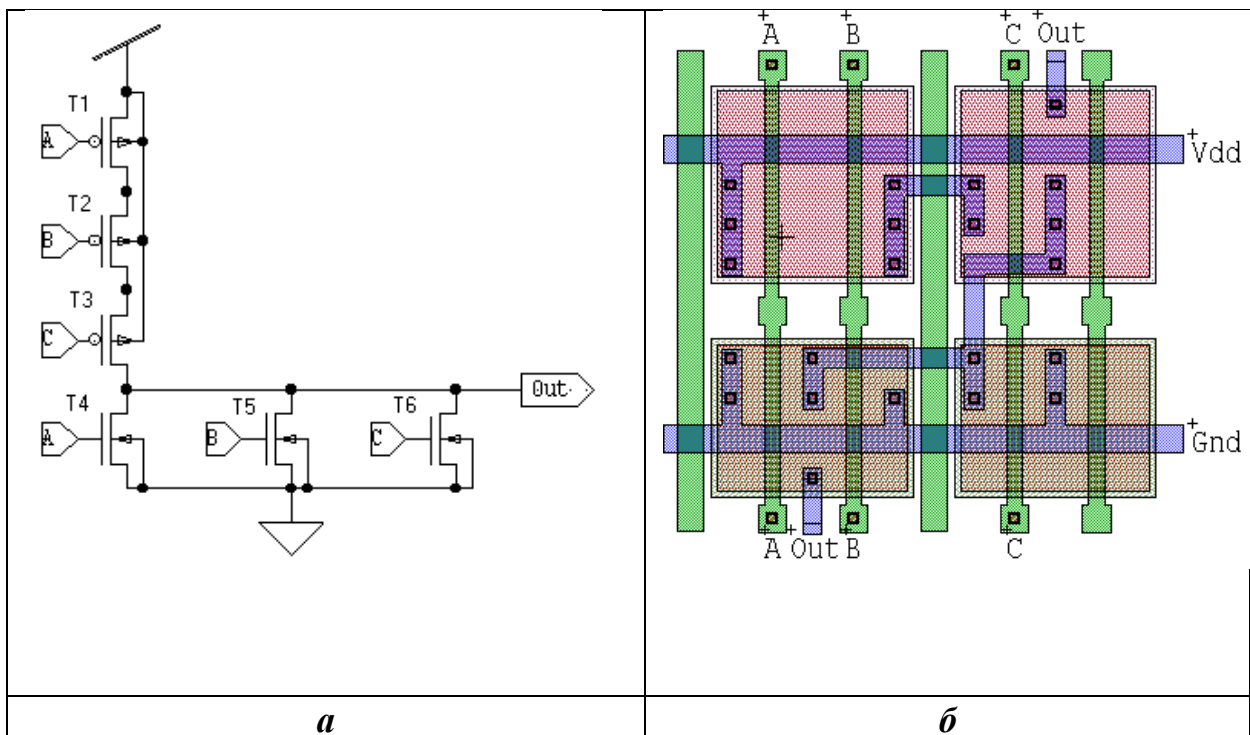
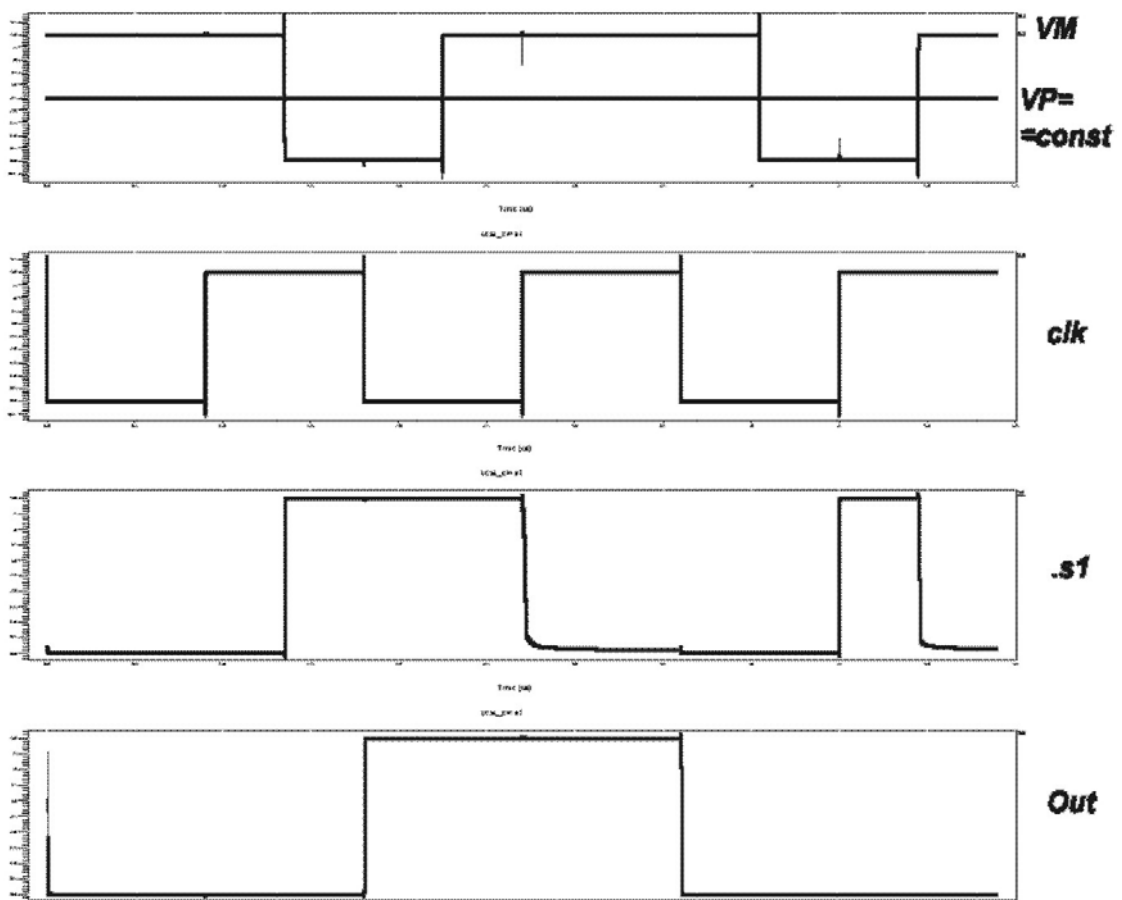
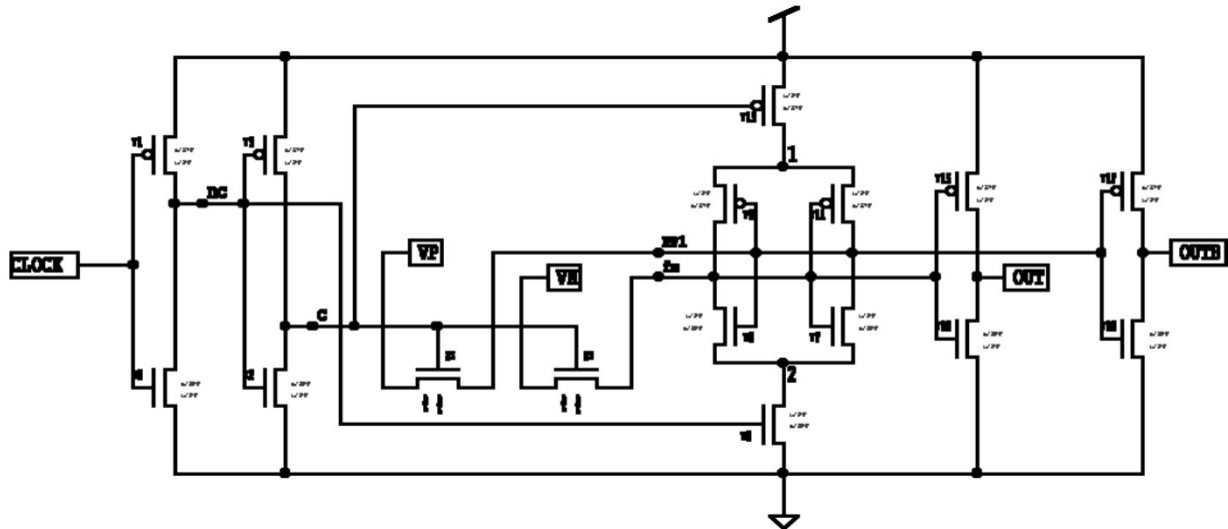


Рис. 5.30 (б). Электрическая схема а) и топология б) элемента 3ИЛИ-НЕ

В качестве примера, на рис. 5.32 и 5.33 приведены электрические схемы, топологии и временные диаграммы работы двух основных функциональных блоков БИС АЦП/ЦАП: компаратора (рис. 5.32) и ЦАП (рис. 5.33).



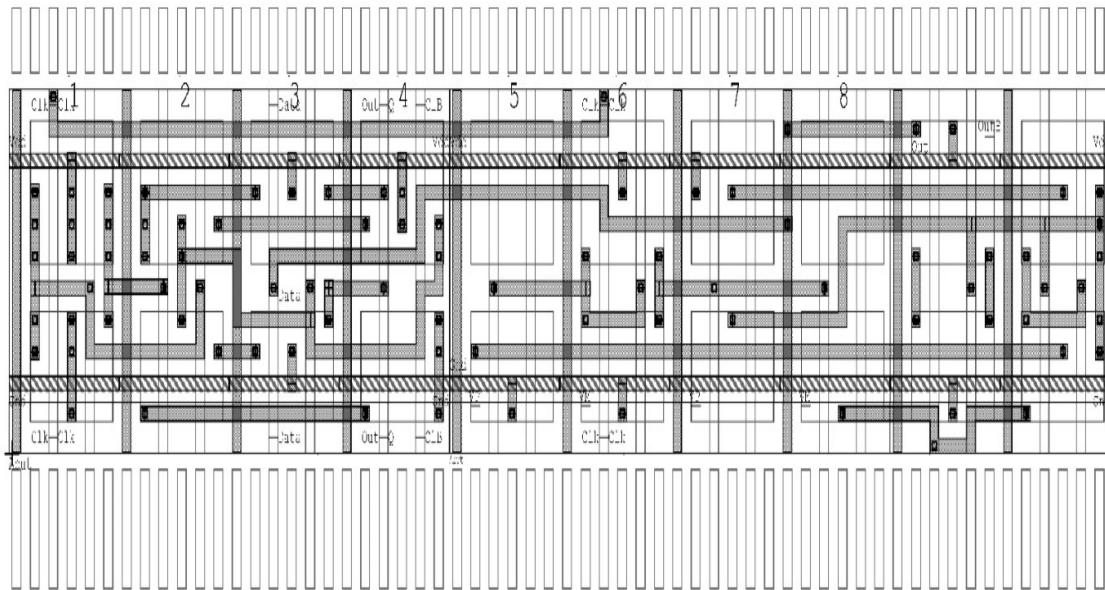
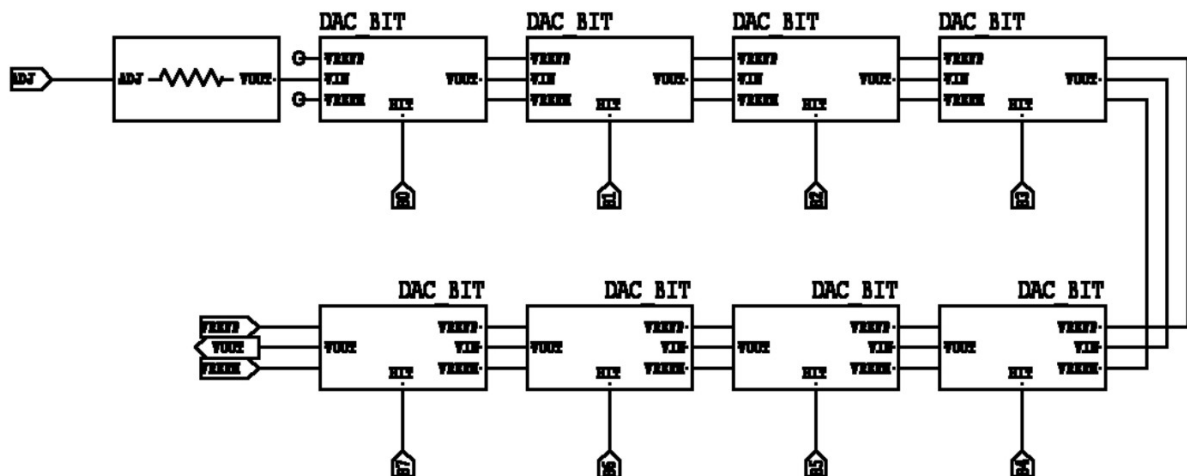


Рис.5.32. Электрическая схема, временные диаграммы работы и топология компаратора



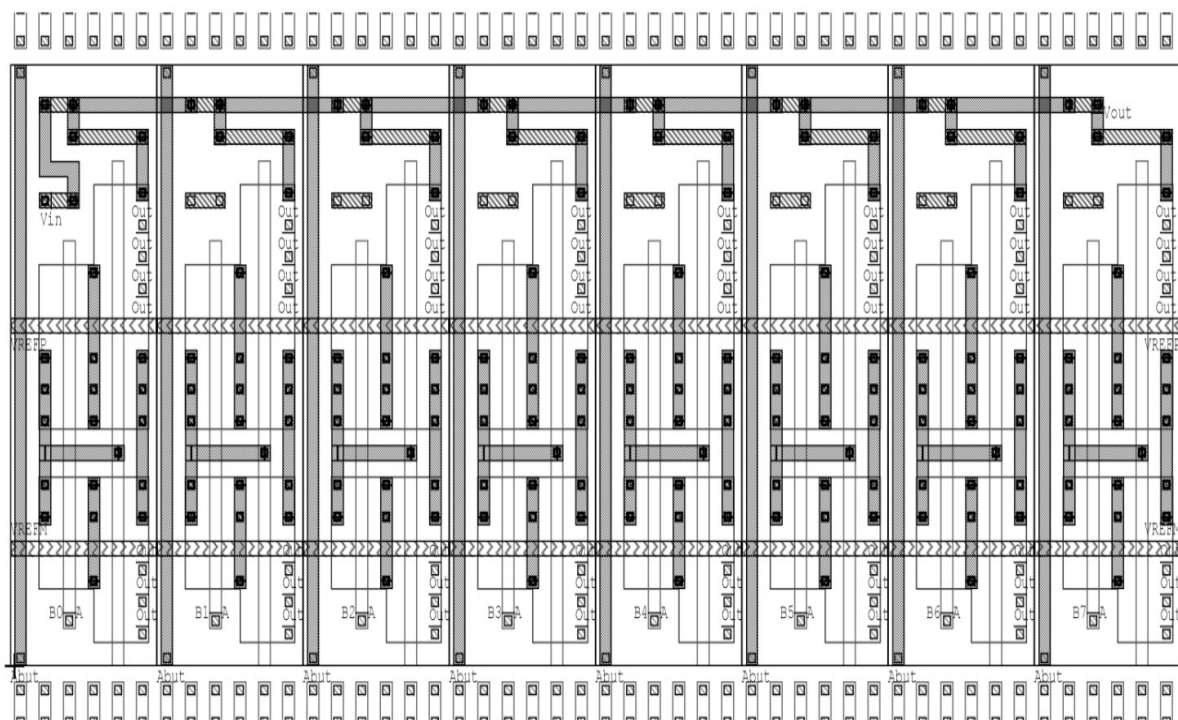


Рис 5.33. Электрическая схема и топология восьмиразрядного ЦАП

Уровень 5. На этом уровне осуществляется моделирование сложных логических и временных диаграмм работы функционально законченных ИС или БИС в целом, а также характеристик и параметров, определяющих их радиационную стойкость. Описание БИС и ввод информации в программу моделирования осуществляется на уровне стандартных ячеек или функциональных схемных блоков. Используя описанный подход, показана возможность и даны рекомендации по переводу широко используемой в аппаратуре коммерческой 564 серии микросхем, изготавливаемых рядом отечественных предприятий по КМОП технологии объемного кремния, на радиационно-стойкий вариант, изготавливаемый по КМОП КНС технологии. На рис. 5.34 приведена принципиальная схема одного канала четырехразрядного двоичного счетчика, выполненного в виде аналога микросхемы 564ИЕ10.

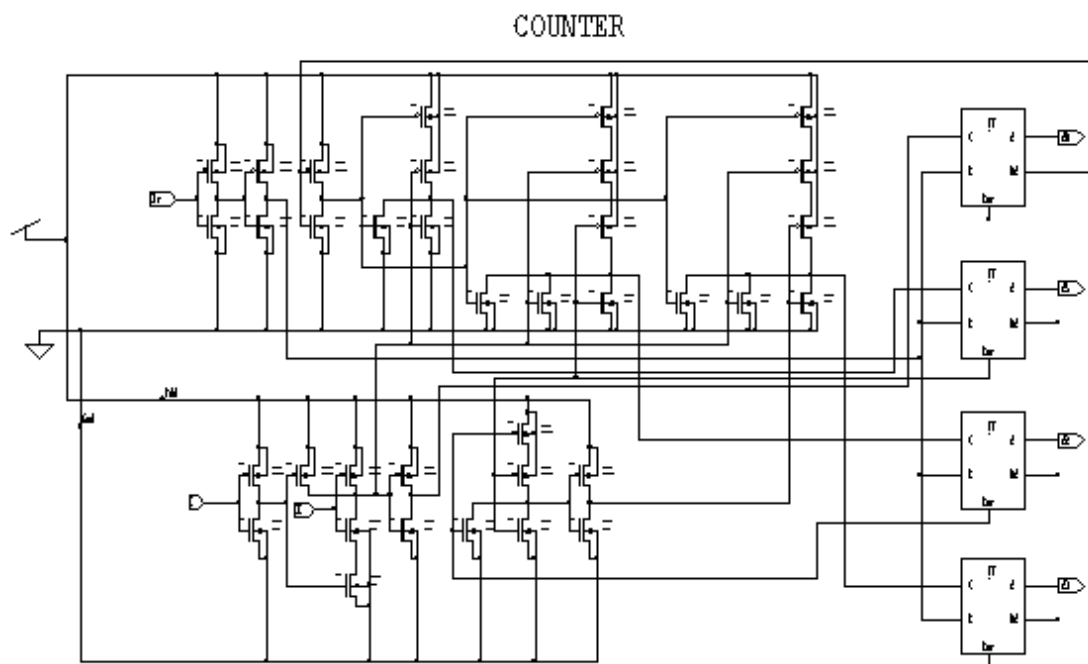


Рис. 5.34. Электрическая схема четырехразрядного двоичного счетчика

Схема рис. 5.34 была реализована на стандартных цифровых ячейках радиационно-стойкого КМОП КНС БМК “Мелисса”. Моделирование временных диаграмм работы схемы счетчика выполнялось с помощью программы T-SpicePro. На рис. 5.35 и 5.36 представлены эпюры сигналов на выходах $Q(0) \div Q(3)$ микросхемы, работающей на нагрузку $C_n = 50$ пФ, для двух режимов: без облучения (рис. 5.35) и после воздействия статической дозы радиации $D = 300$ крад (рис. 5.36).

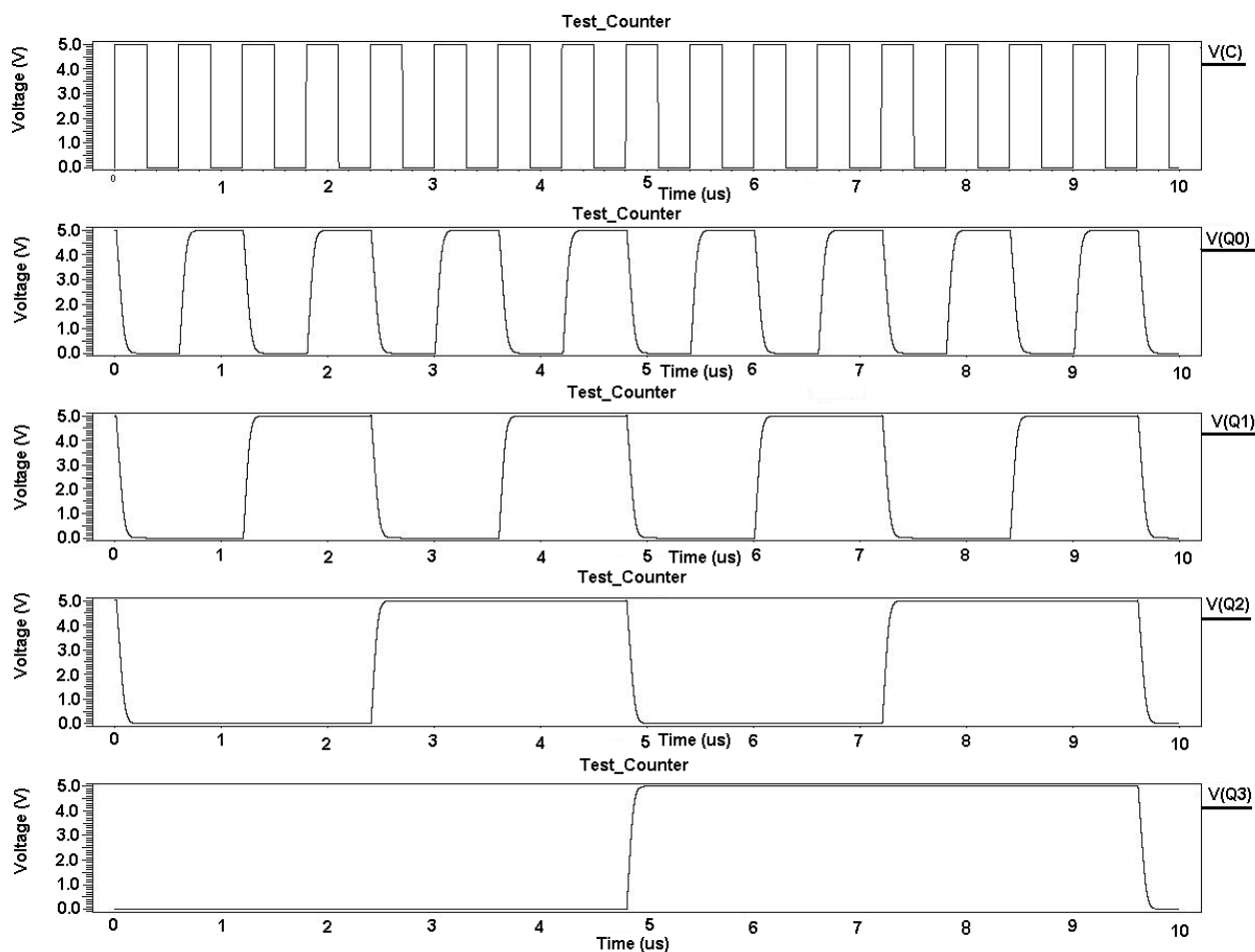


Рис. 5.35. Временные диаграммы работы необлученного счетчика с нагрузкой 50 пФ

Из результатов моделирования видно, что подвергнутый воздействию радиации с дозой $D=300$ крад счетчик сохраняет свою работоспособность. Однако времена задержек переключения у облученной схемы, по сравнению с необлученной, увеличиваются в 1,7÷4,5 раза (см. данные табл. 5.8 и 5.9). С помощью моделирования были проведены тактовые оценки предельной дозы радиации, при которой схема счетчика еще сохраняет свою способность, т.е. правильно (без сбоя) отрабатывает временные диаграммы. Это значение равно $D_{\text{ПРЕД}} = 500$ крад и хорошо согласуется с результатами радиационных испытаний микросхем.

Выход	t_{3}^{01} , нс	t_{3}^{10} , нс	t_{ϕ}^{01} , нс	t_{ϕ}^{10} , нс
Q0	42,52	50,17	71,36	81,93
Q1	43,4	50,4	71,2	81,6
Q2	43,0	49,9	72,2	83,3
Q3	42,8	50,0	73,8	82,5

Таблица 5.9. Времена задержек необлученной схемы счетчика с нагрузкой 50 пФ

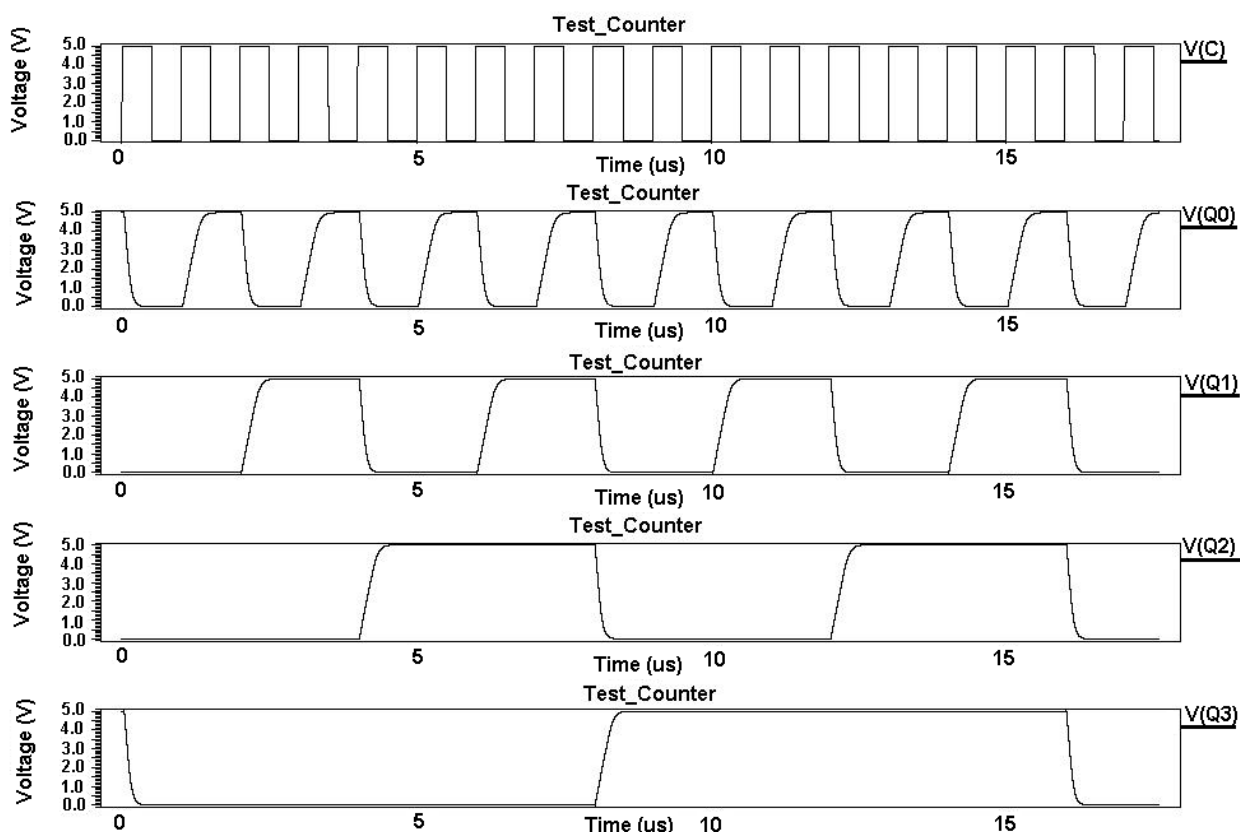


Рис. 5.36. Временные диаграммы работы счетчика в условиях облучения с $D=3 \cdot 10^5$ Рад и с нагрузкой 50 пФ

Выход	t_{3}^{01} , нс	t_{3}^{10} , нс	t_{ϕ}^{01} , нс	t_{ϕ}^{10} , нс
Q0	190,7	95,3	287,9	145,8
Q1	193,9	87,3	274,8	143,1
Q2	181,6	95,1	327,1	130,8
Q3	183,0	90,5	294,4	163,6

Таблица 5.10. Времена задержек облученной схемы счетчика с нагрузкой 50 пФ

ГЛАВА 6. Отечественные радиационно-стойкие интегральные схемы со структурой «кремний на сапфире»

Работы по освоению технологии «кремний на сапфире» и созданию КПОМ БИС на её основе в нашей стране ведутся параллельно с зарубежными фирмами, как отмечено в гл.1, более 30 лет.

Основные показатели по радиационной стойкости, достигнутые отечественной промышленностью, приведены в табл. 1 и практически соответствуют зарубежному уровню.

Отечественными предприятиями разработаны и освоены различные группы структур кремния на сапфире, имеющих специальное прикладное значение. Ниже приведена их краткая характеристика и указаны области основного использования.

I. ЕТО 035.373 ТУ, КГЯ Д 430107.000 ТУ на структуры КНС – 0,6 мкм:

а) 1 диапазон (n-тип, $\rho_p \sim 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

(однокарманная технология с перекомпенсацией для p-кармана)

для цифровых КМОП БИС с повышенной радиационной стойкостью (проектные нормы 4–6 мкм; базовый матричный кристалл с проектными нормами 3–4 мкм);

б) 0 диапазон (i-тип, $\rho \geq 30\text{--}50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

Для оптоэлектронных КМОП БИС и ФЭМ (фотоэнергетических модулей).

II. КГЯ Д 430107.000ТУ, ЕТО 035.659 ТУ на структуры КНС – 0,3 мкм:

а) 1 диапазон (n-тип, $\rho_p \sim 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

для цифровых, аналого-цифровых и специальных БИС с повышенным уровнем бессбойной работы (УБР) с проектными нормами 2–3 мкм;

Уровень отечественных работ по созданию радиационно-стойких БИС КМОП КНС.

Название фирмы	Тип микросхемы, уровень технологии	Радиационная стойкость
ОАО НПП «Сапфир»	ОЗУ серии Б1620 SOS2 (SC, FC; 4 мкм)	D=0.2-1Мрад TU>10 ¹² рад/с
	Микропроцессорный комплект серии Б1825, SOS2 (SC; 4 мкм)	D=0.2-1Мрад TU>5×10 ¹⁰ рад/с
	БМК SOS2(SC; 4мкм)	
	АЦП 6-8 разр. Серии 1523 SOS3 (FC; 2 мкм)	D>0.1 Мрад TU>10 ¹⁰ рад/с
	АЦП 8 разр. тест. модуль SOS4 (FC; 1.5 мкм)	D>0.1 Мрад TU>10 ¹⁰ рад/с
ОАО «Ангстрем»	Микропроцессорный комплект серии 1825, ОЗУ серии 1620 SOS2, SOS3 (FC; 3-4 мкм) БМКсерии 5517 SOS3,SOS4 (SC; 2.0-0.8 мкм)	TU>6×10 ¹⁰ рад/с
ФГУПФНПЦИ ИИС им. Ю.Е.Седапова	Микропроцессорный комплект серии 1825, ОЗУ серии 1620 SOS2, SOS3 (FC; 2.5-3.2мкм) БМКсерии 5511 SOS3 (SC; 1.6-2.3мкм)	
ОАО «НПО ИТ»	Базовые элементы аналоговой схемотехники SOS2 (SC,FC; 3.5 мкм)	D>0.2-0.6 Мрад

Аббревиатуры в таблицах 1 и 2:

CG - матрицы со столбцами вентиляей; D – максимальная доза облучения;
 SG - "море" вентиляей; TU – мощность дозы излучения
 SC - набор стандартных ячеек; (гамма-импульс);
 FC - полностью заказная схема; SEU – вероятность сбоя на бит в сутки.

Особенностью отечественного производства радиационно–стойких ИС и БИС со структурой КНС является высокий уровень кооперации предприятий –

производителей и практически одна и та же номенклатура схем, ориентированная на специальные применения.

Ниже приведены параметры и характеристики отечественных микросхем, изготавливаемых по разным поколениям КНС технологии на предприятии ОАО НПП «Сапфир» [1,5,8]. Они в определенной степени являются общими для других предприятий.

Специфика КНС микросхем, изготавливаемых на других предприятиях, приведена в разделе 6.5.

Проектные нормы и напряжения питания БИС, изготовленных на КМОП КНС-технологии, приведены ниже:

Проектные нормы, мкм: 4, 2, 1;

Напряжения питания, В: 4.5...9.5, 4.5...7.5, 2.0...6.0;

6.1. Радиационно-стойкие КМОП БИС, изготовленные по самосовмещенной технологии на структурах КНС 0,6 мкм (SOS-2)

Основной технологический маршрут с каналом транзистора длиной 4–6 мкм реализуется с использованием исходных структур КНС n-типа проводимости с перекомпенсацией в области канала бором, при создании р-кармана n-канальных транзисторов.

Осуществляется промышленный выпуск специализированных интегральных схем КМОП БИС КНС серий Б1825, Б 1620, 1523 и ведутся разработки по созданию БИС других типов.

Микропроцессорный комплект БИС КМОП КНС для построения быстродействующих микромощных ЭВМ серии Б1825

Комплект микросхем серии Б1825 совместно с микросхемами памяти серии Б1620 (ОЗУ 4 кбит; 16 кбит; ПЗУ масочное 16–32 кбит) позволяет обеспечить построение 16 и 32 разрядных многоканальных ЭВМ с глубокой мажоритарией и быстродействием ≥ 1 МГц (задержка «регистр–регистр» 1 мкс, задержка «регистр–ЗУ» 2 мкс).

**Основные эксплуатационные и электрические
характеристики комплекта**

Типовая удельная динамическая мощность потребления, (в расчете на 1 вентиль), мкВт/МГц	1
Тактовая частота, МГц.....	5–10
Диапазон величин питания, В.....	4,5–7,5
Диапазон рабочих температур, ° С.....	от –60 до +85
Применяемая технология изоляции компонентов «Кремний на сапфире» обеспечивает радиационную стойкость:	
поток нейтронов, н/см ²	≥ 10 ¹⁵
полная доза ионизирующих излучений, рад (Si).....	10 ⁵ -10 ⁶
уровень бессбойной работы, рад.....	≥ 5·10 ¹⁰
для специальных ОЗУ уровень бессбойной работы, рад/с	> 10 ¹²
при импульсном излучении, рад/с.....	до 10 ¹²
мощность дозы импульсного излучения, при которой наступает необратимый отказ, рад/с.....	≥ 10 ¹²

Бескорпусное исполнение на алюминиевых полиимидных носителях, обеспечивающее малый вес (менее 0,1 г) и малые габариты.

В состав комплекта входят:

- | | |
|-------------|--|
| Б1825 ВС12 | Центральный процессорный элемент (4-разрядная микропроцессорная секция) содержит 32 регистра общего назначения, счетчик/циклов, сдвиговые регистры, четыре 4–разрядные внешние магистрали обмена. Арифметическое устройство выполняет 32 одно- и двухадресные команды и формирует 4 признака результата операции. |
| Б1825 ВС3-2 | Центральный процессорный элемент (16–разрядная микропроцессорная секция) выполняет арифметические и логические операции, операции сдвига над 8– и 16–разрядными операндами в соответствии с системой микрокоманд. Допускается наращивание разрядности кратное 8. В состав микросхемы входят блок внутренней памяти, арифметико-логическое устройство, регистры, селектор источника данных, селектор выходных данных. В состав микросхем входят блок внутренней памяти, арифметико–логическое устройство, |

регистры, селектор источника данных, селектор выходных данных.

- Б1825 ВР5-2 Арифметический расширитель. Микросхема предназначена для аппаратного выполнения операции умножения 8–разрядных чисел и построения арифметических расширителей с разрядностью 8, 16, 24, 32 по всем операциям и с неограниченной разрядностью по операции умножения. Выполняемые операции: умножение, многократный сдвиг данных, поиск значащего разряда при нормализации.
- Б1825 ВР3-2 Умножитель. Предназначен для аппаратного выполнения операции умножения 16–разрядных чисел.
- Б1825 ВА1-2 Логический элемент согласования. Предназначен для умножения сигналов и организации логики типа «проводное ИЛИ».
- Б1825 ВК1-2 Мажоритирующий элемент. Предназначен для восстановления сбоев в одном из трех каналов на участке мажоритирования. Восстановление осуществляется по закону «два из трех». Предусмотрен режим разделения мажоритирующих каналов путем прямого пропускания ведущего канала на выход.
- Б1825 ВА2-2 Коммутатор магистралей. Предназначен для коммутации двух 4–разрядных шин из пяти направлений в одно
- Б1825 ВР2-2 Схема ускоренного переноса. Предназначена для ускорения переноса в 32–разрядной микропроцессорной линейке, составленной из 8 и 4–разрядных микропроцессорных секций.
- Б1825 ИР1-2 Микросхема. Многофункциональный регистр. Представляет собой два 4–разрядных регистра из D–триггеров. Формирует адреса микрокоманды в процессорных ЭВМ с системой команд ЕС и другими системами команд.
- Б1825 ВВ1-2 Перестраиваемый синхронизатор. Предназначен для построения блоков синхронизации и формирования адреса микрокоманд в ЭВМ с системой команд ЕС и другими системами команд
- Б1825 ВВ1-2 Кодер-декодер. Обеспечивает логическое и алгоритмическое сопряжение микровычислительных систем и преобразование из последовательного кода в последовательный фазоманипулированный 6–фазный униполярный код (Манчестер-2) и обратно

Б1825 ВА3-2 Магистральный приёмо-передатчик. Предназначен для организации обмена информации между магистралью вычислительной системы и устройствами, абонирующими эту магистраль, и обеспечивает двунаправленную прямую или инверсную передачу информации, контроль по четности и подтверждение окончания передачи.

В состав комплекта входят два разрядно–модульных микропроцессора, рассчитанные на использование в качестве центрального процессора ЭВМ с различными системами команд. Для повышения производительности навигационных расчетов в состав комплекта включены наращиваемый по разрядности арифметический расширитель и умножитель. Ряд микросхем комплекта обеспечивает сопряжение с периферийными интерфейсами (последовательным, параллельным и мультиплексным каналами).

Важнейшее требование для аэрокосмической аппаратуры–надежность. В состав двух микросхем комплекта (перестраиваемый синхронизатор и формирователь адреса микрокоманды) введены специальные узлы, повышающие их надежность за счет троекратного резервирования «критических» элементов. Остальные потоки информации в аппаратуре могут резервироваться с помощью микросхемы мажорирующего элемента.

Пример использования специализированной серии Б1825

Данный комплект микросхем использован для разработки бортовой управляющей вычислительной системы (УВС) для робототехнических комплексов, работающих в аварийных ситуациях с дистанционным управлением. УВС может функционировать в «жестких» условиях эксплуатации: с высоким уровнем радиации, при пожарах, в устройствах горнодобывающей промышленности [50].

Цифровая вычислительная система, созданная на базе комплекта БИС КМОП КНС серий Б1825 и Б1620 в модульном варианте, обеспечивает высокую радиационную стойкость.

Системный модуль

Разрядность, бит:

данных.....16 или 32;

команд.....16, 32 или 48

Время выполнения операций, мкс:

сложение RR / RX.....1/5

умножение RR / RX.....5/5

Производительность по смеси (RX), оп./с200 000

Адресное пространство.....64К×16

Емкость запоминающих устройств (1 канал), бит:

данных.....12К×16;

программ.....32К×16

Резервирование.....трехканальное с глубокой мажоритацией

Стойкость:

И1 — > 3У; И2 (прочность) — 3У; И2 (УБР) — 0,5×2У;

И3 при F_T=24 МГц — 2У; И3 при F_T — 1 6 МГц — 3У

Масса, кг.....0.9

Габаритные размеры, мм290×190×18

Потребляемая мощность, Вт.....< 3,5

Напряжение питания, В.....4,5–7,5

Элементная база:

процессор.....серия Б1825, 8 типов;

3У данных.....Б 1 620 РУ2-2;

3У программ.....Б 1 620 РЕ2-2

Общее количество микросхем, шт.....570 (на 3 канала)

Вычислительный модуль

Разрядность, бит:

данных — 32 или 16;

команд — 32 или 64

Время выполнения операций, мкс:

сложение RR / RX.....1/2 (0,66/1,32);

умножение RR / RX.....5/5 (3,3/3,3)

Производительность по смеси (RX), оп./с385 (580) 000

Адресное пространство.....256К×32

Емкость запоминающих устройств, бит:

данных.....16К×32;

программ.....64К×32

Резервирование.....	одноканальный, с трехканальным интерфейсом
Стойкость:	
И1 —> ЗУ;	И2 (прочность) — ЗУ; И2 (УБР) — 0,5~2У;
ИЗ при F _с =24МГц —	< 2У; ИЗ при РТ=16МГц — ЗУ
Масса, кг.....	0,8
Потребляемая мощность, Вт.....	< 2
Габаритные размеры, мм.....	290×190×18
Напряжение питания, В.....	4,5–7,5
Элементная база:	
процессор.....	серия Б1825, 8 типов;
ЗУ данных.....	Б1620 РУ2-2;
ЗУ программ.....	Б1620 РЕ2-2
Общее число микросхем, шт.....	502

6.2. Радиационно–стойкий КМОП КНС базовый матричный кристалл

Базовый матричный кристалл (БМК) является технологической основой для проектирования полужаказных матричных БИС с повышенной радиационной стойкостью и представляет собой полупроводниковый кристалл, содержащий идентичные наборы электрических компонентов, расположенных регулярным образом в виде матрицы.

В качестве примера рассмотрим кристалл размером 6,2×6,2 мм², который изготовлен на базе технологии (SOS-2). БМК “Мелисса - 1” содержит 9200 транзисторов. Число базовых ячеек (БЯ) на кристалле составляет 23×100 шт., число буферных ячеек—64.

Общая структура БМК приведена на рис. 6.1.

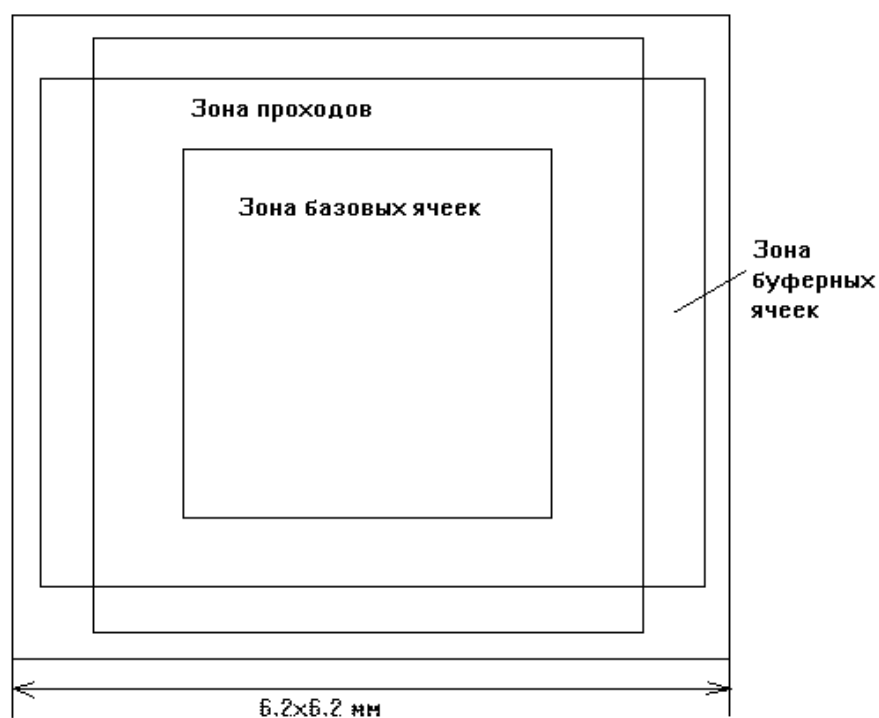


Рис. 6.1. Структура БМК «Мелисса 1»

Размеры БЯ–196×42 мкм, число выводов из БЯ–12 на две стороны. Число транзисторов в ячейке в принципе может выбираться с целью реализации на одной отдельной ячейке заданного набора логических функций. Методы синтеза принципиальных схем ЛЭ на КМОП–транзисторах позволяют определить все множество схемотехнических реализаций, которые выполняют требуемые логические функции и содержат минимальное число транзисторов. Для КМОП– микросхем число транзисторов в ячейке БМК целесообразно выбирать кратным 4, 8 или 10. Набор таких ячеек позволяет реализовать все наиболее сложные логические функции при высоком коэффициенте использования. Следует отметить, что чем меньше транзисторов в ячейке, тем выше коэффициент использования компонентов в БМК. Однако площадь схемы возрастает за счет дополнительных соединений между элементами.

Базовая ячейка БМК“Мелисса - 1” содержит 4 транзистора (рис. 6.2).

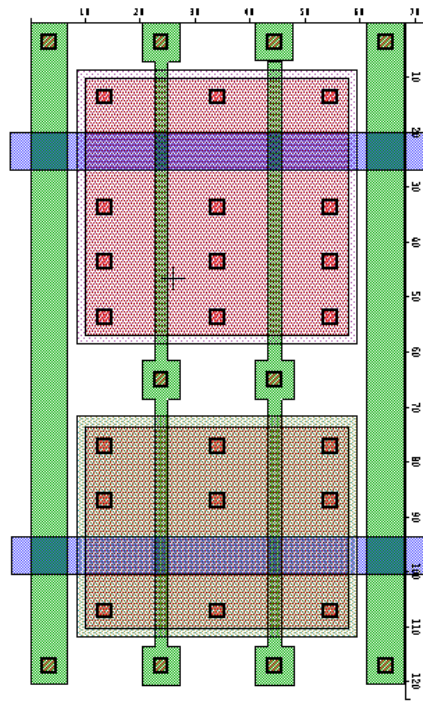


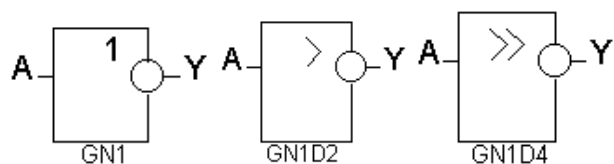
Рис. 6.2. Конструкция БЯ, содержащая 4 транзистора

В БМК БЯ размещаются параллельными рядами, между которыми существуют каналы, предназначенные для проведения соединительных трасс. Ширина каналов позволяет расположить до десяти алюминиевых трасс. Базовые ячейки располагаются в 100 столбцах на 23 строках. Такой способ размещения обусловлен тем, что ячейки базового кристалла имеют выводы с двух сторон.

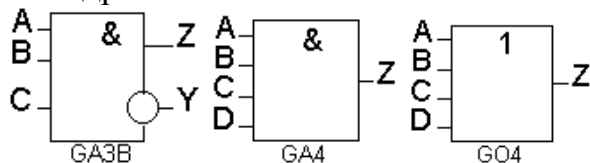
Между рядами БЯ расположены поликремниевые шины, предназначенные для коммутации БЯ в логические элементы. При такой организации шины питания и земли, выполненные металлизацией, проходят через каждую БЯ. Основное достоинство такого способа размещения – возможность подключения соединительных трасс к выводам ЛЭ с двух сторон, что облегчает трассировку соединений. Ширина проходных шин из алюминия и поликремния–6 мкм.

Состав библиотеки элементов БМК приведен на рис. 6.3.

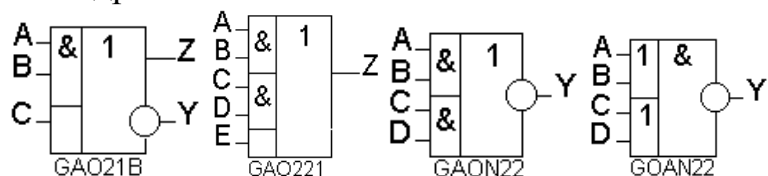
Инверторы: одиночный, двоянный, счетверенный



3И, 4И, 3-ИЛИ, 4-ИЛИ и др.

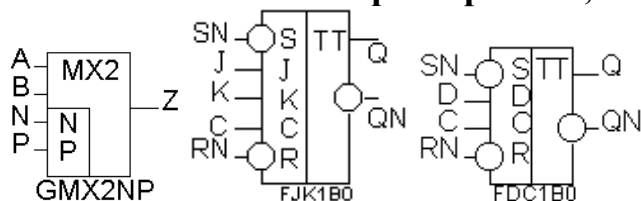


2И-ИЛИ, 2ИЛИ-И и др.



Мультиплексор

Триггеры: JK, DC и др.



Входные элементы с КМОП-буфером Элемент входа-выхода с КМОП-буфером

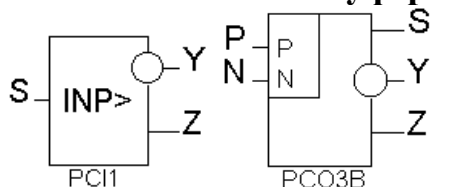


Рис. 6.3. Состав библиотеки элементов БМК

Оценка характеристик элементов БМК и параметров библиотеки проводится на следующих тестовых элементах:

- тестовые транзисторы базовых ячеек;
- тестовые транзисторы входных и выходных буферов;
- тест входного – выходного буфера;
- тест базовой и магистральной ячеек;

- тесты на определение времени задержки (цепочки элементов с различной нагрузкой);
- тест триггерной ячейки.

Измерение ВАХ тестовых транзисторов до и после облучения позволяет определить параметры схемотехнических моделей транзисторов (модель КНС МОП–транзистора и методика определения ее параметров рассмотрены в главе 5).

Моделирование характеристик логических элементов, сравнение их с измеренными характеристиками элементов и последующая корректировка результатов является необходимым этапом разработки БМК. Скорректированные таким образом параметры всех БЯ вместе с символом каждого элемента, его электрической схемой, таблицей истинности вошли в библиотеку стандартных элементов (более 20), предназначенную для автоматизированного проектирования БИС на основе данного БМК с помощью современных средств САПР. Ниже приведены основные статические и динамические параметры и характеристики БЯ, входящих в состав библиотеки элементов БМК “Мелисса - 1”.

В частности, для одиночного инвертора на рис 6.4 приведена зависимость динамической мощности в режиме переключения от напряжения источника питания. На рис. 6.5 и 6.6 приведены измеренные и смоделированные характеристики того же КМОП КНС– инвертора при различных емкостях нагрузки и полученных дозах радиации. Видно, что имеет место достаточно хорошее (погрешность менее 20 %) совпадение измеренных и смоделированных характеристик. Аналогичным образом для других библиотечных элементов определены времена задержки при различных емкостях нагрузки [51–53].

$P, \text{мкВт/вент}$

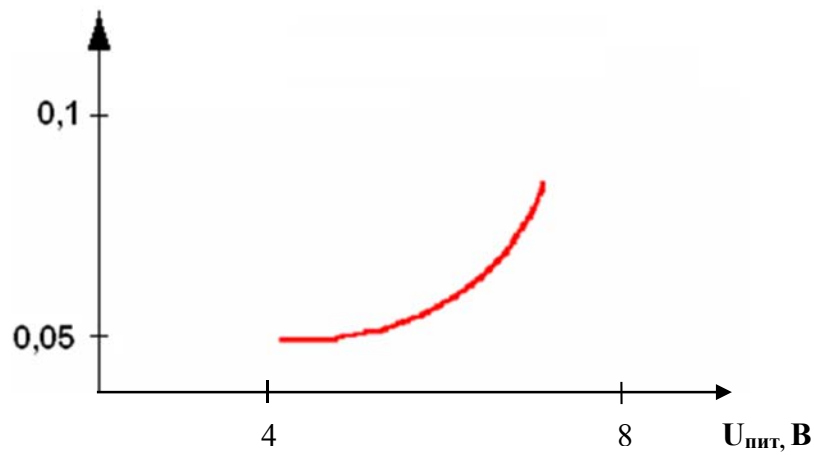


Рис. 6.4. Зависимость динамической мощности потребления одиночного инвертора от напряжения питания

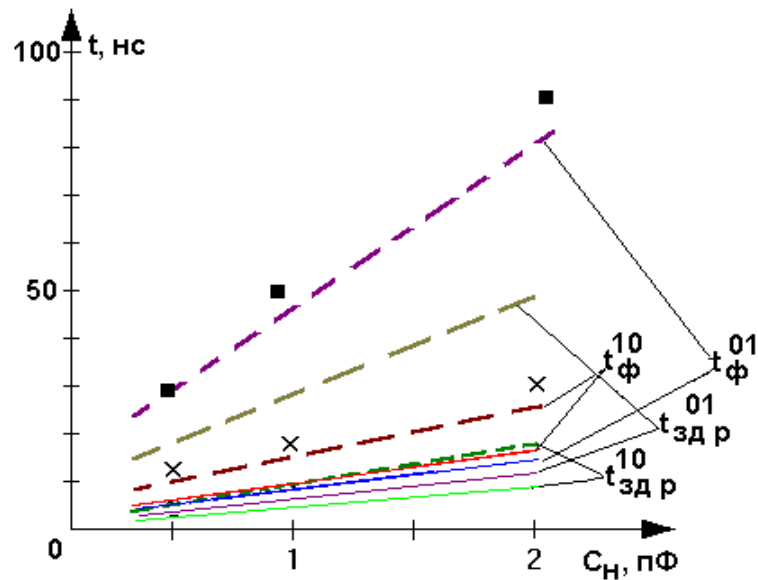


Рис. 6.5. Зависимости времен фронтов и задержки КМОП-инвертора ($W_n=31\text{мкм}$, $W_p=40\text{мкм}$, $L=4\text{мкм}$), изготовленного по КНС-технологии с толщиной слоя кремния $0,6\text{ мкм}$, от емкости нагрузки. Значки-экспериментальные значения, линии- расчет по модели. Данные приведены для различных полученных доз: пунктир-до облучения; сплошные линии- 600 крэд

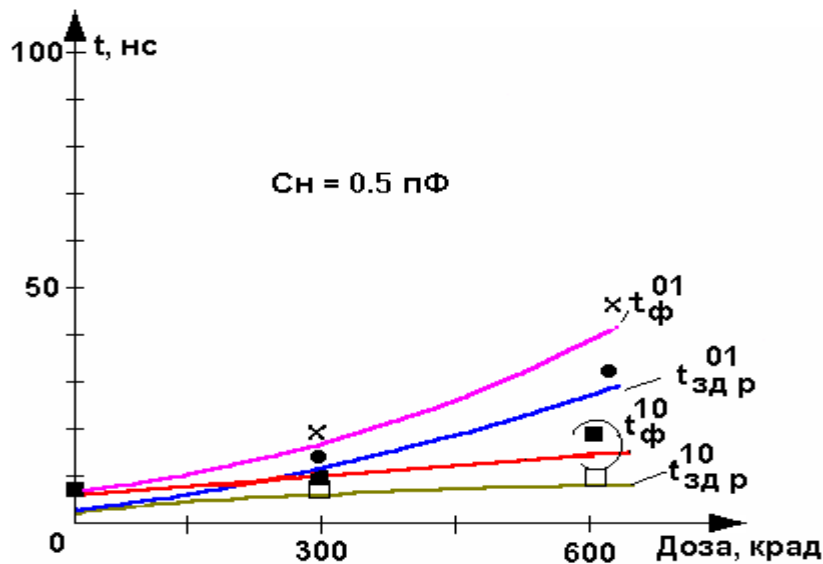


Рис. 6.6. Зависимости времен фронтов и задержки КМОП-инвертора ($W_n=31$ мкм, $W_p=40$ мкм, $L=4$ мкм), изготовленного по КНС-технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм, от дозы облучения. Значки-экспериментальные значения, сплошные линии - расчет по модели. Данные приведены для емкости нагрузки 5пФ

Значения среднего времени задержки элементов при емкостной нагрузке 2 пФ, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Времена задержки библиотечных элементов БМК

Время задержки, нс	Тип элемента				
	Инверторы	элементы 3И, 4ИЛИ, 2И-ИЛИ и т.д.	Мультиплексоры	Триггеры JK, DC	Входн. эл-ты, эл-ты вх.-вых. с КМОП-буфером
t	<5	<10	<10	<15	<3

Известно, что времена задержки элементов БМК зависят от материала проходной шины, с которой соединен то или иной элемент. В табл. 2 и на рис. 6.6 приведены значения среднего времени задержки логического элемента 2И-НЕ при работе на алюминиевую и поликремниевую шины. Из приведенных данных видно, что алюминиевые шины обеспечивают меньшие времена задержки сигнала для всех значений напряжения источника питания.

Таблица 6.2. Задержки элемента 2И-НЕ при работе на
алюминиевую и поликремниевую шину длиной 1 мм

U _{пит} , В	Время задержки, нс	
	Алюминиевая шина	Поликремниевая шина
4,5	11	15
5,5	6	9
6,5	4	6
7,5	3,2	4,5

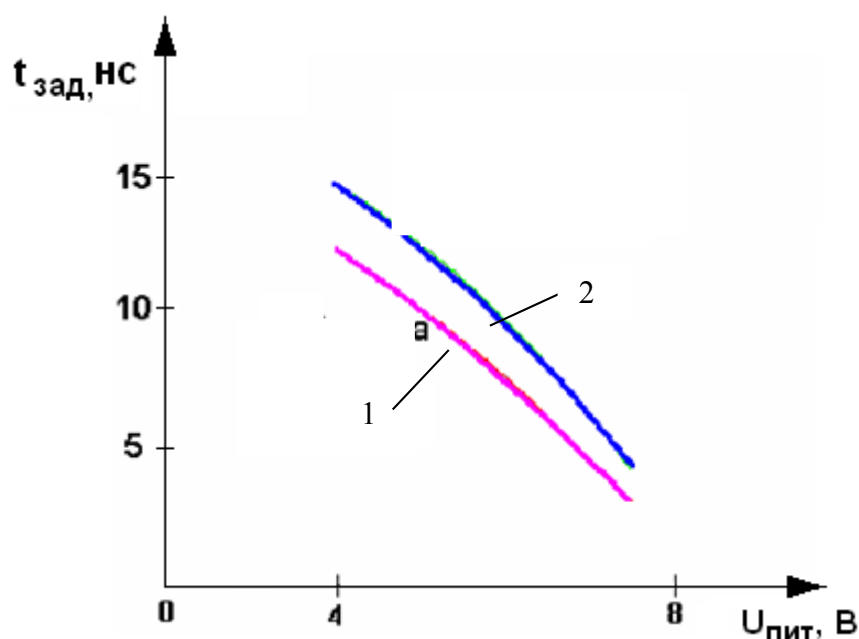


Рис. 6.7. Зависимость среднего времени задержки элемента 2И-НЕ при работе на алюминиевую (1) и поликремниевую шину (2) длиной 1 мм от напряжения питания

Для более сложных триггерных ячеек, управляемых тактовым сигналом, важным показателем быстродействия является максимальная частота тактовых импульсов.

Зависимость максимальной тактовой частоты D-триггера от напряжения питания приведена на рис. 6.8.

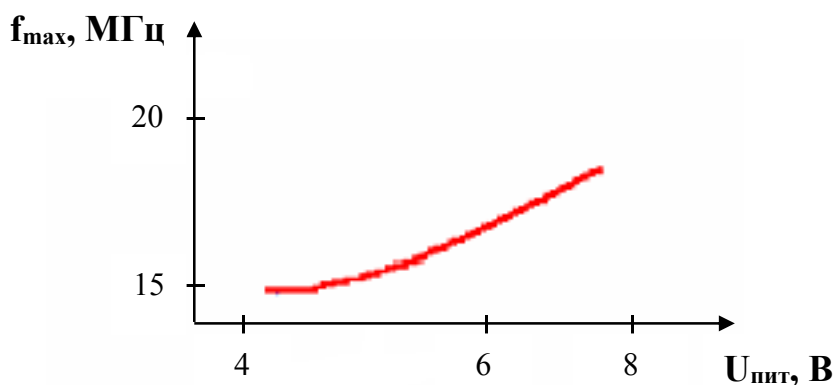


Рис. 6.8. Зависимость максимальной тактовой частоты D-триггера от напряжения питания

К специализированным цифровым устройствам, построенным на базе цифровых КНС БМК, предъявляются повышенные требования в частности надежности и быстродействия. Поэтому высокие показатели радиационной стойкости и быстродействия базовых ячеек БМК имеют очень высокое значение.

На рис. 6.9 приведены передаточные характеристики и зависимости тока потребления от входного напряжения для КМОП - инвертора, полученные для различных доз облучения γ - квантами. Из рисунка видно, что инвертор сохраняет переключательную способность до радиационных доз порядка 1,0 Мрад.

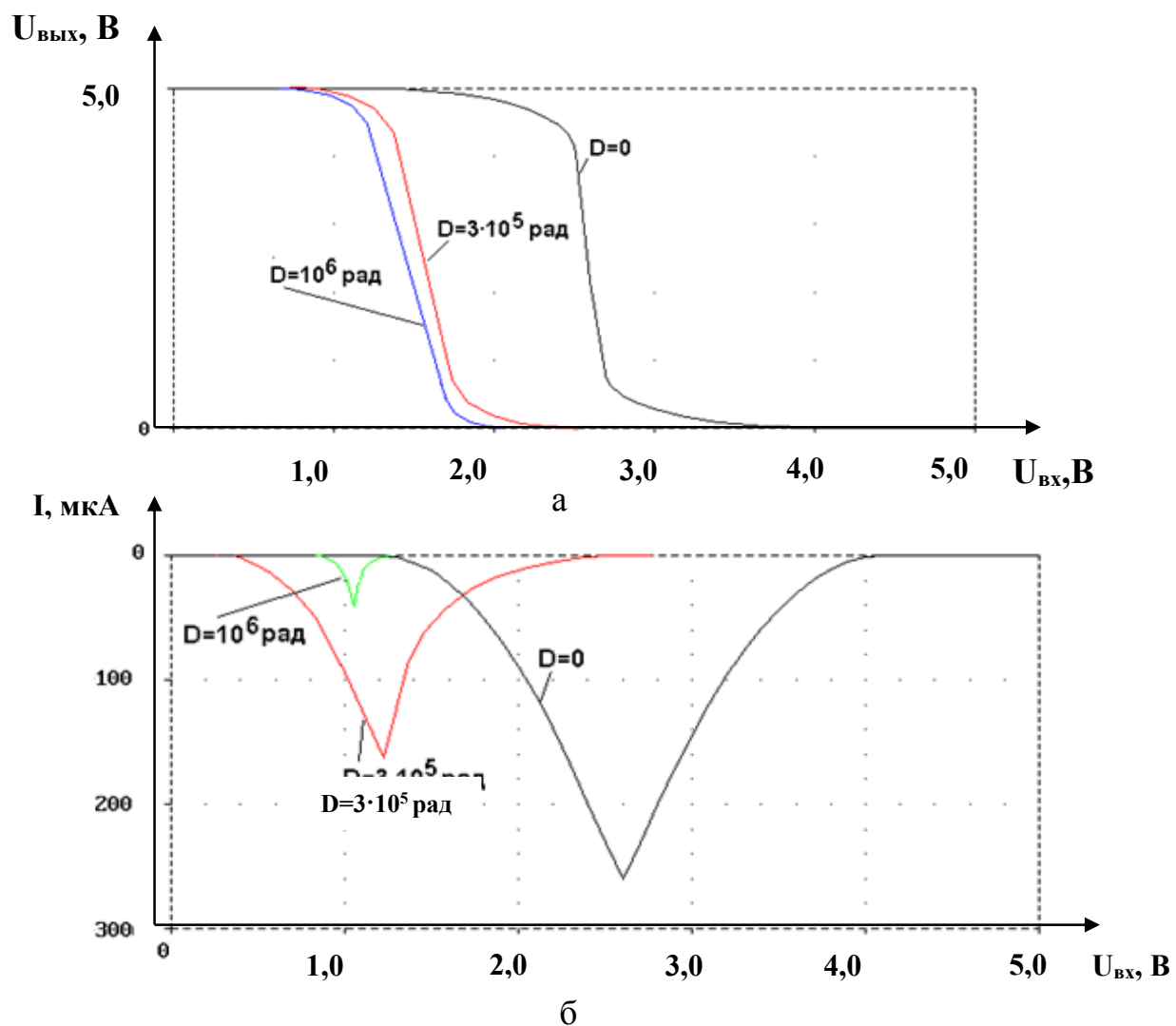


Рис. 6. 9. Передаточная характеристика (а) и зависимость тока потребления от входного напряжения (б) для КМОП - инвертора ($W_n=31\text{мкм}$, $W_p=40\text{мкм}$, $L=4\text{мкм}$), изготовленного по КНС технологии с толщиной слоя кремния $0,6 \text{ мкм}$. Данные приведены для различных доз облучения

Моделирование времен задержек базовых ячеек БМК от дозы облучения позволяет выбрать схемы триггеров, наиболее устойчивых к облучению. Зависимости средних времен задержек, различных типов триггеров, входящих в состав БМК, от дозы радиации приведены на рис. 6.10.

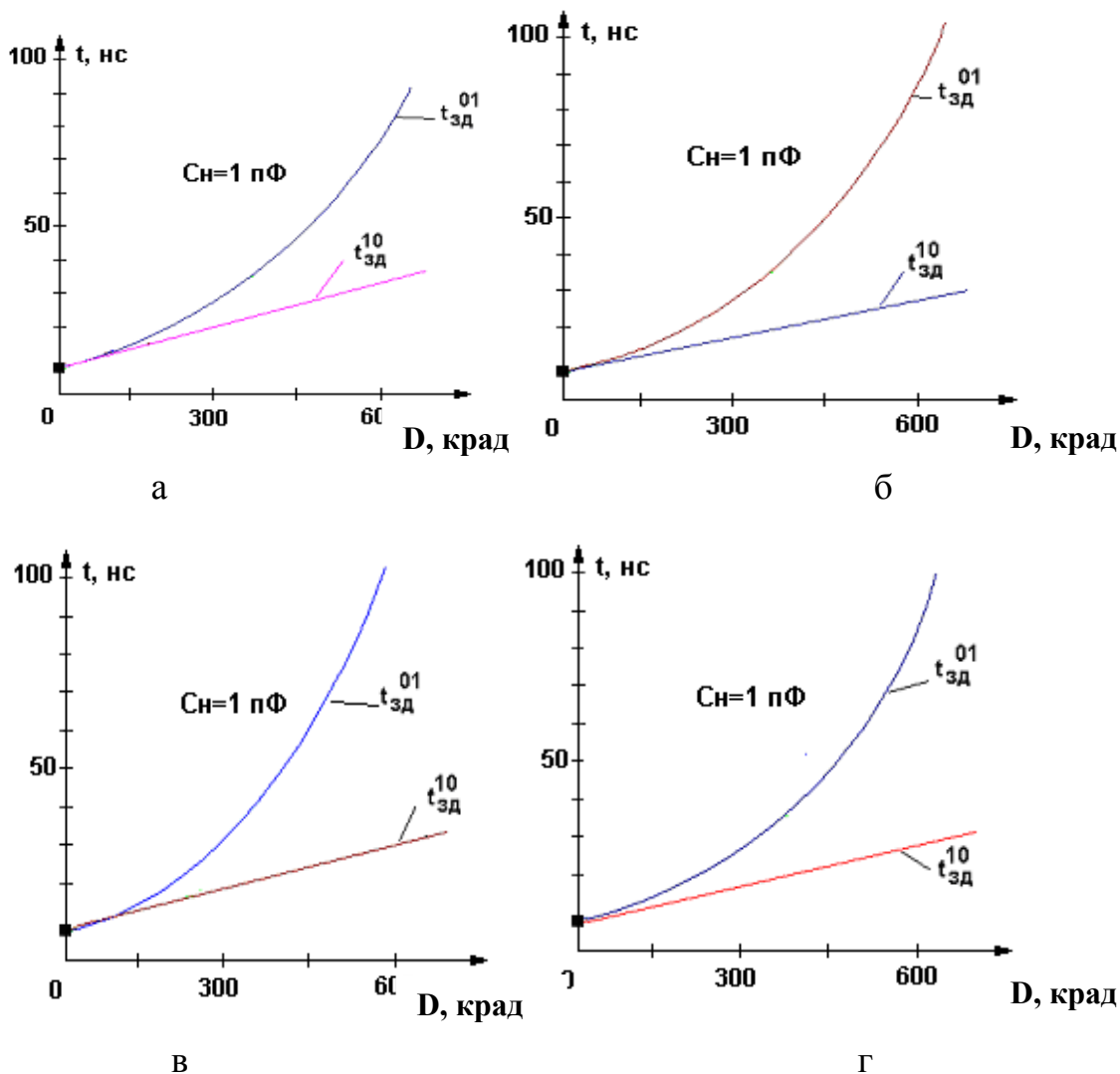


Рис. 6.10. Зависимости времен задержек DT- (а), RDT- (б), RST- (в), RSdT (г) триггеров, изготовленных по КМОП КНС технологии с толщиной слоя кремния 0,6 мкм от дозы облучения.

Исследование работоспособности элементов БМК при переходе на меньшую толщину слоя кремния

Уменьшение толщины слоя кремния с 0,6 до 0,3 мкм позволяет уменьшить величины емкостей стоков и истоков транзисторов и тем самым повысить быстродействие схем.

В табл. 6.3 приведены результаты моделирования задержек ячеек БМК для разных вариантов технологии

Таблица. 6.3. Результаты измерения и моделирования задержек фрагментов БМК для разных вариантов технологии

Технология	КМОП инвертор, $C_H=0,5$ пФ		Схема И-ИЛИ-НЕ, $C_H=0,5$ пФ	
	$t_{зд}^{10}$, нс изм/модел.	$t_{зд}^{01}$, нс изм/модел.	$t_{зд}^{10}$, нс изм/модел.	$t_{зд}^{01}$, нс изм/модел.
КНС 0.6 мкм	3/3,6	3,5/4,1	6/7,4	6,6/8,3
КНС 0.3 мкм	2,7/29	3,3/2,9	5,2/6,1	6,2/6,3
КНС 0.6 мкм, spacer	-/1,1	-/1,4	-/2,2	-/2,8

Технология	RSDT-триггер, $C_H=1$ пФ		RDT-триггер, $C_H=1$ пФ	
	$t_{зд}^{10}$, нс изм/модел.	$t_{зд}^{01}$, нс изм/модел.	$t_{зд}^{10}$, нс изм/модел.	$t_{зд}^{01}$, нс изм/модел.
КНС 0.6 мкм	10.2/11.3	10.1/11.5	10.1/11.4	10.2/11.8
КНС 0.3 мкм	8.5/9.1	8.3/9.8	8.8/8.3	8.5/9.1
КНС 0.6 мкм, spacer	-/3.4	-/3.1	-/3.9	-/3.8

Приведенные в табл. 6.3 данные подтверждают повышение быстродействия схем при меньшей толщине слоя кремния. Кроме того, существенное повышение быстродействия может быть достигнуто за счет использования слабо легированных областей стока и истока (спейсеров) и, как следствие, уменьшения длины канала транзистора с 4 до 2–1,5 мкм.

На рис. 6.11 приведены результаты моделирования реакции КМОП-инверторов ($W_n=31$ мкм, $W_p=40$ мкм, $L=4$ мкм), изготовленных по КНС-технологии с толщинами слоя кремния 0,6 и 0,3 мкм на импульс излучения с мощностью дозы 1×10^{12} рад/с. Видно, что в инверторе с уменьшенной толщиной слоя кремния всплеск тока стока и напряжения на выходе инвертора при импульсном облучении снижается примерно вдвое, повышая тем самым стойкость схем к «случайным сбоям» [54,55].

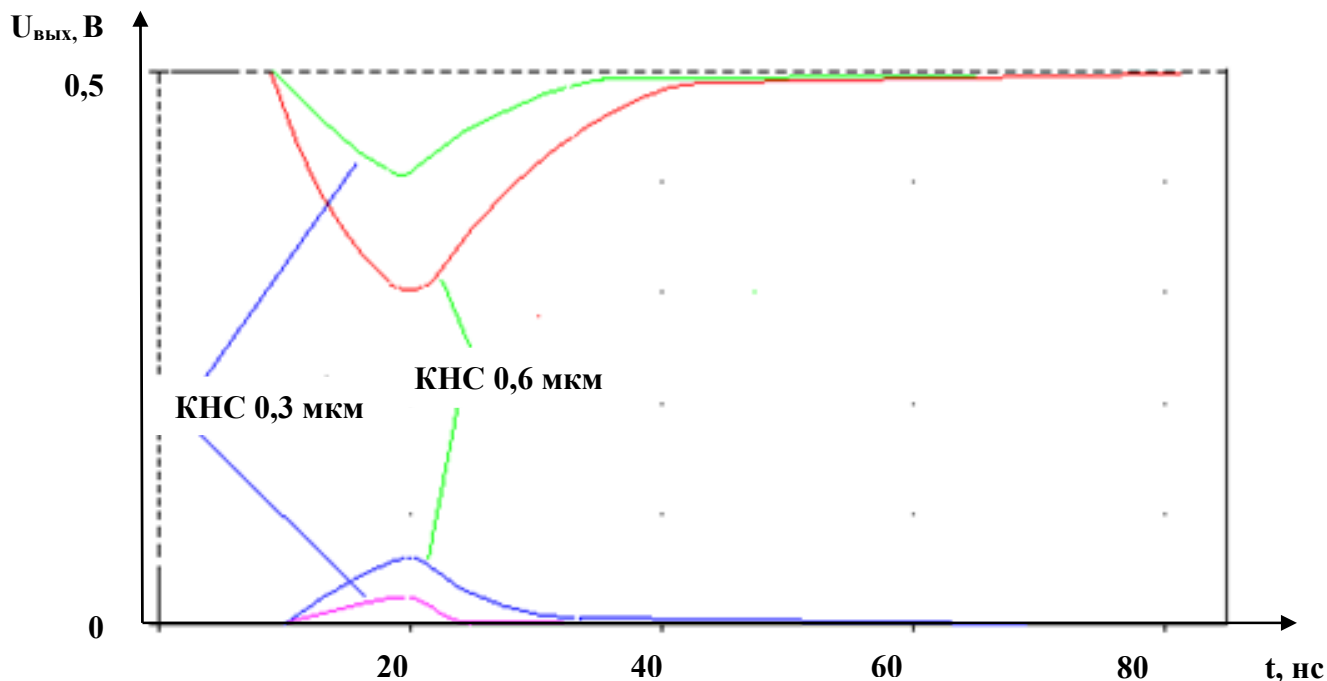


Рис. 6.11. Результаты моделирования реакции КМОП-инверторов ($W_n=31$ мкм, $W_p=40$ мкм, $L=4$ мкм), изготовленных по КНС - технологии с толщинами слоя кремния 0,6 и 0,3 мкм на импульс излучения с мощностью дозы 1×10^{12} рад/сек

6.3 Радиационно-стойкие КМОП БИС, изготовленные по самосовмещенной технологии со «спейсерами» (SOS3)

Расширение областей применения КМОП КНС технологии и прежде всего переход от проектирования не только цифровых, но и цифро-аналоговых, а также аналого-цифровых БИС, отсутствовали необходимость модернизации технологии с целью повышения однородности и воспроизводимости входных/выходных характеристик МОП транзисторов, являющихся базовыми элементами при конструировании БИС АЦП и ЦАП. Результаты, которые достигла технология КМОП на объемном кремнии по отдельным типам аналоговых схем, позволяют разработчикам аппаратуры решать многие задачи, однако вопросы повышения радиационной стойкости аналоговых БИС и повышения быстродействия всегда актуальны.

Специфика технологии КМОП КНС такова, что уменьшение длины канала возможно лишь до определенных пределов, за которыми резко уменьшаются пробивное напряжение, пороговое напряжение и подвижность носителей заряда в канале транзистора, увеличивается ток утечки стокового перехода (эффект короткого канала). Поэтому в процессе совершенствования технологии КМОП КНС возникает необходимость устранения эффектов короткого канала, для чего используются следующие решения (см. разд. 2.3): увеличение концентрации примеси в подзатворной области (подложке), снижение толщины подзатворного диэлектрика, уменьшение напряжения на стоке транзистора и введение между сильнолегированной областью стока и областью канала переходной слаболегированной области для устранения инжекции горячих носителей. Усовершенствованная конструкция МОП КНС – транзистора, изготовленного по технологии SOS3, представлена на рис. 6.12.

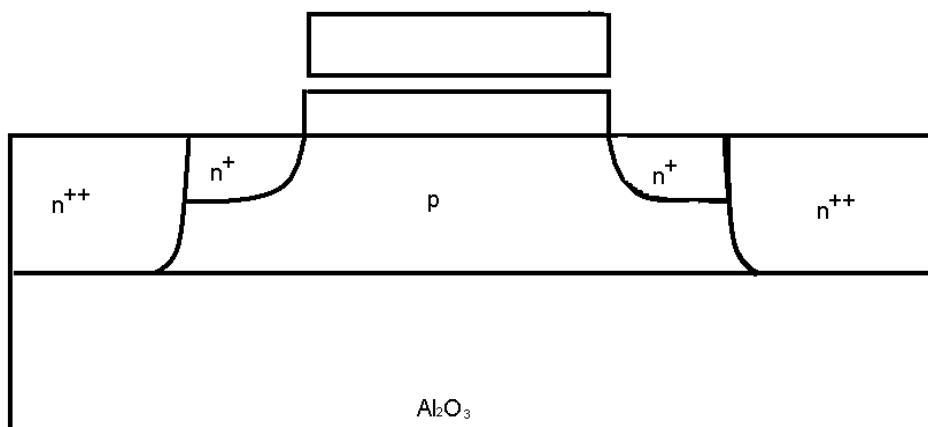


Рис. 6.12. Конструкция КНС МОП - транзистора поколения SOS3

Реализация подобной конструкции для КНС ИС с учетом особенностей изолирующей подложки и накопления статического электричества при проведении технологических операций (плазмохимии, ионной имплантации и др.), затруднена из-за вероятности пробоя подзатворного диэлектрика, однако позволяет снизить суммарную термическую экспозицию пластины, что важно при создании радиационно-стойких БИС.

Были проведены оценочные радиационные испытания типовых микросхем. В качестве объекта испытаний была выбрана БИС 16-разрядной микропроцессорной секции, изготовленная по представленной технологии. Испытания на стойкость к эффектам мощности дозы проводились на лазерном имитаторе РАДОН – 5М, а к дозовым эффектам на рентгеновском имитаторе РЕИС-И с калибровкой на моделирующей установке. Управление и измерение параметров БИС при испытаниях проводились с использованием автоматизированного испытательного комплекса [56] .

В процессе испытаний проводились контроль БИС на функционирование и измерение тока потребления. При импульсном облучении наблюдался рост амплитуды и длительности импульса тока в цепи питания. На рис. 6.13 показано семейство осциллограмм импульсов тока потребления при различных мощностях дозы. УБР соответствовал 10^{10} рад(Si)/с. Примерно при этих же уровнях начали проявляться и функциональные отказы (сбои содержимого внутренней памяти). Катастрофических отказов не наблюдалось до предельных уровней воздействия, эквивалентных 10^{12} рад(Si)/с.

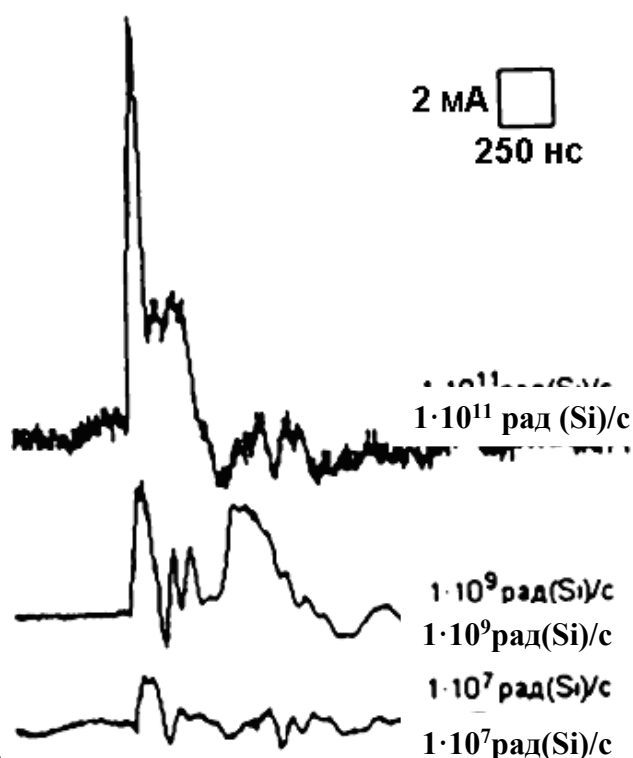


Рис. 6.13. Осциллограммы импульсов тока потребления БИС микропроцессорной секции

При исследовании дозовых отказов, как на имитаторе, так и на моделирующей установке контролировалась работоспособность БИС при двух уровнях дозы – $2 \cdot 10^5$ рад(Si) и 10^6 рад(Si). Все образцы сохранили работоспособность после $2 \cdot 10^5$ рад(Si).

Кроме того, создание слаболегированных («спейсерных») областей вблизи затвора позволило уменьшить паразитные емкости сток–затвор из-за меньшей диффузии примеси под затвор. Эти меры позволили увеличить быстродействие схем.

В табл. 6.4 приведены значения времени задержки распространения сигнала для микропроцессора 1825BC3, изготовленного по базовому и модернизированному технологическим маршрутам.

Таблица 6.4. Значения времени задержки распространения сигнала для микропроцессора 1825BC-3, изготовленного по базовому SOS2 и модернизированному SOS3 технологическим маршрутом

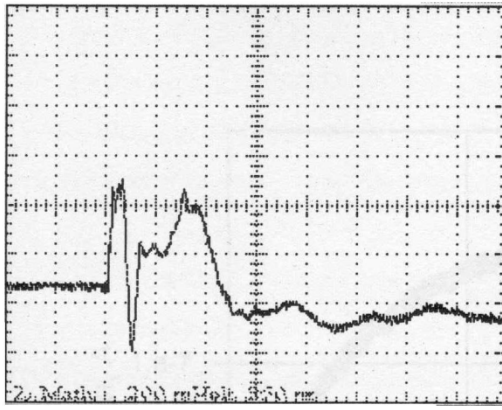
№ теста	Время задержки распространения сигнала, нс					
	Базовый маршрут	Модернизированный маршрут				
		№3	№7	№10	№18	№31
2000	157	88	89	92	81	84
2019	136	100	101	106	91	98
2043	144	104	93	93	84	90
2060	147	59	56	56	53	55
2091	171	89	93	95	79	82
2108	159	67	68	73	60	60
2106	97	44	46	49	39	41
2212	67	19	22	30	31	25
2268	54	29	30	31	24	25
2316	77	40	39	35	34	34

Из большого количества параметров микросхем были выбраны одинаковые тесты, по которым проводилось сравнение времен задержки распространения сигнала при нормальных климатических условиях.

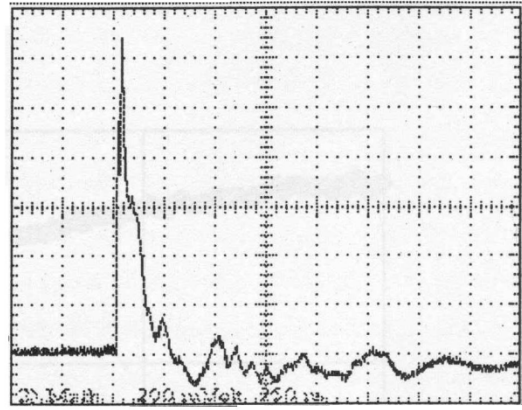
Из данных таблицы видно, что параметры микропроцессора 1825BC-3, изготовленного по модернизированному маршруту, имеют время задержки распространения сигнала в 1,3–2,5 раза меньше по сравнению с базовым.

Наряду с положительными результатами, полученными при испытаниях цифровых БИС, модернизированный технологический маршрут позволил повысить частоту счета электрических импульсов для измерения временных интервалов до 75 МГц для ИС Б582 и до 150 МГц для ИС Б582А, а также освоить выпуск по технологии «кремний на сапфире» нового типа микросхем аналого-цифровых параллельных преобразователей серии 1523 ПВ 1 (Б605) на 6 разрядов с частотой преобразования до 15 МГц с возможностью каскадного соединения двух схем для увеличения быстродействия до 30 МГц и ПВ2 (Б606) на 8 разрядов с частотой преобразования до 15 МГц с возможностью каскадного соединения двух схем для увеличения быстродействия до 30 МГц.

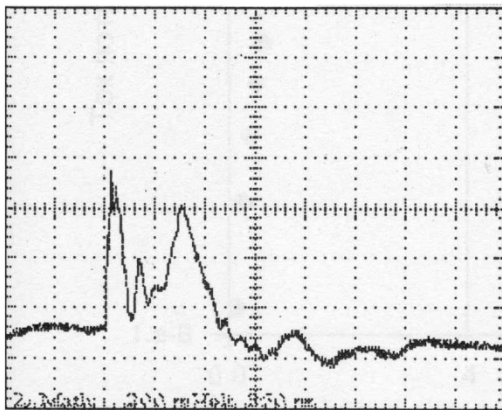
Результаты испытаний АЦП и ЦАП КМОП БИС КНС на воздействие специальных факторов приведены на рис.6.14, 6.15.



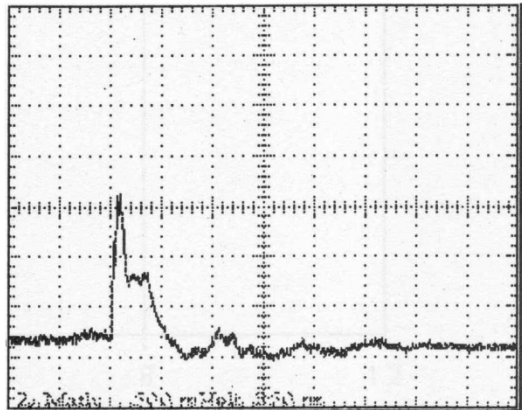
а



б



в



г

Рис. 6.14. Осциллограммы импульсного тока потребления образца ИС 1825ВС3 при воздействии фактора И2:

- а) 1.5·1У, поле «0» (4 мА/дел., 200 нс/дел.),
- б) 1.5·1У, поле «1» (4 мА/дел., 200 нс/дел.),
- в) 1.6·3У, поле «0» (4 мА/дел., 200 нс/дел.),
- г) 1.6·3У, поле «1» (4 мА/дел., 200 нс/дел.)

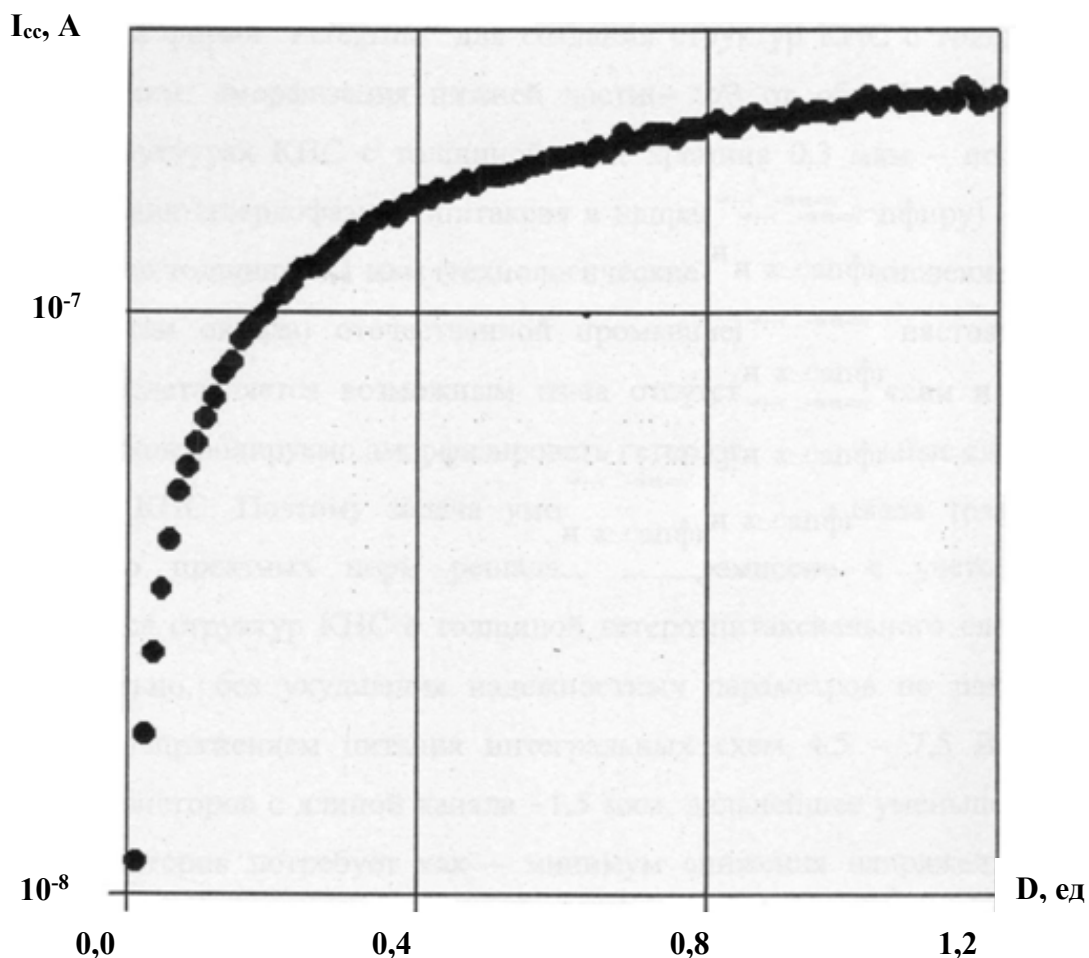


Рис. 6.15. Зависимость тока потребления I образца №7 от поглощенной дозы D

6.4 Радиационно-стойкие КМОП БИС КНС, изготовленные по двухкарманной технологии с использованием высокоомного кремния (SOS-4)

Дальнейшее повышение интеграции с использованием структур КНС и переход к субмикронным проектным нормам связано, как показано в главе 3, с уменьшением толщины гетероэпитаксиального слоя. Радикальный путь, который первой прошла фирма “Peregrine” для создания структур КНС с толщиной слоя кремния 0,1 мкм: аморфизация нижней части (~ 2/3 общей толщины) слоя кремния в структурах КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм – последующая рекристаллизация (твердофазная эпитаксия в направлении к сапфиру) – утонение слоя кремния до толщины 0,1 мкм (технологические

приемы с окислением кремния и травлением оксида). Отечественной промышленностью задача уменьшения длины канала транзистора и, соответственно, проектных норм решалась путем компромисса с учетом реально выпускающихся структур КНС с толщиной гетероэпитаксиального слоя кремния 0,3 мкм. Реально, без ухудшения надежностных параметров по радиационной стойкости с напряжением питания интегральных схем 4,5 – 7,5 В возможно создание транзисторов с длиной канала ~1,5 мкм, дальнейшее уменьшение длины канала транзисторов требует снижения напряжения питания до 2,0–5,5 В.

Технологический маршрут SOS4 позволяет реализовывать радиационностойкие КМОП БИС КНС с проектными нормами 4÷2 мкм, он использован при изготовлении 8-разрядных БИС АЦП 1523ПВ2А(Б606) и др. микросхем.

Критерии работоспособности АЦП 1523ПВ2А и контролируемые параметры приведены ниже:

Контролируемые параметры	Критерии работоспособности	Факторы
Интегральная нелинейность(E_L), ЕМР	$ E_L < 5,0$	С3
Дифференциальная нелинейность(E_{LD}), ЕМР	$ E_{LD} < 2,5$	С3
Погрешность полной шкалы(E_G), ЕМР	$ E_G < 9,0$	С3
Смещение нуля(E_0), ЕМР	$E_0 < 9,0$	С3
Ток потребления(I_{CC}), мА	$I_{CC} < 67,0$	С3
Выходное напряжение лог. (U _{OL}) нуля	$U_{OL} < 0,1 U_{CC}$	И2, С3
Выходное напряжение лог. Единицы(U _{OH})	$0,9 U_{CC} < U_{OH}$	И2, С3
Функционирование	Отсутствие сбоев	И2, С3
Тиристорный эффект	Отсутствие ТЭ	И2

Примечание:

1 – $U_{CC} = 6,0 В$, $F_{CLK} = F_{MAX}$, U_{IN} , РН, СЕ1, СЕ2 = 0;

2 – $I_{OH} = 0,1 мА$, $I_{OL} = 1,6 мА$;

3 – $U_{CC} = 5,0 В$;

4 – $U_{CC}=6,0В$

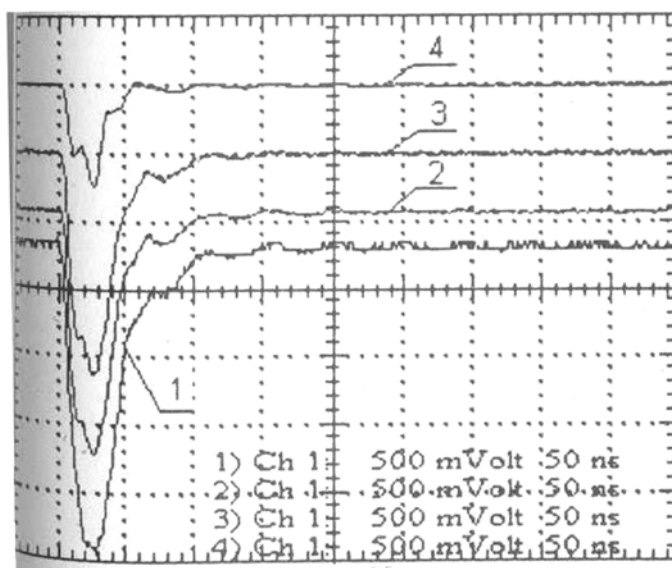
Испытания проводились в нормальных климатических условиях с использованием имитирующих установок, аттестованных в установленном порядке:

- лазерный имитатор «Радон 5М» (ЭНПО СПЕЛС),
- рентгеновский имитатор «РЕИС - ИМ» (ЭНПО СПЕЛС).

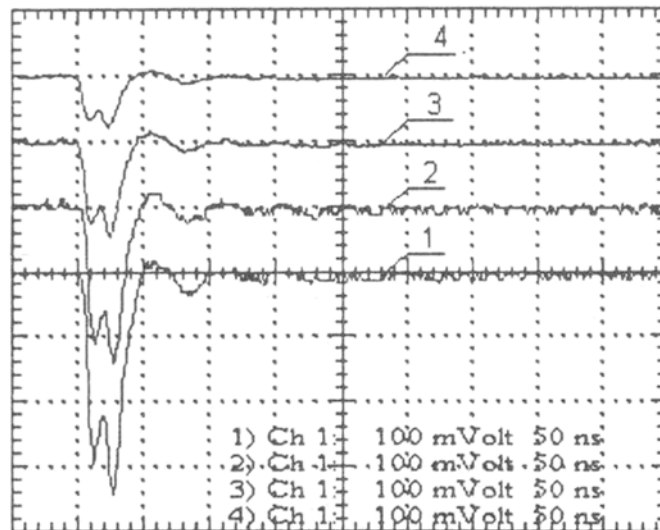
В процессе воздействия фактора И2 с эквивалентным уровнем $1,2 \cdot 10^{12}$ ед/с катастрофических отказов и ТЭ в БИС АЦП 1523ПВ2-А не наблюдалось.

При испытаниях контролировались: выходной код АЦП, выходные уровни напряжения логического нуля и единицы.

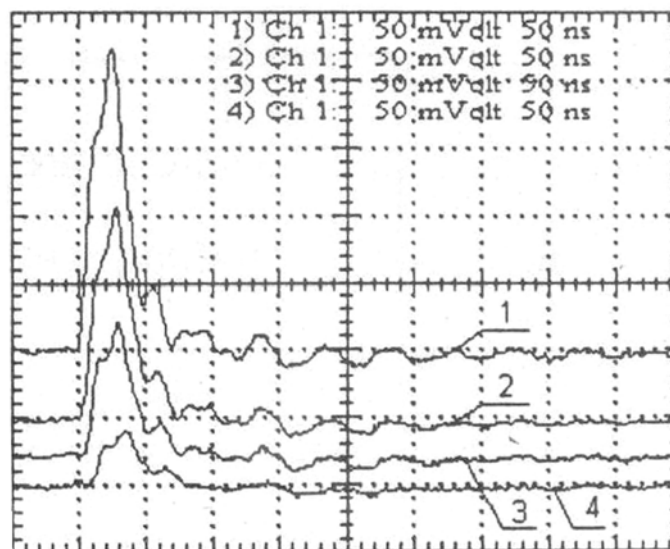
Типовые ионизационные реакции выходных уровней напряжений логического нуля и единицы представлены на рис. 6.16. На основании представленных осциллограмм можно сделать вывод, что ВПР АЦП по этому параметру не превышает 100 нс при максимальном уровне воздействия $1,2 \cdot 10^{12}$ ед/с.



А) U_{OH} , 1– $1,2 \cdot 10^{12}$, 2– $3,4 \cdot 10^{11}$, 3– $1,9 \cdot 10^{11}$, 4– $3,1 \cdot 10^{10}$; ед/с



Б) U_{OH} , 1– $1,4 \times 10^{10}$, 2– $9,8 \times 10^9$, 3– $5,1 \times 10^9$, 4– $2,4 \times 10^9$; ед/с;



В) U_{OL} , 1– $1,4 \times 10^{10}$, 2– $9,8 \times 10^9$, 3– $5,1 \times 10^9$, 4– $2,4 \times 10^9$; ед/с

Рис. 6.16. Осциллограммы импульса выходного напряжения логического нуля и единицы, образец 2

Результаты испытаний БИС АЦП 1523ПВ2А, изготовленных по технологии SOS4 по стойкости к воздействию спецфакторов с характеристикой S_3 (пз) (см. рис. 6.17-6.19) также показали удовлетворительные результаты. Таким образом, технология изготовления КМОП БИС КНС (SOS4) с длиной канала транзистора до 1,5 мкм не снижает уровня стойкости и характера радиационного поведения БИС АЦП, изготавливаемого в базовом технологическом исполнении (SOS3) и удовлетворяет требованиям

предъявленным к технологиям, обеспечивающим выпуск радиационнстойких электронных компонентов [77-80].

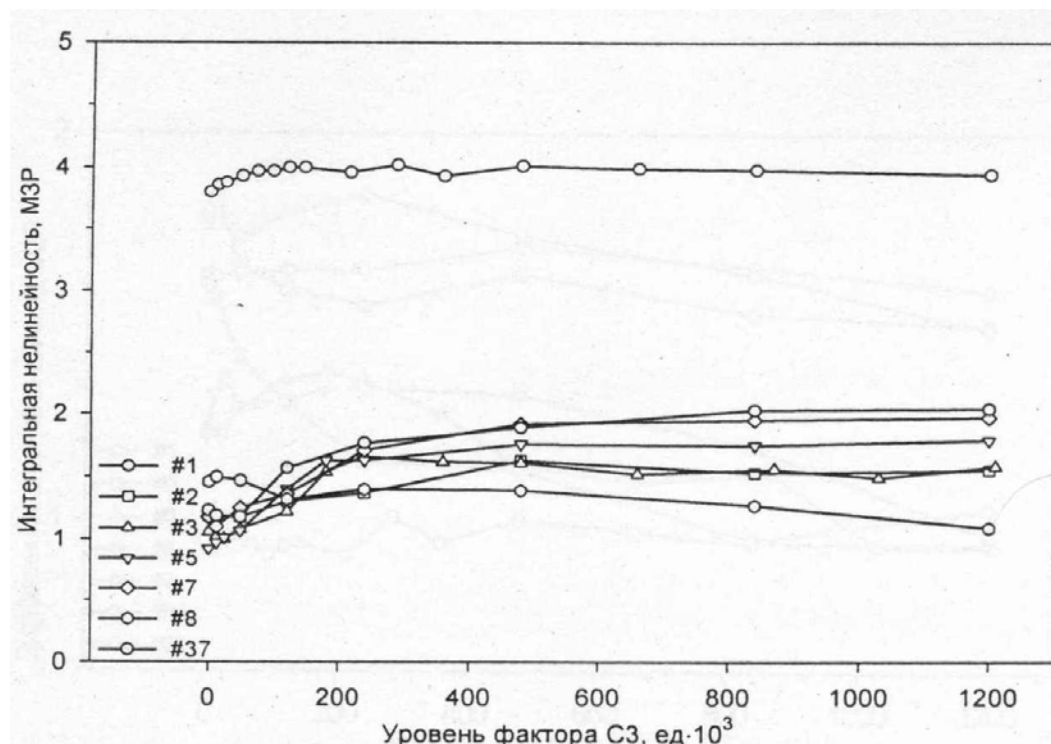


Рис 6.17. Зависимость интегральной нелинейности от эквивалентного уровня C3

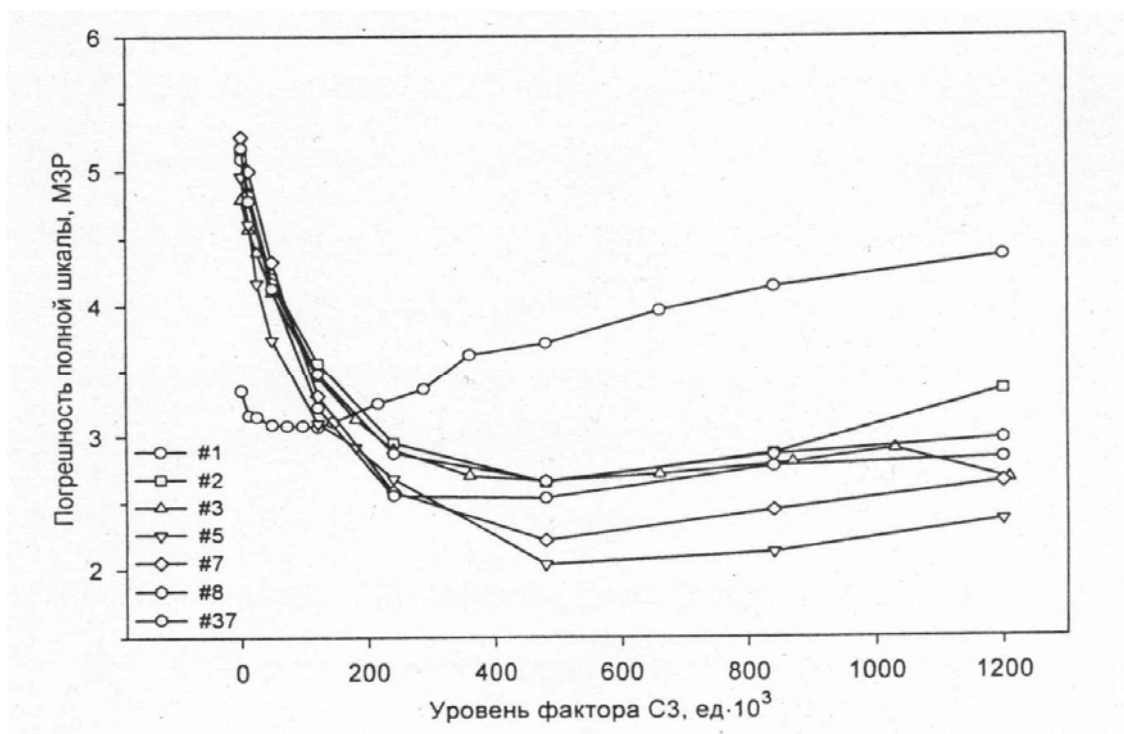


Рис. 6.18. Зависимость погрешности полной шкалы от эквивалентного уровня C3

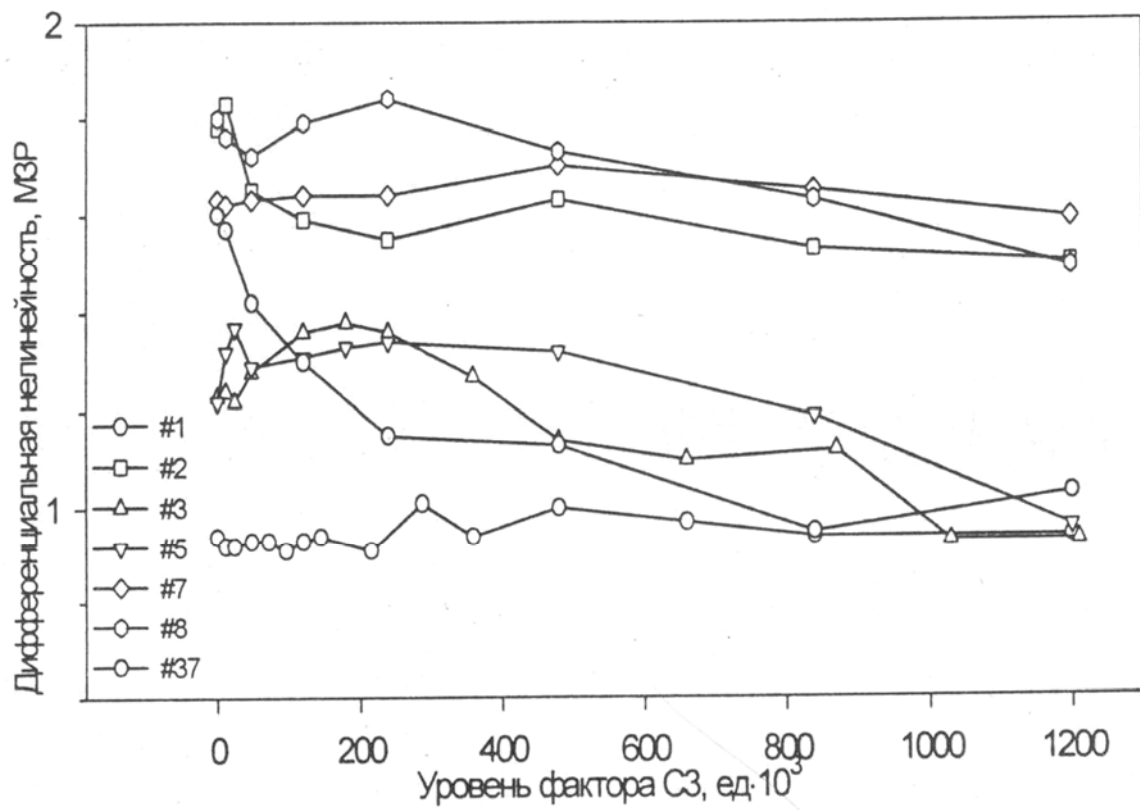


Рис. 6.19. Зависимость дифференциальной нелинейности от эквивалентного уровня C3

ГЛАВА 7. Зарубежные радиационно-стойкие интегральные схемы со структурой «кремний на сапфире»

Современный рынок крупных и наиболее широкоизвестных зарубежных производителей КМОП БИС КНС представлен следующими фирмами:

- PeregrineSemiconductor;
- GECPlasseySemiconductor;
- Intersil (HarrisSemiconductor, GE Solid State);
- DYNEXSemiconductor.

Основные показатели радиационно-стойких БИС КМОП КНС, выпускаемых зарубежными фирмами для военных и классических применений приведены в табл.7.1

Основные показатели БИС КМОП КНС, выпускаемых зарубежными фирмами для военных и космических применений:

Табл.7.1

<i>Название фирмы</i>	<i>Тип микросхемы, уровень технологии</i>	<i>Радиационная стойкость</i>
Peregrine Semicond. Corp. (США)	ASIC Cell Library (SC, FC; UTSi 0,5/0,35/0,25мкм) PE4141(RF Broadband MOSFET Array) PE43204, PE43502, PE43503, PE43602 (DSA) PE64904 (BEC) UTSi / Ultra CMOS (CG, SC, 0,5/0,35/0,25 мкм)	D>0.1Мрад SEU>10 ⁻¹⁰ сбой/(бит/сутки) (космос, беспроводные коммуникации)
Dynex Semiconductor (США)	MA7001 54HSC MA31751 (ОЗУ)	D>1Мрад(Si) SEU>1x10 ⁻¹¹ сбой/(бит/сутки) (военн.)

	MAS281 (микропроцессорный комплект)	
Intersil Corp. бывш. HARRIS (США)	HCS00 (SG, 1.5 мкм) HCTS74MS (SC, 1.5 мкм)	D=0.2-1Мрад TU>10 ¹⁰ рад/с SEU=2 10 ⁻⁹ (бит день) ⁻¹ (военн.)
	HS65643RH (СОЗУ 64К) (FC, 1.2 мкм)	D=1Мрад TU=10 ¹¹ Рад/с SEU=2 10 ⁻¹² (бит день) ⁻¹ (военн.)
GEC-PLESSEY Semicond. (Англия)	MA9000 (CG, 2.5 мкм) MACRO SOS1 (SC, 2.5 мкм) MA9564 СОЗУ (FC, 1.5 мкм)	D>1Мрад TU>10 ¹² рад/с SEU=4.3 10 ⁻¹¹ (бит день) ⁻¹ (военн.)
ABB NAFO (Швеция)	SOS4 (SC, 2.0 мкм) SOS5 (SC, 1.25 мкм)	D>0.1Мрад (космос)
SMARTECH (Финляндия)	DSP (FC, 1.25 мкм)	D>0.1Мрад (космос)

Аббревиатуры в таблицах 1 и 2:

CG - матрицы со столбцами вентиляей; D – максимальная доза облучения;
 SG - "море" вентиляей; TU – мощность дозы излучения
 SC - набор стандартных ячеек; (гамма-импульс);
 FC - полностью заказная схема; SEU – вероятность сбоя на бит в сутки.

Каталоги ведущих зарубежных фирм содержат, практически, всю номенклатуру цифровых БИС, которые реализуются по КМОП-технологии на объёмном кремнии.

Остановимся на радиационно-стойкой элементной базе каждой из вышеперечисленных компаний подробнее.

7.1 Peregrine Semiconductor Corporation

Peregrine - быстро растущая компания, специализирующаяся исключительно на производстве КНС – микросхем, изготовленных по запатентованной оригинальной технологии UTSi/UltraCMOS. Продукция *Peregrine* обеспечивает потребности глобального рынка радиотехнических и телекоммуникационных систем. Среди них особенно следует выделить два направления. Во-первых, это стремительно развивающиеся LTE, HSDPA, WCDMA цифровая сотовая мобильная связь и телевидение, а также широкополосные коммуникационные системы типа DTV/PCT/DVR и др. Во-вторых, это системы, эксплуатация которых требует повышенной надежности: телекоммуникации, промышленная и автомобильная электроника, аэрокосмическая и военная техника и другие специальные применения.

7.1.1 UltraCMOS технология компании Peregrine

В настоящее время компания использует для изготовления КМОП микросхем UltraCMOS технологию на КНС пластинах диаметром 150 мм с топологическими проектными нормами 0,5; 0,35; 0,25 мкм. Выбор варианта технологии зависит от конкретного назначения и области применения микросхемы.

Основные параметры, характеризующие уровни UltraCMOS технологии:

<i>Параметр</i>	<i>Вариант технологии</i>				
	<i>FA</i>	<i>FC</i>	<i>FD</i>	<i>GA</i>	<i>GC</i>
Проектные нормы, мкм	0,5			0,25/0,35	
Напряжение питания, В	3,0/3,3			2,5	
Количество уровней порогового напряжения транзисторов	3n/3p			3n/3p	
Частота F_t , ГГц	15			30	
Частота F_{max} , ГГц	45			90	
Резисторы	2n / 1p / 1 polyside			2n / 1p / 1 polyside	

Количество слоев межсоединений	3	3	2	3	3
MIM конденсаторы	нет	да	нет	нет	да
Индуктивности	нет	да	нет	нет	да

FA процесс 0,5 мкм UltraCMOS (стандартный маршрут)

Это базовый процесс «F» - серии, по которому изготавливается большинство цифровых, аналоговых и оптоэлектронных микросхем. Он характеризуется:

- тремя уровнями порогового напряжения V_{th} для n- и p- канальных МОП-транзисторов (по выбору);
- тремя слоями металла межсоединений;
- одним слоем поликремния, легированного силицидом для формирования резисторов.

FC процесс 0,5 мкм UltraCMOS (с MIM конденсаторами)

В этом варианте технологического процесса последний слой металла делается утолщенным по сравнению с FАвариантом. Делается это для того, чтобы обеспечить достаточно высокие параметры индуктивностей и конденсаторов со структурой MIM(Metal-Insulator-Metal), образуемой двумя верхними слоями металлизации. Этот вариант технологии используется для изготовления микросхем радиочастотного диапазона с достаточно высокими характеристиками.

FD процесс 0,5 мкм UltraCMOS (упрощенная версия)

Этот вариант технологии используется для микросхем с малым числом транзисторов, для разводки которых достаточно два, а не три слоя металлизации. Кроме того, для целого ряда простых микросхем достаточно использовать набор МОП-транзисторов с двумя, а не тремя уровнями порогового напряжения.

GA / GC процессы 0,25/0,35мкм UltraCMOS (сверхвысокочастотные)

Эти процессы разработаны специально для сверхвысокочастотных радиотехнических монолитных микросхем. В этих микросхемах используются 0,25/0,35 мкм МОП-транзисторы с повышенными значениями предельных частот F_t и F_{max} по сравнению с 0,5 мкм транзисторами, реализованными по F-варианту технологии.

В настоящее время компания *Peregrine* совместно с компанией IBM отработывает новый вариант UltraCMOS технологии на КНС пластинах диаметром 200 мм с минимальным топологическим размером 0,18 мкм. Планируется, что после серийного освоения варианта технологии с размером 0,18 мкм, последующими шагами будет освоение вариантов технологии уровня 0,13 мкм и 0,09 мкм [].

7.1.2. Серийные микросхемы компании *Peregrine Semiconductor*

Серии имеют следующий функциональный состав:

Тип микросхемы	Функциональное назначение
PE9354	SPDT переключатель высокой мощности
PE9601	2.2GHz целочисленная схема фазовой автоподстройки частоты для радиационно-стойких элементов
PE9701, PE9702, PE9704	3.0 GHz целочисленная схема фазовой автоподстройки частоты для радиационно-стойких элементов
PE9763, PE97632	3.0 GHz Delta-Sigma модулированная дробная схема фазовой автоподстройки частоты для низкофазных шумовых приложений
PE94302	Радиационно-стойкий цифровой аттенюатор
PE9301	3.5 GHz маломощный UltraCMOS™ предсчетчик делитель на 2 для радиационно-стойких приложений
PE9303	3.5 GHz маломощный UltraCMOS™ предсчетчик делитель на 8 для радиационно-стойких приложений
PE9304	7 GHz маломощный CMOS предсчетчик делитель на 2 для радиационно-стойких приложений
PE9308	13.5 GHz маломощный CMOS предсчетчик делитель на 4 для радиационно-стойких приложений
PE9311	1500 MHz маломощный UltraCMOS™ предсчетчик делитель на 2
PE9312	1500 MHz маломощный UltraCMOS™ предсчетчик делитель на 4
PE9313	1500 MHz маломощный UltraCMOS™ предсчетчик делитель на 8

PE926C31, PE926C32	Маломощный UltraCMOS™ RS-422 линейный драйвер для радиационно-стойких приложений
PE64904	Цифровой перестраиваемый конденсатор на 5 бит и 32 состояния в диапазоне 100-3000 МГц, совместимый с 3-выводным SPI интерфейсом
PE64905	Цифровой перестраиваемый конденсатор на 5 бит и 32 состояния в диапазоне 100-3000 МГц, совместимый с 2-выводным I ² S интерфейсом
PE43204	2-битный цифровой шаговый аттенюатор на 18 позиций с шагом 6 dB для 4G LTE применений
PE43502, PE43503, PE43602	Цифровые шаговые аттенюаторы, перекрывающие диапазон 31,5 dB с шагом 0,5 dB или 0,1 dB, работающие на нагрузку 50 Ом
PE42750	Широкополосный маломощный переключатель на диапазон 5-1000 МГц с нагрузкой 75 Ом
PE42551	RF переключатель с ультралинейной характеристикой на частоте 6 ГГц с нагрузкой 50 Ом
PE42662	RF переключатель для передающих трактов в диапазоне частот 900-1900 МГц
PE42451	RF переключатель для различных приложений в диапазоне частот 450-4000 МГц
PE42440	RF переключатель с высоколинейной характеристикой в диапазоне частот 50-3000 МГц
PE42556	SPDTRF переключатель на 13,5 ГГц для измерительной аппаратуры
PE4250, PE4251	SPDTRF переключатели для высокочастотных приложений
PE4150	Низкочастотный пассивный смеситель, интегрированный с LO усилителем
PE4141	Широкополосная квадратичная матрица МОП-транзисторов с ультра высокой линейностью характеристик в диапазоне до 1,0 ГГц для мультиплексных применений
PE3341	Серийный фазовращатель с программируемым накопителем на базе встроенной EEPROM памяти

Основные радиационные характеристики:

Максимальная доза облучения	3×10^5 рад(Si)
Вероятность сбоев	$>1 \times 10^{-9}$ сбой/(бит/сут)

7.2. Компания Dynex Semiconductor

Dynex Semiconductor имеет более чем 20-летний опыт производства компонентов для использования в космических аппаратах. Для компании технология "Кремний на сапфире" является базовой технологией с долгой историей успешного применения в космических программах. Приборы устойчивы к воздействию радиации в соответствии с военными стандартами США (MIL STD 883 method 1019) и Европы (BSE9001).

Ниже представлен функциональный состав серий радиационно-стойких КМОП/КНС микросхем, используемых в бортовой космической аппаратуре:

<i>Тип микросхемы</i>	<i>Функциональное назначение</i>
MA1916	Радиационно-стойкое соединительное (читающее) устройство и обратно декодирующее устройство
MA28139	Шлейфовый подключатель терминала
MA28140	Блок данных дистанционного декодирующего устройства
54HSC	Радиационно-стойкий 16-битный параллельный обнаруживатель и корректировщик погрешностей
54HSC/T Series	Радиационно-стойкие высокоскоростные КМОП/КНС логические элементы
MA7001	RadiationHard5 12×9-bit FIFO (метод обслуживания пользователей: первый пришел - первый ушел)
MA5114	Радиационно-стойкая 1024×4-битная статическая оперативная память
MA9264	Радиационно-стойкая 8192×8-битная статическая оперативная память
MA17501	Радиационно-стойкий исполнительный комплекс
MA17502	Радиационно-стойкий регулирующий комплекс
MA17503	Радиационно-стойкий регулирующий комплекс
MA31750	Высокоточный микропроцессор
MAS281	Микропроцессор
MA28155	Радиационно-стойкий программируемый периферийный интерфейс
MA31751	Управление памятью и блок защиты
MA31753	DMA контроллер для систем MA31750
MA31755	16-битный питающий механизм, обнаруживающий и корректирующий ошибки

Основные радиационные характеристики:

Максимальная доза облучения	1×10^6 рад(Si)
Вероятность сбоев	$< 1 \times 10^{-11}$ сбой/(бит/сут)
Поток нейтронов	$> 1 \times 10^{15}$ н/см ²
Мощность дозы излучения	5×10^{10} рад (Si)/с
Мощность дозы излучения(при которой наступает отказ системы)	$> 1 \times 10^{12}$ рад(Si)/с

7.3. Intersil corporation

Intersil – крупнейшая мировая корпорация, производящая высокоинтегрированные ИС для рынка телекоммуникаций и систем управления питанием.

Клиентами *Intersil* являются такие крупнейшие промышленные концерны, как *Intel, Sharp, Cisco, IBM, Sony, Compaq, Alcatel* и многие другие.

На протяжении более 40 лет *Intersil* развивает и совершенствует свои дизайнерские и производственные технологии для создания ИС, работающих в жестких условиях эксплуатации: с расширенным диапазоном рабочих температур, а также при воздействии радиации.

Поэтому, в 1990-х годах корпорация *Intersil* приобрела компанию *Harris Corporation* – признанного мирового лидера по производству радиационно-стойких ИС для военной и космической техники.

Функциональный состав радиационно-стойких КМОП КНС ИС и БИС, выпускаемых компанией Intersil Corp. (бывшей HARRIS), приведен ниже:

<i>Тип микросхемы</i>	<i>Функциональное назначение</i>
HS-1840ARH	16-канальный КМОП аналоговый мультиплексор с высоким Z аналогом защиты команды ввода
HS-0546RH	Дифференциальный 16-канальный КМОП мультиплексор с активной защитой от перенапряжения
HS-508BRH	8-канальный КМОП мультиплексор с защитой от перенапряжения

HS-0547RH	8-канальный КМОП мультиплексор с защитой от перенапряжения
HS-0548RH	4-канальный КМОП мультиплексор с защитой от перенапряжения
HS-201HSRH	Высокоскоростной, учетверенный SPST аналоговый переключатель
CD4066BMS	Учетверенный двусторонний переключатель
HS-302RH	Двойной DPST аналоговый переключатель
HS-565BRH	Радиационно-стойкий высокоскоростной монолитный ЦАП
HS-26C31RH, HS-26CT31RH	Радиационно-стойкий учетверенный дифференциальный линейный драйвер
HS-26CLV31RH	Радиационно-стойкий 3.3 В учетверенный дифференциальный линейный драйвер
HS-246RH, HS-248RH	Радиационно-стойкая тройная линия передатчика, тройная линия приемника, тройной ресивер линии связи коллективного пользования
HS-26C32RH, HS-26CLV32RH, HS-26CT32RH	Радиационно-стойкий четверичный дифференциальный линейный получатель
ACTS08MS, HCS08MS, HCTS08MS	Радиационно-стойкий логический цифровой элемент 4-2И
CD4073BMS, CD4081BMS	Радиационно-стойкий элемент И
HCS11MS, HCS10MS	Радиационно-стойкий элемент 3-3И
ACS03MS	Радиационно-стойкий элемент 4-2И-НЕ с открытой утечкой
CD4023BMS	Радиационно-стойкий элемент И-НЕ
HCS00MS, HCTS00MS	Радиационно-стойкий элемент 4-2И-НЕ
HCS132MS	Радиационно-стойкий элемент 4-2И-НЕ Schmitt Trigger
HCTS20MS	Радиационно-стойкий элемент 2-4И-НЕ
HCTS30MS	Радиационно-стойкий элемент 8И-НЕ
CD4001BMS, CD4025BMS	Радиационно-стойкий КМОП элемент ИЛИ-НЕ
HCS02MS	Радиационно-стойкий элемент 4-2ИЛИ-НЕ
HCS27MS	Радиационно-стойкий элемент 3-3ИЛИ-НЕ
CD4030BMS	Радиационно-стойкий элемент 4ИЛИ
CD4071BMS	Радиационно-стойкий элемент ИЛИ
HCS32MS, HCTS32MS	Радиационно-стойкий элемент 4-2ИЛИ
CD4070BMS	Радиационно-стойкий КМОП вентиль ИЛИ и ИЛИ-НЕ
HCS86MS	Радиационно-стойкий элемент 4-2ИЛИ

CD4077BMS	Радиационно-стойкие КМОП элементы 4-ИЛИ и 4-ИЛИ-НЕ
ACS04MS, ACTS04MS, HCTS04MS	Радиационно-стойкий модуль из 6 инвертеров
CD4049BMS, CD4049UBMS, CD4050BMS	Радиационно-стойкий модуль из 6 буферов/конвертеров КМОП
CD4069UBMS	Радиационно-стойкий КМОП модуль из 6 инвертеров
CD4503BMS	Радиационно-стойкий КМОП модуль из 6 буферов
HCS05MS	Радиационно-стойкий модуль из 6 инвертеров с открытым коллектором
ACS244MS, HCTS541MS	Радиационно-стойкий неинвертирующий, восьмиричный, с тремя состояниями линейный драйвер
ACS541MS, HCS240MS, HCTS240AMS	Радиационно-стойкий восьмиричный буфер/линейный драйвер с тремя состояниями
ACTS240MS	Радиационно-стойкий с высокой надежностью линейный драйвер с тремя состояниями
ACTS244MS	Радиационно-стойкий восьмиричный неинвертирующий буфер с тремя состояниями
HCTS540MS	Радиационно-стойкий инвертирующий восьмиричный буфер/линейный драйвер с тремя состояниями
ACS373MS, ACTS373MS, HCS573MS	Радиационно-стойкий восьмиричный проницаемый триггер с тремя состояниями
CD4042BMS	Тактируемый D-триггер, радиационно-стойкий с тремя состояниями
CD4099BMS	Радиационно-стойкий КМОП 8-разрядный адресный затвор
ACS374MS	Радиационно-стойкий восьмеричный D-триггер с тремя состояниями
HCS273MS	Радиационно-стойкий восьмиричный D-триггер
ACS74MS	Радиационно-стойкий парный D-триггер с установкой в состояние и сбросом, усовершенствованная логика
ACTS74MS, HCTS74MS	Радиационно-стойкий парный D-триггер с установкой в состояние и сбросом
CD4013BMS, CD40174BMS	Радиационно-стойкий КМОП парный D-триггер
CD4027BMS	Радиационно-стойкий КМОП парный JK- Master-Slave триггер
HCS109MS	Радиационно-стойкий парный JK- триггер
ACTS161MS	Радиационно-стойкий 4-разрядный синхронный счетчик
CD40193BMS	Радиационно-стойкий КМОП Up/Down счетчик
CD4020BMS, CD4024BMS,	Радиационно-стойкий КМОП со сквозным переносом счетчик с двумя устойчивыми состояниями

CD4040BMS	
CD4060BMS	Радиационно-стойкий КМОП со сквозным переносом счетчик/драйвер и осциллятор с двумя устойчивыми состояниями
CD4520BMS	Радиационно-стойкий КМОП двоичный прибавляющий счетчик
HCS161MS	Радиационно-стойкий синхронный счетчик
HCS163MS	Радиационно-стойкий синхронный стандартный счетчик
HCTS191MS, HCTS193MS	Радиационно-стойкий синхронный 4-разрядный прибавляющий/вычитающий счетчик
HCTS393MS	Радиационно-стойкий счетчик по модулю 2
CD40105BMS	Радиационно-стойкий КМОП FIFO регистр
CD4015BMS	Радиационно-стойкий КМОП статический сдвиговый регистр с последовательным входом и параллельным выходом
CD4076BMS	Радиационно-стойкий КМОП 4-разрядный регистр D-типа
CD4504BMS	Радиационно-стойкий КМОП шестнадцатиричный преобразователь уровня напряжения для ТТЛ в КМОП или КМОП в КМОП операции
CD4028BMS	Радиационно-стойкий КМОП преобразователь из двоично-десятичного кода в десятичный
CD4051BMS, CD4052BMS, CD4053BMS	Радиационно-стойкий КМОП аналоговый мультиплексор/демультиплексор
HCS151MS	Радиационно-стойкий 8-входовой мультиплексор
HCTS153MS	Радиационно-стойкий 4-входовой мультиплексор
HCTS157MS	Радиационно-стойкий 2-входовой мультиплексор
HS-139RH	Радиационно-стойкая схема сравнения напряжения
IS-139ASRH	Единичная радиационно-стойкая схема сравнения напряжения
CD4063BMS	Радиационно-стойкая КМОП 4-разрядная схема сравнения напряжения
HS-5104ARH	Операционный усилитель с низким уровнем шума
HS-OP470ARH	Операционный усилитель с очень низким уровнем шума
ISL7124SRH	Стойкий к единичным событиям операционный усилитель с односторонним питанием
HS-22620RH	Радиационно-стойкий, широкополосный, с высоким уровнем сигнала на входе операционный усилитель без коррекции
HS-3530ARH	Радиационно-стойкий программируемый маломощный операционный усилитель
HS-1115RH	Радиационно-стойкий, высокоскоростной, маломощный, замкнутый буферный усилитель
HS-2420RH	Схема быстрой выборки и хранения

HS-6254RH	Радиационно-стойкая в СВЧ диапазоне матрица транзисторов
HS-6664RH	Радиационно-стойкое 8К×8 КМОП программируемое ПЗУ
HS-80C86RH	Радиационно-стойкий 16-разрядный КМОП микропроцессор
HS-82C54RH	Радиационно-стойкий КМОП программируемый датчик временных интервалов
HS-82C55ARH	Радиационно-стойкий КМОП программируемый периферийный интерфейс
HS-82C85RH	Радиационно-стойкий КМОП генератор

IS-2100ARH	Радиационно-стойкий высокочастотный драйверный полумост
HS-4080ARH	Радиационно-стойкий n-канальный полный драйверный мост на полевых транзисторах
HS-4423RH	Радиационно-стойкий инвертирующий мощный полевой МОП-транзисторный формирователь
IS-1715ARH	Радиационно-стойкий комплементарный драйвер переключателя на полевых транзисторах
ISL74422RH, HS-4424RH	Радиационно-стойкий неинвертирующий мощный 9-амперный полевой МОП-транзисторный формирователь
HS-1825ARH	Радиационно-стойкий высокоскоростной двухвыходный ШИМ
IS-1845ASRH	Устойчивый к единичным событиям радиации высокоскоростной переключатель тока ШИМ
IS-1825ASRH	Устойчивый к единичным событиям и полной дозе радиации, высокоскоростной ШИМ с двумя выходами
HS-117RH	Радиационно-стойкий регулятор положительного напряжения
ISL72991RH	Радиационно-стойкий регулятор отрицательного напряжения
IS-1009RH	Радиационно-стойкий 2,5В источник опорного напряжения
IS-2981RH	Радиационно-стойкий 8-канальный драйвер источника напряжения
IS-705RH	Радиационно-стойкая микропроцессорная схема сброса
ACTS245MS	Радиационно-стойкий восьмиричный неинвертирующий двунаправленный приемопередатчик на общую шину
HCTS245MS	Радиационно-стойкий восьмиричный приемопередатчик на шину с тремя состояниями, неинвертирующий
CD4008BMS	Радиационно-стойкий КМОП сумматор с параллельным переносом
HCTS283MS	Суммирующие, 4-разрядные, двоичные, с быстродействующим переносом, TTL входом, радиационно-стойкие, высокоскоростные КМОП

	логические схемы
CD4098BMS	Радиационно-стойкий КМОП парный моностабильный мультивибратор
CD14538BMS	Радиационно-стойкий КМОП парный прецизионный моностабильный мультивибратор
CD4047BMS	Радиационно-стойкий КМОП маломощный моностабильный/нестабильный мультивибратор
CD4585BMS	Радиационно-стойкая КМОП 4-разрядная схема сравнения по амплитуде
HCTS85MS	Радиационно-стойкая 4-разрядная схема сравнения по амплитуде

Основные радиационные характеристики:

Максимальная доза облучения	3×10^5 рад(Si)
Вероятность сбоев	$< 1 \times 10^{-10}$ сбой/(бит/сут)
Поток нейтронов	$> 1 \times 10^{15}$ н/см ²
Мощность дозы излучения	$> 1 \times 10^{11}$ рад(Si)/с
Мощность дозы излучения, при которой наступает отказ системы	$> 1 \times 10^{12}$ рад(Si)/с

GEC Pleassey (Mitel Semiconductor)

Компания *GEC Pleassey* производит следующую группу интегральных схем:

1. часть серийных элементов MA9000;
2. АЛУ;
3. синхронные/асинхронные счетчики;
4. паритетные детекторы;
5. сумматоры со сквозным переносом;
6. селекторы;
7. счетчики (грей - единица СИ поглощённой дозы излучения);
8. счетчики Джонсона;
9. микропроцессоры;

10. периферийные устройства;

11. память

Основные радиационные характеристики:

Максимальная доза облучения	1×10^6 рад(Si)
Вероятность сбоев	$< 5 \times 10^{-11}$ сбой/(бит/сут)
Поток нейтронов	$> 1 \times 10^{15}$ н/см ²
Мощность дозы излучения	1×10^{11} рад(Si)/с
Мощность дозы излучения, при которой наступает отказ системы)	$> 1 \times 10^{12}$ рад(Si)/с

ГЛАВА 8. Оптоэлектронные БИС со встроенным источником питания.

Элементная база БИС со структурой КНС, как показано в гл. 4, имеет большие перспективы для применения в реализации оптоэлектронных БИС. В настоящее время развиваются два направления в создании оптоэлектронных устройств с учетом использования прозрачной диэлектрической подложки сапфира. Одно из направлений предусматривает параллельную обработку информации, при этом ввод информации осуществляется через сапфировую подложку. Развитие этого направления связано с применением поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL). Фирма Peregrine наряду с освоением технологии UTSi (технология КНС на ультратонком кремнии-0.1мкм) освоила выпуск оптоэлектронных изделий (FOCUTS), которые обеспечивают высокоскоростную передачу информации с помощью поверхностно излучающих лазеров на параллельные вычислительные блоки через сапфировую подложку [71].

Наши работы по разработке и созданию оптоэлектронных БИС и высоковольтных микромощных фотоэнергетических модулей (второе направление) также оригинальны и должны найти соответствующее применение в быстро развивающейся электронике, поскольку позволяют интегрировать в устройствах различные направления электроники и расширять функциональные возможности этих устройств.

Как было отмечено в §4.3 для разработки высоковольтных микромощных фотоэнергетических модулей выбрана конструкция, в качестве элементной базы, диода с увеличенной i -базой и управляющим затвором.

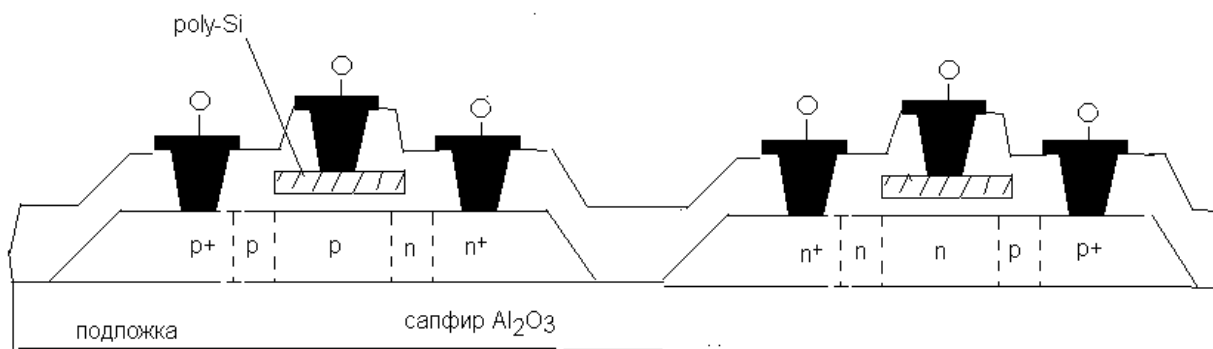
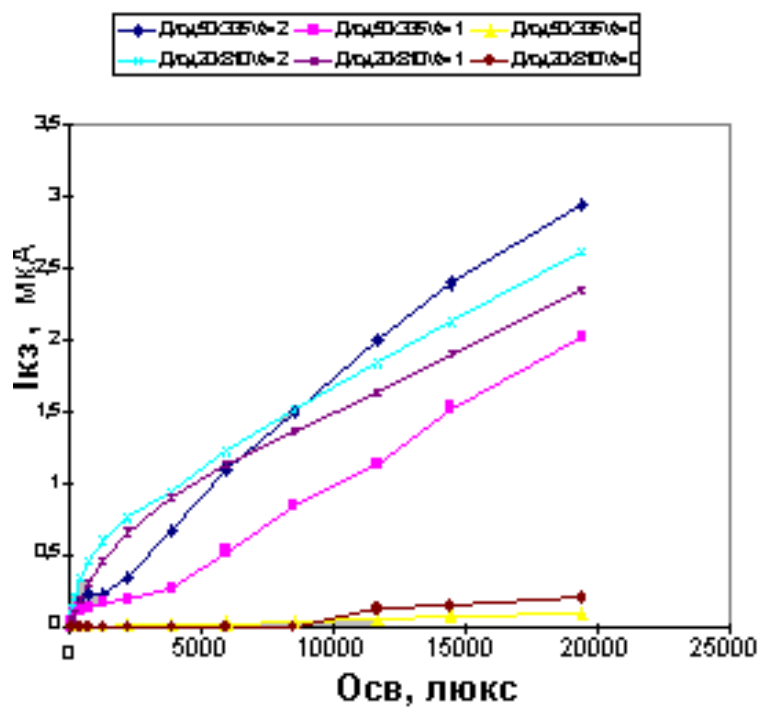


Рис. 7.1. Диод с затвором

При напряжении на затворе, превышающем пороговое напряжение МОП – структуры на достаточную величину происходит обеднение области кремния под затвором на всю глубину слоя.

Из графика «Зависимость $I_{кз}(осв)$ », рисунок 7.2, хорошо видно, что отдаваемый в нагрузку фототок резко возрастает при подаче на затвор смещения 0.9-1.0В.

Времена фотоответа для таких структур равны 0, так как электронно-дырочные пары генерируются непосредственно в ОПЗ.



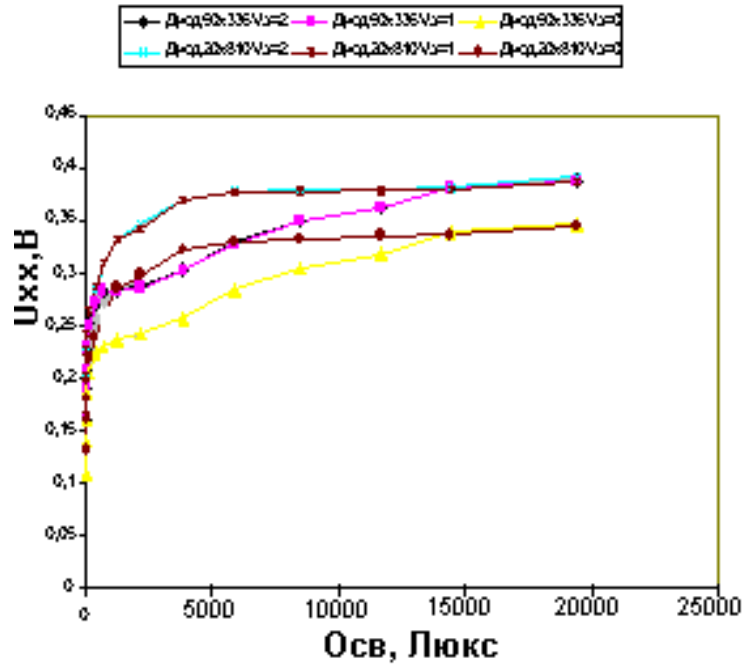


Рис. 7.2

Спектральная характеристика фотоэнергетического модуля на КНС, то есть зависимость светового тока от длины волны падающего излучения при засветке со стороны поликремневого затвора имеет максимум на длине волны 600-630нм. На рисунке 7.3 приведены зависимости выходных параметров U_{xx} и I_{k3} от условия освещенности.

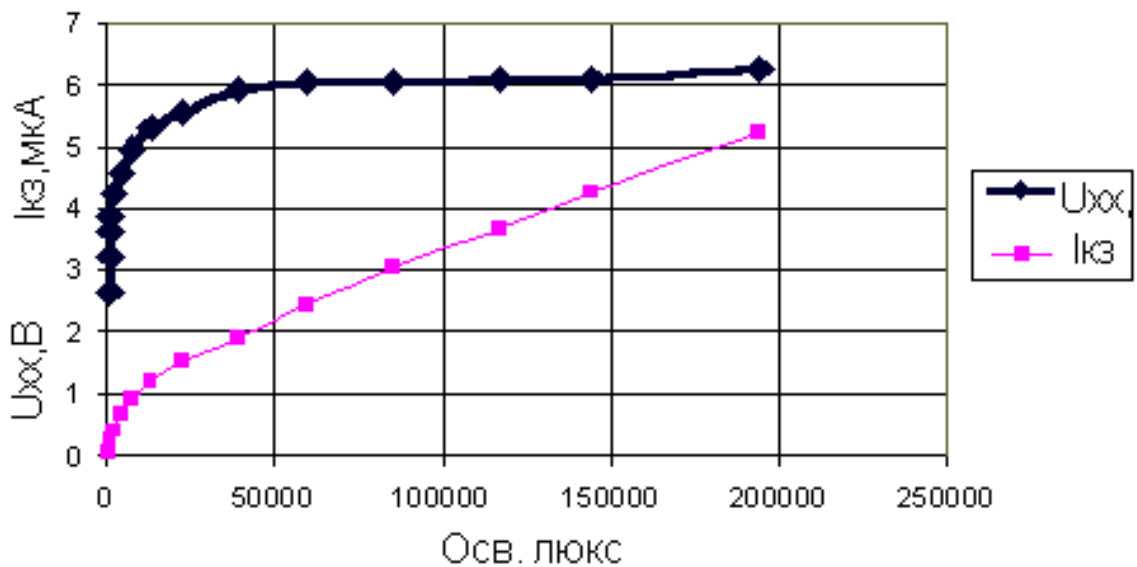


Рис. 7.3. Зависимости выходных параметров U_{xx} и I_{k3} от условия освещенности.

Для целого ряда применений, таких как питание ФЭУ, счетчиков Гейгера, и т.д., требуются маломощные источники электропитания с напряжением в несколько кВ, при токе в единицы мкА, т.е. с мощностью в единицы или десятки мВт. Обычно, в полевых условиях, для получения таких напряжений используются преобразователи низкого напряжения батарей в высокое на базе блокинг-генераторов с последующей трансформацией переменного напряжения и его выпрямлением. Недостатки такого метода очевидны: очень высокий уровень радиопомех и наводок по цепи питания, затрудняющий построение высокочувствительных входных усилителей; большие габариты и вес трансформатора; чувствительность к механическим ударам (особенно устройств с пермалловыми сердечниками); низкая надежность.

Идеальным решением, полностью исключая описанные недостатки, является применение преобразователей по схеме электрический ток- свет- электрическое напряжение с использованием лазерных или светоизлучающих диодов и эффективных преобразователей свет- электрическое напряжение.

Поэтому одной из первых задач наших исследований являлась оценка возможности создания таких источников питания. На рис. 7.4 показано, что зависимость выходного напряжения источника питания практически линейная.

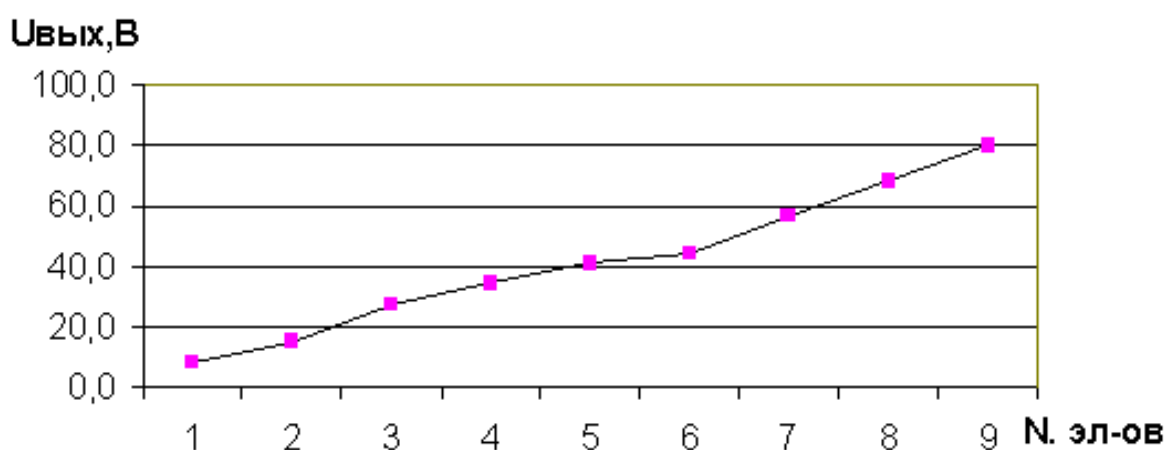


Рис. 7.4. Изменение выходного напряжения источника питания от количества элементов.

Это позволяет конструктивно решить проблему набора выходного напряжения до требуемого значения несколько десятков или сот вольт. Для чего необходимо минимизировать площадь этого источника и он должен быть соизмерим с площадью поверхности излучателя для равномерной освещенности микромощного источника питания [72,73].

В §4.3 показана возможность реализации такого источника и как показали исследования мощности источника с размерами $\sim 1\text{мм}^2$ практически достаточно, чтобы обеспечить функционирование интегральной схемы изготовленной по КНС-технологии. Реализация такой микросхемы была продемонстрирована на примере реализации постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) с последовательной выборкой кода памяти 256 бит [74].

КМОП ИС на КНС структурах имеют более высокую плотность упаковки, чем КМОП ИС на объемном кремнии. В этом случае возможность близкого расположения различных функциональных областей микросхемы, при этом нет опасности образования в сапфире паразитных инверсных каналов или смыкания объединенных областей, что характерно для обычных кремниевых структур. Это позволило в пределах одного кристалла разместить два фотоприемника: одного, как фотоэнергетического модуля (1мм^2) обеспечивающего на выходе ~ 5 Вольт и питающего микросхему; и второго, малого размера, преобразующего световые импульсы в электрические и обеспечивающего синхронизацию работы микросхемы и управляющих команд.

На рис. 7.5 приведена фотография топологии реализованной первой оптоэлектронной схемы, работоспособность которой обеспечивается от встроенного фотоэнергетического модуля преобразующего световую энергию ИК-излучателя с длиной волны 600-630 нм.

Перспективы применения таких микросхем самые разнообразные, прежде всего в отраслях с повышенной опасностью и необходимостью дистанционного управления; взрывоопасные, радиационно-активные производства; необходимость обеспечения развязки в вычислительных системах информационных потоков от источников питания; возможность компактно

(конструктивно) решать задачи по созданию сложных функциональных блоков, где необходимо подведение высокого напряжения без наличия высоковольтных проводов и разъемов и т.д. (например настольный электронный микроскоп) и наиболее простое решение, продемонстрированное в реализованной микросхеме - оптическое считывание кода информации, при отсутствии радиосигнала, что обеспечивает повышенную информационную защищенность.

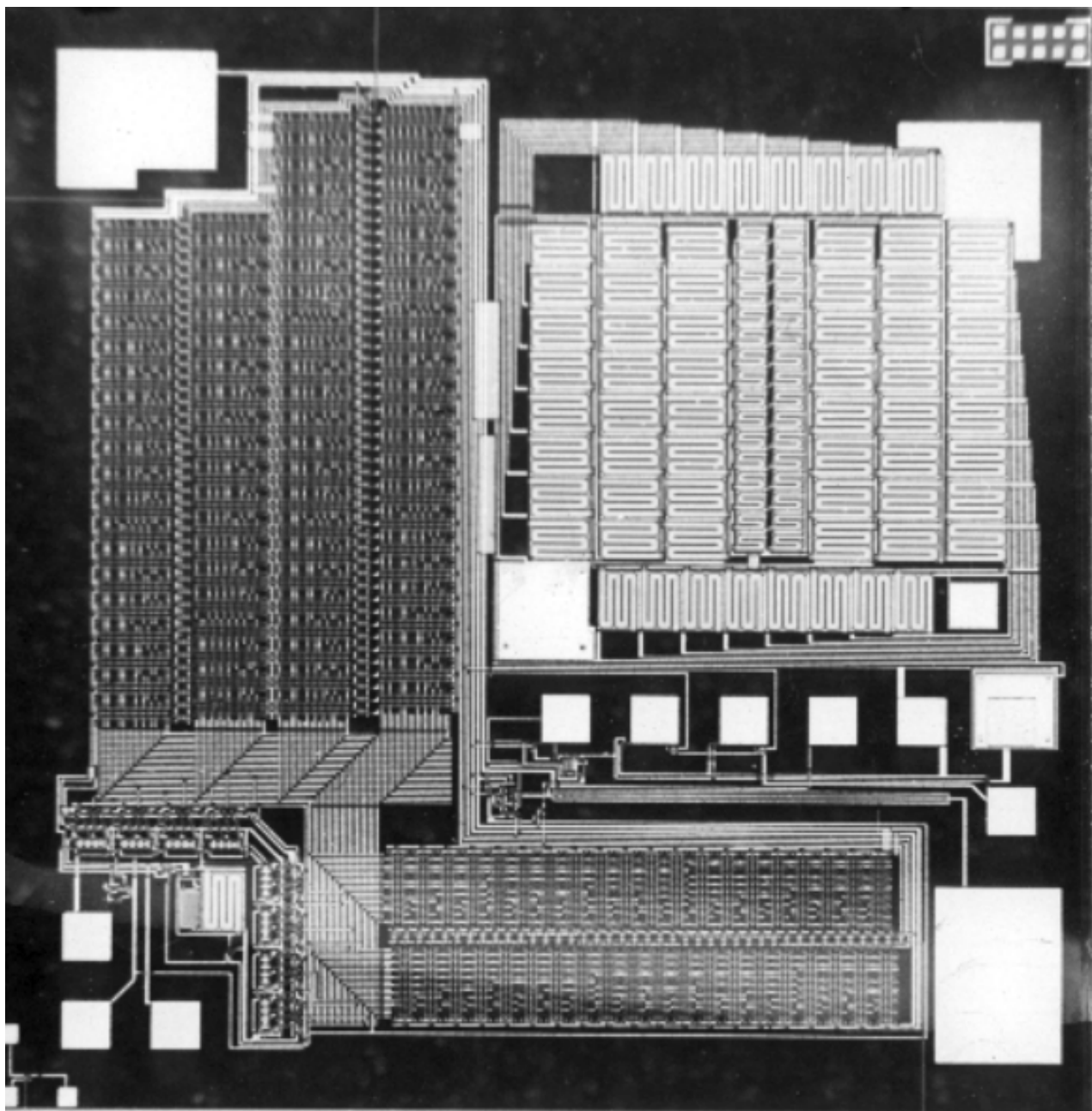


Рис. 7.5. Фотография топологии реализованной оптоэлектронной схемы.

Список литературы для введения

1. Яненко А.В., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Чумаков А.И., Экстремальная электроника // М., Изд. НИЯУ МИФИ, 2014, 244 с.
2. Белоус А.И., Космическая электроника // М., Изд. Техносфера, 2014, 900 с.
3. Extreme Environment Electronics // Edited by J.D. Cressler, H.A. Mantooth, CRC Press // Taylor and Francis, 2013.
4. Н. Айнспрук, У. Уиссмен, Арсенид галлия в микроэлектронике // М., «Мир», 1998, 560 с.
5. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М., Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия // Минск, Изд. «Университетское», 1992, 219 с.
6. Cressler J.D., Silicon Heterostructure Hand-book: Materials, Fabrication, Devices, Circuits, and Applications of SiGe and Si-Strained Layer Epitaxy // Taylor and Francis Group, 2006.
7. Тимошенко В.П., Кремниевые гетероструктуры и проектирование СВЧ интегральных схем на их основе // Мир электроника. Нанотехнологии в электронике. Вып. 2, М. Техносфера, 2013, с. 601-686.
8. Петросянц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А., Влияние различных видов радиации на характеристики кремний-германиевых гетеропереходных транзисторов // Электронная техника. Сер. 2. «Полупроводниковые приборы», Вып. 1, 2014, с. 3-18.
9. Суворов А.Л., Богданович Б.Ю., Замужный А.Г. и др., Технологии структур КНИ // М., МИЭТ/МИФИ/ФГУП ГНЦ ИТЭФ, 2004.
10. Coulinge J.-P., Silicon-on-Insulator // Kluwer Academia Publishers, London, 2004.
11. Marshall A., Natarjan S., SOI Design: Analog, Memory and Digital Techniques // Kluwer Academia Publishers, London, 2002.
12. Bernstein K., Rohrer N.J., SOI Circuit Design Concepts // Springer, 2002.
13. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. Книга 2, «Техносфера», М., 2015, с. 707-768.
14. Rapp U.K., Ross E.C., Silicon on Sapphire Substrates Overcome MOS Limitations/Electronics, Sept., 1972, №25, pp. 113.

15. Папков В.С., Цыбульников М.Б., Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе // М., «Энергия», 1979.
16. Smith B.A. et al., The Jupiter system through the eyes of Voyager 1 // Science. – 1979, Vol. 204, №4396, pp. 951-972.
17. Bisschoff D., Potgieter M., New local interstellar spectra for protons, helium and carbon derived from PAMELA and Voyager 1 observations // Astrophysics and Space Science. – 2016, Vol. 301, №2, pp. 1-8.
18. Новожилов Е.А., Самров И.А., Сенников И.А. и др., Функционально полный микропроцессорный комплект радиационно-стойких БИС КМОП КНС серии Б1825 // Научно-технические достижения. Сер. «Приборостроение и радиоэлектроника», 1994, №5, с. 19-23.
19. Микроэлектроника бортовых вычислительных комплексов. Под ред. А.Ю. Сметанова // М., «Логос», 2006, 190 с.
20. Ultra CMOS Process compared to Bulk Silicon CMOS, http://www.psemi.com/content/utracmos/utracmos_SOS_VS_bulk.html.
21. Адонин А.С, Новые возможности технологии БИС со структурой «кремний на сапфире» // Электронные компоненты, 2000, №3, с. 45-49.
22. Peregrine and IBM co-develop 180nm RF CMOS, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2010/MAY/PEREGRINE_130510.htm.
23. Peregrine Semiconductor and IBM see the future of RF in sapphire, http://www.edn.com/blog/Practical_Chip_Design/35782.
24. Peregrine Takes Another “STeP” Forward in Silicon-on-Sapphire Technology, <http://electronicdesign.com/communications/peregrine-takes-another-step-forward-silicon-sapphire-technology>.
25. Robinette D., Ultra CMOS RFICs Ease the Complexity of Satellite Designs // Microwave Journal, Aug. 2009, pp.86-98.
26. CMOS on sapphire Technology Delivers News Level of multi-GHz RF Integration.
27. McCarthy J., Silicon on Sapphire has a unique ability to integrate the elements of a wireless system on a chip Solution // Peregrine Semicon. Corp., 2010, Advantage Business Media, <http://www.psemi.com>.

28. Kelly D., Cover Story Integrating CMOS Designs in GSM Front Ends // Peregrine Semicon. Corp., 2011 Advantage Business Media, <http://www.psemi.com>.
29. Электронные компоненты, №1, 2013.
30. Носов Ю.Р., Сметанов А.Ю., КНС технология, Важнейший ресурс экстремальной электроники // Научное издание, №1, 2014, с. 13-21.
31. Кривулин Н.О., Ультратонкие слои кремния на сапфире // Нижегородский ГУ, 2011.
32. Кернс Ш.Э., Шейфер Б.Д., Разработка радиационно-стойких ИС космического назначения: обзор подходов // ТИИЭР, 1988, т. 76, №11, с. 75-146.
33. Dobrovinskaya E., Lytvinov L., Pishchik V., Sapphire: Material, Manufacturing, Applications // Springer, 2009.
34. Culurciello E., Silicon-on-Sapphire Circuits and Systems // McGrawHill, 2010.

Список литературы для глав 1-8

1. Адонин А.С. и Усов Н.Н., ОАО НПП «Сапфир» и «Оптрон», «Электронная промышленность №1 2001г. часть2», стр.16-27.
2. Адонин А.С. и Уваров Е.Ф., ОАО НПП «Сапфир – 50 лет», «Электронная промышленность №5 2001г.», стр.39-49.
3. Адонин А.С., Новые возможности технологии БИС со структурой «кремний на сапфире», Электронные компоненты, №3, 2000, с. 45-49.
4. Рубин и сапфир, Изд. «Наука», Москва, 1974г.
5. Папков В.С., Цыбульников М.Б., Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе, Москва, «Энергия», 1979г.
6. Cullis A.G., Booker G.R., Electron microscope study of epitaxial silicon films on sapphire and diamond substrates. Thin Solid Films, 1976, vol.31, p. 53.
7. TCAD Sentaurus User Manual J-2014.09, Synopsys.
8. Адонин А.С., Василицев А.Н., Михайлов Л.Н., Маслов А.А. и др., Способ подготовки сапфировых подложек, Авторское свидетельство №463391 от 14.11.74.

9. Адонин А.С, Михайлов Л.Н., Маслов А.А. и др., Моделирование процесса выращивания эпитаксиальных пленок, Сб. «Электронная техника», сер. 2, вып. 2 (66), 1972, стр. 30-37.
10. Адонин А.С, Валгесоо М.Х., Михайлов Л.Н., Пуусепп М.Э., Управление процессом получения сложных эпитаксиальных структур, Сб. «Электронная промышленность», 1974, №11, стр. 12-23.
11. Адонин А.С, Михайлов Л.Н., Бондаренко В.Б., Эстрин М.Я., Некоторые методы низкотемпературной эпитаксии кремния, Сб. «Процессы роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок», Новосибирск, «Наука», 1975, стр. 127-132.
12. Адонин А.С, Фокин А.С., Рычкова С.В., Жесткова Л.И. и др., Управление несоответствием параметров кристаллических решеток автоэпитаксиальных структур кремния, Сб. «Электронная техника», сер. 2, вып. 9(101), 1975, стр. 40-48
13. Адонин А.С, Михайлов Л.Н., Бондаренко В.Б., Сорокина О.М., К вопросу о механизме процесса искрового легирования, Сб. «Электронная техника», сер. 2, № 8, 1972, стр. 97-105.
14. Адонин А.С, Дмитриев В.П., Михайлов Л.Н., Наумов В.В., и др, Способ контроля параметров гетероэпитаксиальных структур на прозрачной подложке, Авторское свидетельство №786730 от 09.07.79г.
15. Адонин А.С, Губырин Л.В., Дмитриев В.П, Титов М.Н., и др., Устройство контроля параметров гетероэпитаксиальных структур на прозрачной подложке, Авторское свидетельство №791125 от 27.08.79 г.
16. Адонин А.С, Батулин В.Е., Михайлов Л.Н., Титов М.Н. и др., Способ исследования структурного совершенства кристаллов и устройство для его реализации, Авторское свидетельство №855457 от 06.05.80 г.
17. Адонин А.С, Чумак В.Д., Ткаченко Л.И., Блецкан Н.И. и др., Способ изготовления сапфировых подложек, Авторское свидетельство №273520 от 03.05.88.
18. Сушков В.П., Титов М.Н., Применение методов термостимулирования для исследования материалов электронной техники. Обзоры по электронной технике. Серия «Полупроводниковые приборы», 1975, вып. 1(27).
19. Милнс А., Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках, М., Мир, 1977г.

20. Адонин А.С, Евмененко В.А., Михайлов Л.Н., Наумов В.В., и др., Способ наращивания гетероэпитаксиальных слоев кремния из газовой фазы на сапфировой подложке, Авторское свидетельство №702973 по заявке №2647438 от 12.01.79.
21. Адонин А.С, Колесникова Т.Г., Коровин А.П., Усов Н.Н., Ширяева М.В., Исследование глубоких центров захвата в гетероэпитаксиальных слоях кремния на сапфире, Журнал «СВЧ техника», серия 1, выпуск 2(472), 1998, стр. 56-58.
22. Адонин А.С, Коровин А.П., Китиченко Т.С., Глубокие центры захвата в гетероэпитаксиальных слоях КНС, подвергнутых различным обработкам, Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-99»», 1999, стр. 167-169.
23. Адонин А.С, Беспалов А.В., Китиченко Т.С., Колесникова Т.Г., Коровин А.П. и др., Влияние тепловой и радиационной обработки на структуры кремния на сапфире., Материалы научно-технической конференции «Материалы и изделия из них под воздействием различных видов энергии», Академия космонавтики, Москва, 21-22 апреля 1999г., стр. 90-92.
24. Адонин А.С, Бейсюк П.П., Бурачек В.Р., Китиченко Т.С., Коровин А.П., Титов М.Н., Термостимулированная релаксация как метод исследования широкозонных полупроводников, Изд. «Техника Про», М., 2000, 96 с.
25. Адонин А.С, Беспалов А.В., Китиченко Т.С., Колесникова Т.Г., Коровин А.П., Ширяева М.В., Глубокие центры захвата в гетероэпитаксиальных слоях КНС, подвергнутых различным обработкам, Микроэлектроника РАН, №4, том 29, 2000 г., с. 279-295.
26. Адонин А.С, Василищев А.Н., Зеликман Г.А., Коровин С.К., Осаждение пленок поликристаллического кремния в реакторе пониженного давления, Сб. «Электронная техника», сер. 2, «Полупроводниковые приборы» вып. 8 (151), 1981.
27. Адонин А.С, Василищев А.Н., Гарба Л.С., Михайлов Л.Н., Осаждение диэлектрических и проводящих слоев из газовой фазы при пониженном давлении, Обзоры по электронной технике, сер. 2, «Полупроводниковые приборы», вып. 7 (962), 1983..
28. Адонин А.С, Василищев А.Н., Рубцова Ю.Д., Получение пленок поликристаллического кремния, легированного

- фосфором в проточном реакторе пониженного давления., Сб. «Электронная техника», сер. 2, вып. 6 (172), 1984.
29. Адонин А.С., И.М. Арнопольская, А.А. Зайцев, Ю.А. Концевой, А.П. Коровин, А.С. Сигов, А.Н. Федоровский, Кристаллофизика материалов электронной техники. Часть 1. Геометрическая кристаллография., Изд. МИРЭА, М., 2002, 95 с.
 30. Адонин А.С., И.М. Арнопольская, А.А. Зайцев, Ю.А. Концевой, А.П. Коровин, А.С. Сигов, А.Н. Федоровский., Кристаллофизика материалов электронной техники. Часть 2. Пространственная кристаллография, Изд. МИРЭА, М., 2002, 92 с.
 31. Адонин А.С, Богданов С.С., Василищев А.Н., Михайлов Л.Н., и др., Способ создания подзатворного диэлектрика., Авторское свидетельство №1094520 от 22.01.84.
 32. Адонин А.С, Василищев А.Н., Кондрацкий В.А., Михайлов Л.Н. и др., Способ формирования подзатворного диэлектрика., Авторское свидетельство №266049 от 01.12.87.
 33. Новожилов Е.А., Самров И.А., Усов Н.Н., Адонин А.С., Функционально полный микропроцессорный комплект радиационно стойких БИС КМОП КНС серии Б1825, Приборостроение и радиоэлектроника, 1994, №5, стр. 19- 23.
 34. К.О. Petrosjanc, I. A. Kharitonov, Adonin A.S., Radiation hardened CMOS SOI/SOS Structures and ICs for space applications, Труды международной конференции 5-th IEEE Intern. On-Line Testing Workshop, Rhodes, Greece, July, 1999, pp. 122- 125.
 35. К.О. Petrosjanc, I. A. Kharitonov, A.S. Adonin, M.V. Sicheva, SOI device parameter investigation and extraction for radiation hardness modeling with SPICE, Труды международной конференции IEEE Int. Conference on Microelectr. Test Structures, vol. 7, March 1994, , San Diego, USA, pp.126-129.
 36. К.О. Petrosjanc, I.A. Kharitonov, N.N. Usov, Adonin A.S., Device Radiation Response Investigation and SPICE Model Parameters Extraction for VLSI radiation Hardness Modeling, Труды международной конференции 6-th Intern. Symposium on IC Technology, Systems and Applications (ISIC-95), Sept. 1995, Singapore, pp. 390-394.
 37. Петросянц К.О., Адонин А.С, Беспалов А.В., Суворов А.Л., Исследование технологического маршрута изготовления МДП-транзисторов со структурой «кремний на изоляторе» с помощью

- приборно-технологической САПР, Сборник научных трудов Научной сессии МИФИ-98, часть 5, с. 273-275, М., 1998.
38. Адонин А.С., МДП транзистор на КНС., Авторское свидетельство №1499647 от 08.04.89.
 39. Адонин А.С., Transistors MDS, Catalogue of the 46-th World Exhibition of Innovation, Research and New Technology, Brussels (Belgium), Nov. 1997.
 40. A.S. Adonin, K.O. Petrosjanc, N.N. Usov, Silicon Solar Cells for Low Energy Applications, Труды международной конференции 8-th Intern. Congress and Exhibition IEC-2000: Emerging Sources of Energy and Economic Development, New Delhi, Nov. 1994, pp. 287- 288.
 41. Усов Н.Н., Адонин А.С., Петросянц К.О., Низкоэнергетические солнечные элементы и интегральные датчики на их основе., Тезисы докладов VII Всероссийской научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-95), Гурзуф, май 1995, т.3, с. 527-528.
 42. Адонин А.С., Петросянц К.О., Усов Н.Н., Низкоэнергетические солнечные элементы, Тезисы докладов Международной конференции «Фотонные системы экологического мониторинга», Прага, дек. 1996, с.53 – 54.
 43. К.О. Petrosjanc, Usov N.N., Adonin A.S., Silicon solar cells for low energy applications, Труды SPIE, v. 3200, 1997, pp. 110-112.
 44. Адонин А.С., Абрамов В.С., Губырин Л.В., Сушков В.П. и др., Способ изготовления полупроводниковых источников света, Авторское свидетельство №135886 от 1.11.79г.
 45. Адонин А.С., Василищев А.Н., Евмененко В.А., Катман А.К. и др., Способ изготовления преобразователей изображения, Авторское свидетельство №1189290 от 1.07.85 г.
 46. Адонин А.С., Михайлов Л.Н., Соколов Е.Б., Титов М.Н., Солнечная батарея, Авторское свидетельство №741712 от 21.02.80.
 47. Усов Н.Н., Адонин А.С., Петросянц К.О., Поляков И.В., Датчик освещенности на базе монолитной оптоэлектронной схемы со встроенным питанием, Тезисы докладов VIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения,

- контроля и управления» (Датчик-96), Гурзуф, май 1996, т.2, с. 239-240.
48. Адонин А.С., Петросянц К.О., Поляков И.В., Интеллектуальный датчик освещенности и/или светового кода на основе монолитной оптоэлектронной схемы со встроенным фотоэлектрическим питанием, Тезисы докладов IX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-97), Гурзуф, май 1997, т.2, с. 259-260.
 49. Никифоров А.Ю., Критенко М.И., Телец В.А. и др. Система радиационных испытаний БИС в процессе разработки, производства и поставки, Сб. «Стойкость-98», вып. 1, с.5.
 50. Sexton F.W., Schwannk J.R., "Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits", IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol.NS-32, pp.3975-3981, N 6, 1985.
 51. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах, Москва, Энергоатомиздат 1989., 254с.
 52. Петросянц К.О., Самров Н.П., Адонин А.С., Харитонов И.А., Библиотека моделей МДП-транзисторов для моделирования эффектов стационарного, импульсного излучений и воздействия одиночных частиц для программы PSPICE, с. 277-279.
 53. Петросянц К.О., Харитонов И.А., Адонин А.С., Моделирование элементов КМДП схем со структурой КНИ с учетом радиационного воздействия, Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Микро- и наноэлектроника-98», т.2, 1998, Звенигород, №РЗ-63.
 54. K.O. Petrosjanc, I. A. Kharitonov, Adonin A.S., Multi-level Testing Strategy for Radiation Hardened SOI/SOS ICs, Труды международной конференции 3-rd IEEE Latin-American Test Workshop, Montevideo, Uruguay, February, 2002, p.199-204.
 55. Gwyn C.W., Model for radiation-induced charge trapping and annealing in the oxide layere of MOS devices, J. of Appl. Phys., vol.40, N 12, pp. 4886-4892, 1969.
 56. Болисов В.А., Попов В.Д., Сизов А.В., Кинетика накопления заряда в SiO₂ МОП-структуры, Кинетические явления в полупроводниках и диэлектриках. Под ред. А.И. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 29-34.

57. H.E. Boesch, F.B. McLean, Saturation of threshold voltage shift in MOSFET's at high total dose.",IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol.NS-33, N 6, pp. 1191-1198, 1986.
58. Gaitan M., Russell T.J., Measurements of radiation-induced interface traps using MOSFET's. IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol.NS-31,pp.1256-1260, N 6, 1984.
59. J.M.Benedetto, H.E.Boesch, MOSFET and MOS capacitor responses to ionizingradiation. IEEE Trans. on Nucl. Sci.,vol.NS-31, pp.1461-1466, N 6, 1984.
60. J.Matsuda, Direct extraction of SPICE level 3 parameters without using optimization, IEEE Proc. on Microelectr. Test Structures, vol. 6, pp.3-8, 1993.
61. Антимиров В.М. Управляющая вычислительная система для робототехнических комплексов, сб. Конверсия , Екатеринбург, НПОА, 1991г.
62. Петросянц К.О., Харитонов И.А., Адонин А.С, Беспалов А.В., Оценка радиационной стойкости типовых ячеек БМК и схем памяти, изготовленных по КНС/КНИ технологиям, Там же, с. 279 – 281,
63. Petrosjanc K.O., Kharitonov I.A., Adonin A.S., Characterization of SOI MOSFETs Under the radiation Conditions, Тезисы международной конференции, NATO Advanced Research Workshop «Perspectives, Science, and Technology for Novel Silicon on Insulator Devices», Oct. 1998, Kiev, Ukraine, pp. 54- 55.
64. Адонин А.С, Петросянц К.О., Харитонов И.А., Параметризация библиотечных элементов БИС БМК со структурой КНС, Труды LV научной сессии, посвященной Дню Радио «Радиотехника, электроника и связь на рубеже тысячелетия», М., 2000, с. 131-132.
65. Адонин А.С., Радиационная стойкость БИС КНС, Труды межведомственной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения эффективности и устойчивости функционирования сложных технических систем», Серпуховский военный институт ракетных войск, Серпухов, 2002, часть 4, с. 181-182.
66. Адонин А.С., Многоуровневое моделирование радиационно-стойких КМОП БИС со структурой «кремний на сапфире»., там же, с. 183-188.

67. First 10GBPS QUAD VCSEL Transceiver Optical Engine, Peregrine Semiconductor Corp., <http://www.peregrine-semi.com>.
68. Adonin A.S., Petrosjanc K.O., Poljakov I.V., Optoelectronic integrated circuit with built-in photo-voltaic supply, Труды международной конференции Second Conference on Photonics on Transportation, Proceedings of SPIE, v.4761, Sochy, Russia, Oct., 2001, pp. 170-175.
69. Adonin A.S., Ermakov O.N., New generation of high-efficiency optoelectronic devices and systems for transportation: infrastructure equipment, Тамже, pp. 13-19
70. Petrosjanc K.O., Adonin A.S., Poljakov I.V., Monolithic Optoelectronic Integrated Circuits with Built-in Photo-Voltaic Supply for Control and Monitoring, Труды международной конференции 5-th IEEE Intern. Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS'98), v.2, Sept. 1998, Lisboa, Portugal, pp. 529 – 531.
71. Адонин А.С., Беспалов А.В., Калашников О.А., Никифоров А.Ю., Чалых В.А., Особенности технологии КНС третьего поколения и оценка радиационной стойкости БИС., Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-98»», 1998, стр. 21-22.
72. Адонин А.С., Коровин А.П., Петросянц К.О., Харитонов И.А., Многоуровневое моделирование радиационно-стойких КМОП БИС со структурой «кремний на сапфире»., Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Микро - и наноэлектроника - 2001», Звенигород, окт. 2001, с.Р3-20.
73. Адонин А.С., Брагин Н.И., Титов М.Н., Михайлов Л.Н. и др., Способ изготовления КМОП КНС транзисторов, Авторское свидетельство №1295959 от 7.01.86 г.
74. Петросянц К.О., Муханов В.Е., Адонин А.С., Особенности моделирования двухкарманной технологии радиационно-стойких КМОП БИС КНС., Тезисы докладов IV Международной Научно-технической конференции «Электроника и информатика-2002», МИЭТ, ноябрь 2002, ч. 1, с.8.
75. US Patent 5.973.363. Oct 26.1999 CMOS Cizcuit with shortened p-channel length on ultrathin silicon on insulator.
76. <http://www.Peregrin-semi.com/tech/UTSiProc.htm>.
77. <http://www.dynexsemi.com/products/sos/>

78. <http://www.cc.dn.ru/GEC.htm>
79. <http://www.intersil.com/cda/home/>
80. <http://www.datasheetcatalog.com/intersil/1/>

Монография подготовлена в результате проведения исследования (№ проекта 15-01-0165) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) в 2015-2016 г.г. и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

Монография

Интегральные схемы со структурой КМОП «кремний на сапфире»

Адонин Алексей Сергеевич – главный научный сотрудник
ОАО «НПП «Пульсар»

Петросянц Константин Орестович – профессор НИУ ВШЭ