

Н.К. Трубочкина

ПЕРЕХОДНАЯ 3D НАНОСХЕМО-ТЕХНИКА – НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ И НОВОЕ КАЧЕСТВО В СОЗДАНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В статье предлагается концепция и новый подход к пониманию и освоению свойств трехмерных интегральных схем (3-d СБИС). В качестве минимального объекта для синтеза элементов логической 3-d наносхемотехники предлагается рассматривать не транзистор, а физический переход между материалами с различными свойствами (кремний n и p типа, углерод, окислы, металлы, полимеры и т.д.). Предлагается методология проведения научного эксперимента по созданию новой элементной базы 3-d СБИС. Разработан математический аппарат для синтеза математических моделей переходной схемотехники и их визуализации.

N.K. Trubochkina

3D JUNCTION CIRCUIT ENGINEERING AS A NEW CONCEPT AND NEW QUALITY IN CREATION OF THE THREE-DIMENSIONAL INTEGRATED CIRCUITS

The article offers a concept and an innovative approach to understanding and employment of the properties of 3D integrated circuits (3D chips). As the minimal unit for synthesizing elements of logical 3D nanoscale circuit engineering devices it is proposed to use not a transistor but a physical junction of materials with different properties (n- and p-type silicon, carbon, oxides, metals, polymers, etc.) A methodology of research experiments for creation of a new elemental base for 3D integrated circuits is proposed. A mathematical apparatus for synthesizing mathematical models for junction circuit engineering and visualizing the models is developed.

Введение

Закон Мура достигает своего предела [1]

Гордон Мур, сооснователь фирмы Интел, уже в 1965 году осознал, что емкость микросхем удваивается каждые полтора года (рис. 1). Этот «закон» сейчас подвергается сомнению из-за действия человеческого фактора. В то время как число транзисторов на кристалле ежегодно увеличивается на 50 процентов, производительность труда конструкторов микросхем увеличивается всего лишь на 20 процентов в год. Промышленность пыталась противодействовать этой тенденции, постепенно увеличивая размер конструкторских рабочих групп, которые сегодня состоят из 250-300 человек, но в таком составе они становятся трудно управляемыми.

Неограниченный рост степени интеграции невозможен, т.к. это противоречит второму Закону Мура, по которому уменьшение размеров структур влечет за собой увеличение стоимости производственного процесса. Эта проблема диктует необходимость поиска качественно нового решения для создания сверхбольших интегральных схем, в рамках которого законы Мура будут скорректированы.

Закон Мура действует в рамках планарной концепции создания интегральных схем. Но точно так

же, как города, когда не хватало площади, начинали расти вверх, интегральные схемы могут становиться трехмерными [2].

Кроме того, транзисторная схемотехника, которая была и есть основа элементной базы СБИС на протяжении всех последних лет, является избыточной, т.е. сам принцип построения макросистем, которыми являются СБИС – не оптимален.

Целями работы являются:

- поиск и решение задач развития в области создания новых интеллектуальных технических систем, их элементной базы, технологий и материалов для нее;
- преодоление проблем развития планарной транзисторной кремниевой микро- и наноэлектроники. Задачами являются:
- разработка качественно новой теории оптимальной схемотехники для 3D СБИС;
- разработка элементной базы;
- создание программного обеспечения для трехмерных сверхбольших интегральных схем (3D СБИС), основанных на новой концепции синтеза трехмерных интегральных схем (решение задач синтеза, анализа и компьютерной визуализации объектов и процессов в 3D интеллектуальных наноструктурах кремниевой наноэлектроники).



Рис. 1. График изменения числа транзисторов на кристалле (первый Закон Мура)

Особенности схемотехники современных СБИС

Основной тенденцией развития элементной базы компьютеров, приводящей к увеличению быстродействия и информационной плотности, является уменьшение геометрических размеров таких компонентов, как транзисторы (рис. 2). Большое число исследователей занято проблемами дальнейшего совершенствования элементной базы [4-10]. Несмотря на работы в области разработки функционально-интегрированных элементов (ФИЭ) [11,12,14,17,18], транзисторная схемотехника в СБИС остается доминирующей.

Это связано с технологическими сложностями формирования в объеме полупроводниковых структур, по сложности превышающих транзистор.

Информационные структуры размещаются в поверхностном слое полупроводника, в результате чего комбинационные схемы и схемы памяти, даже формируемые в активных слоях трехмерных интегральных схем (3D ИС), имеют информационную плотность ниже теоретически возможной. По мнению специалистов, сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) достигли предела минимизации, и дальнейшее увеличение плотности компоновки будет зависеть от использования вертикальной интеграции [2].

На рис. 2. представлены интегральные структуры и математические модели биполярного и МОП транзисторов в переходной схемотехнике. Из моделей видно, что компоненты (минимальные элементы синтеза схем) транзисторной схемотехники, по сути, являются схемами более подробной и точной переходной схемотехники.

В статье представлены многофункциональные материалы, основанные на переходной концепции построения 3D СБИС, предназначенные для разработки

новой, более качественной продукции наноиндустрии.

Чтобы промышленность и общество могли извлечь пользу из новых знаний посредством разработки более качественных продуктов и технологических процессов, необходима согласованность национальных исследовательских программ и инвестиций. Это должно гарантировать обеспечение научными командами и соответствующей инфраструктурой, нацеленными на достижение поставленных целей и решение задач.

Новое качество продукции получается тогда, когда появляются иная концепция представления объектов и новый подход к их созданию, формирующие дальнейшее изменение производственных процессов наноиндустрии.

Концепция и новизна

В проекте предлагается новая концепция и новый подход к пониманию и освоению свойств трехмерных интегральных схем (3D СБИС). В качестве минимального объекта для синтеза элементов логической 3D наносхемотехники предлагается рассматривать не транзистор, а физический переход между материалами с различными свойствами (кремний p и n типа, углерод, окислы, металлы, полимеры и т.д.).

Для данной схемотехники разработано программное обеспечение, позволяющее синтезировать новые 3D интегральные структуры, визуализировать их, как снаружи, так и внутри, что дает возможность при исследовании не только «облетать» трехмерную структуру, но и «совершать экскурсию» внутри интеллектуального кристалла и «гулять» там.

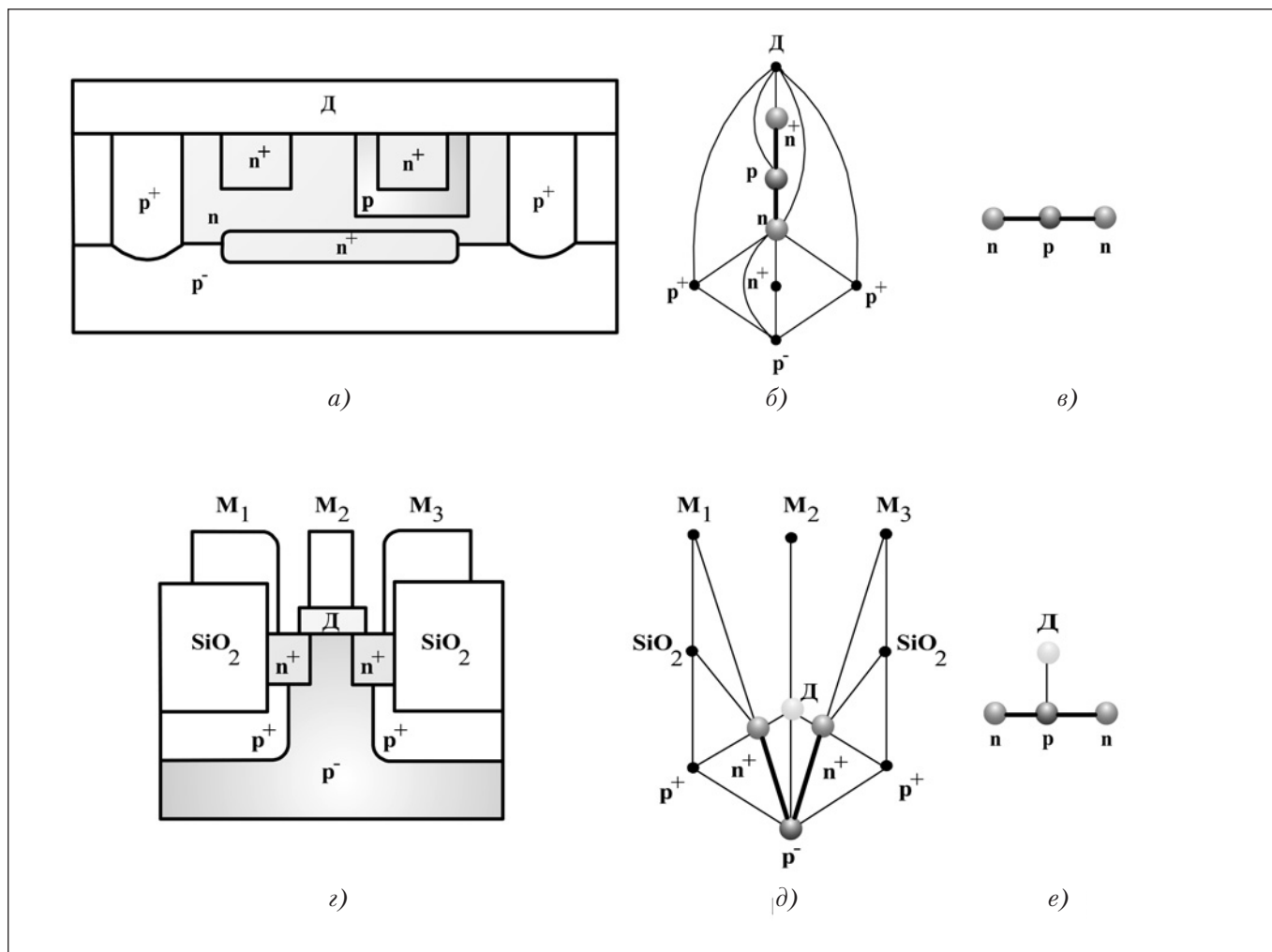


Рис. 2. Интегральные структуры и математические модели транзисторов в переходной схемотехнике: а) – интегральная структура биполярного транзистора; б) – полная переходная модель интегральной структуры биполярного транзистора; в) – упрощенная переходная модель интегральной структуры биполярного транзистора; г) – интегральная структура МОП транзистора; д) – полная переходная модель интегральной структуры МОП транзистора; е) – упрощенная переходная модель интегральной структуры МОП транзистора

Теория

Разработана [14-19] переходная схемотехника для 3D СБИС.

Компонент предлагаемой схемотехники – физический переход между материалами с различными свойствами.

Математические модели интеллектуальных элементов содержат минимальное количество переходов и физических областей с различными свойствами.

Многие математические модели 3D ИС, разработанные в переходной схемотехнике, «совпадают» по структуре с моделями органических молекул, имеющими те же логические функции. Это говорит о подобию кремниевой и углеродной схемотехник.

Для описания математических моделей, синтеза новых моделей и генерации 3D структур по математическим моделям используются функциональные графы.

В таблице 1 показано представление материала в переходной схемотехнике в виде математической модели структуры, структурной формулы, 2d и 3D моделей интегральных структур ($N=1$, N – размерность математической модели – число вершин графа модели – число различных областей).

В таблице 2 показано представление перехода, созданного внутри материала в переходной схемотехнике в виде математической модели структуры, структурной формулы, 2d и 3D моделей интегральных структур ($N=2$). Ребро графа со свойством А соответствует внутреннему переходу, физической границе между вложенными материалами.

В таблице 3 показано представление перехода, созданного на поверхности материала в переходной схемотехнике в виде математической модели структуры, структурной формулы, 2d и 3D моделей интегральных структур ($N=2$). Ребро графа со свойством

Таблица 1. **N=1 Область (материал)**



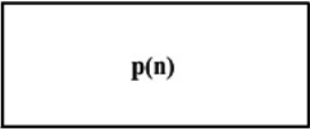
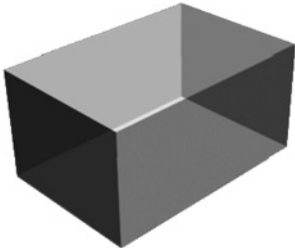


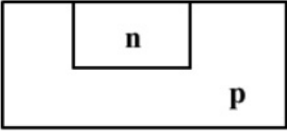

Математическая модель структуры	Структурная формула
 $p(n)$	 $p(n)$
2d модель структуры	3D модель структуры
 $p(n)$	

Таблица 2. **N=2 Переход, созданный внутри материала**

Математическая модель структуры	Структурная формула
 $p(n) \quad n(p)$	 $A(p,n)$ $A(n,p)$
2d модель структуры	3D модель структуры
 n p	

вом C соответствует поверхностному переходу, физической границе между соприкасающимися материалами.

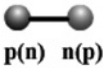

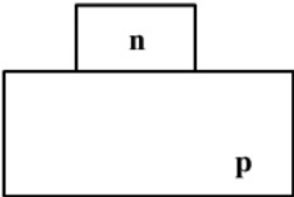
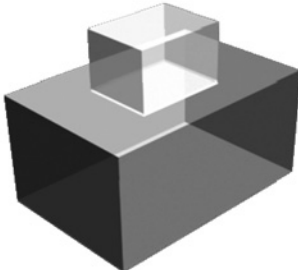
Математической моделью функционально-интегрированного элемента (ФИЭ) является неориентированный граф $G(X, A, \Gamma)$, где $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ – множество вершин, $A = (a_1, a_2, \dots, a_M)$ – множество ребер. Предикат Γ является трехместным предикатом и описывается логическим высказыванием $\Gamma(x_i, a_k, x_j)$, которое означает, что ребро a_k соединяет вершины x_i и x_j .

Элементу множества вершин x_i соответствует часть интегральной структуры T_i^{Fi} , в которой T_i определяет качественный состав части интегральной структуры, F_i – элемент функционального множест-

ва. $T = \{T_i\} (i=1, \dots, n) = (p, n, p+, n+, \dots, \text{SiO}_2, \text{Al}, \text{Ga}, \dots) = \Pi \cup \Delta \cup M$ – множество элементов типа частей структуры (p – полупроводниковая область p -типа, n – полупроводниковая область n -типа, SiO_2 – область двуокиси кремния, Al – область алюминия, Ga – область галлия и т.д.), Π – подмножество областей полупроводников, Δ – подмножество областей диэлектриков, M – подмножество проводников.

Функциональное множество $F = F_y \cup F_n$ состоит из двух подмножеств: $F_y = \{F_{yi}\} = (E_1, \dots, E_{k1}; I_1, \dots, I_{k2}; \Phi_1, \dots, \Phi_{k3}, \dots)$ подмножества управляющих воздействий в виде напряжения E_i , тока I_j , света Φ_k и $F_n = \{F_{ni}\} = (vx_1, \dots, vx_m, vy_1, \dots, vy_n)$ подмножества назначения, задающего входные и выходные функции областям из подмножества T , по отношению к которым опре-

Таблица 3. **N=2 Переход, созданный на поверхности материала**

Математическая модель структуры	Структурная формула
	
2d модель структуры	3D модель структуры
	

деляются передаточные характеристики элементов. N – число областей интегральной структуры, размерность элемента. Элементом множества ребер a_k , a_i соответствуют переходы между различными частями интегральной структуры, выполняющие определенные функции, причем существуют x_i , x_j ($x_i \neq x_j$) & $\Gamma(x_i, a_k, x_j)$ & $\Gamma(x_j, a_k, x_i)$.

Примерами переходов – компонентов переходной схемотехники – являются: $\Pi_i - \Pi_j$ переход – переход между полупроводниками, например, p-n переход; переход между полупроводниками p и n типа, выполняющий диодную функцию; $\Pi_i - D_j$ переход – переход между полупроводником и диэлектриком; $\Pi_i - M_j$ переход – переход между полупроводником и металлом (диод Шоттки); переходы между прозрачными и непрозрачными слоями в оптоэлектронных элементах; мембраны в биологических элементах и т.д.

Графовые модели интегральных элементов могут представлять собой деревья, а могут содержать и циклы.

Полупроводник – диод – транзистор – инжекционный инвертор – цепь открытий и изобретений, давших три последних поколения вычислительных машин – всего лишь начальные элементы таблицы оптимальных математических моделей элементов переходной (p-n) схемотехники.

В таблице 4 представлены обобщенные модели, структурные формулы и интегральные структуры функционально-интегрированных элементов ФИЭ (элементов переходной схемотехники размерностью $N \leq 6$).

На основе синтезируемых оптимальных математических моделей с помощью разработанных алгоритмов осуществляется генерация 3D наноструктур логических вентилей и элементов памяти [16].

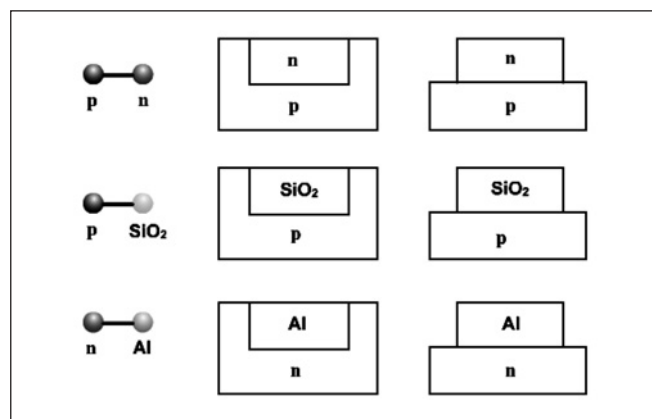





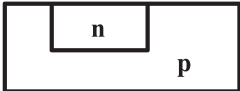
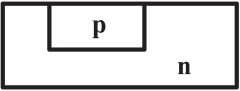
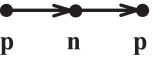

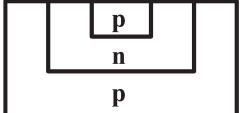

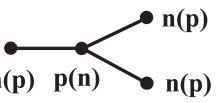


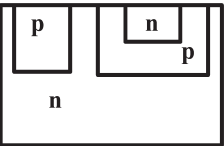
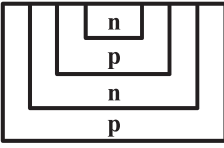
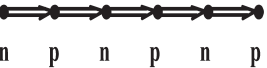
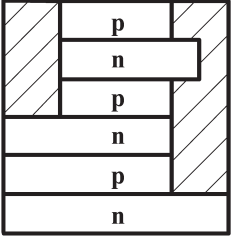
Рис. 3. Переходы между материалами - компоненты переходной схемотехники

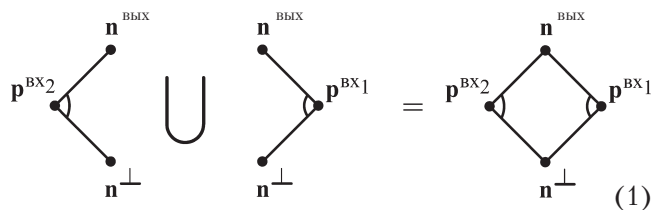
Пример проектирования схемы размерностью 4 в переходной (интегральной) схемотехнике ($N=4$) Синтез математической модели (операция объединения)

При объединении по выходам математических моделей двух p-n-p транзисторов, области, имеющие одинаковые потенциалы, объединяются в одну, и получается циклическая модель функционально-интегрированного элемента (ФИЭ) размерностью 4 (1) (НСТЛ без питания или «зависимое» ИЛИ (ИЛИ, реализуемое только при наличии нагрузки)).

При объединении вершин образуются паразитные транзисторы с базой в вершине объединения. Этот факт необходимо учитывать, как при синтезе интегральных структур, так и при их анализе на компьютере (при моделировании в транзисторной схемотехнике).

Таблица 4. Обобщенные модели, структурные формулы, структуры ФИЭ ($N \leq 6$)

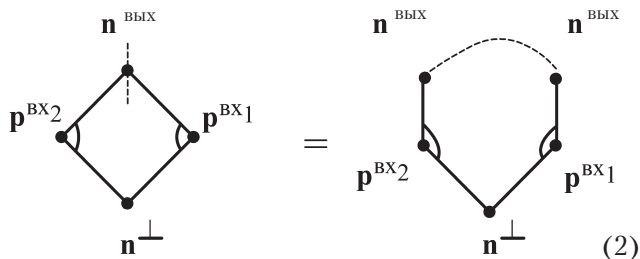
N	Обобщенная модель ФИЭ	Структурная формула ФИЭ	Структура ФИЭ	Элемент
1	$\bullet \text{ p(n)}$	$\bullet \text{ p(n)}$		Полупроводниковая область
2	$\text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)}$	 	 	Диод
3	$\text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)} \text{ --- } \text{p(n)}$	 	 	Транзистор: вертикальный горизонтальный
4	$\text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)} \text{ --- } \text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)}$ 	  и т.д.	 	Инжекционный инвертор: с торцевым инжектором с подложечным инжектором Многоэмиттерный транзистор, многоколлекторный транзистор
5	$\text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)} \text{ --- } \text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)} \text{ --- } \text{p(n)}$	Инвертор, усилитель, повторитель
6	$\text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)} \text{ --- } \text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)} \text{ --- } \text{p(n)} \text{ --- } \text{n(p)}$	 и т.д.		Комплементарный биполярный инвертор



Преобразование математической модели для конкретной технологии (операция разбиения)

Если математическая модель содержит циклы, в прямую ее нельзя реализовать в эпитаксиально-планарной технологии.

Подгоняя под конкретные технологии, в случае необходимости, циклы можно «разбивать» (принцип разбиения), разъединяя вершину цикла графа на нужное количество подобных вершин (2).



Необходимо только помнить, что они должны иметь одинаковый потенциал, т.е. общее соединение. «Разбиение» циклов моделей приводит к увеличению количества областей и соединений элементов.

Синтез интегральной структуры схемы

С учетом вышеописанных правил и принципов у одной математической модели может быть множество технологических реализаций, доступных или недоступных (не разработанных) в настоящее время (рис. 4).

При синтезе интегральной структуры необходимо помнить о двух важных вещах. Это:

1. Создание рабочих транзисторных структур. В нашем случае это:

$$n^{ВЫХ} - p^{ВХ1} - n^{\perp} \text{ и } n^{ВЫХ} - p^{ВХ2} - n^{\perp}$$

Транзисторный эффект достигается необходимыми концентрациями носителей в областях и соответствующей толщиной базовых областей $p^{ВХ1}$ и $p^{ВХ2}$;

2. Устранение влияния паразитных транзисторов. На рис. 4а это:

$$p^{ВХ1} - n^{\perp} - p^{ВХ2} \text{ и } p^{ВХ1} - n^{ВЫХ} - p^{ВХ2}$$

и их влияние можно устранить либо увеличивая расстояние между р-областями, либо разбивая циклы только на рабочие транзисторы, как это делается в

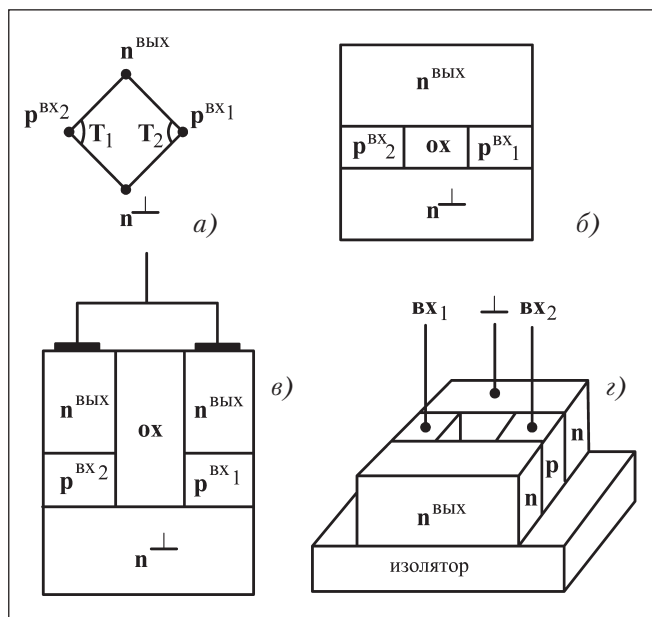


Рис. 4. Пример проектирования ФИЭ: а) схема в переходной схемотехнике – математическая модель (объединение двух n-p-n транзисторов по эмиттерам и коллекторам $n^{ВЫХ} = n_1^{ВЫХ} \cup n_2^{ВЫХ}$; б) вертикальная оптимальная интегральная структура; в) вертикальная структура с разбиением вершины $n^{ВЫХ}$; г) горизонтальная структура на изоляторе

транзисторной схемотехнике. Но уход в транзисторную схемотехнику приводит к увеличению подобных вершин математических моделей элементов, т.е. дополнительному количеству полупроводниковых областей и соединений, что делает этот элемент неоптимальным и непригодным для максимальной плотности упаковки интегральных структур наносхем.

Компьютерный анализ схем переходной схемотехники

Одной из важнейших проблем разработки новой элементной базы является создание программного обеспечения для моделирования параметров и характеристик элементов этой базы.

При переходе от транзисторной схемотехники к переходной необходима замена моделирующих и анализирующих программ. Нужны новые программы, с новыми физическими моделями, соответствующими создаваемой элементной базе, способные моделировать физические структуры, сложнее, чем транзистор.

В качестве примеров такого моделирования структур на рис. 6 представлено 3D моделирование биполярного а) и МОП б) транзисторов [18] (N=3 в p-n схемотехнике).

Необходимо дальнейшее развитие подобного программного обеспечения, моделирующего не только распределение носителей и температуру, но и передаточные и переходные характеристики для определе-

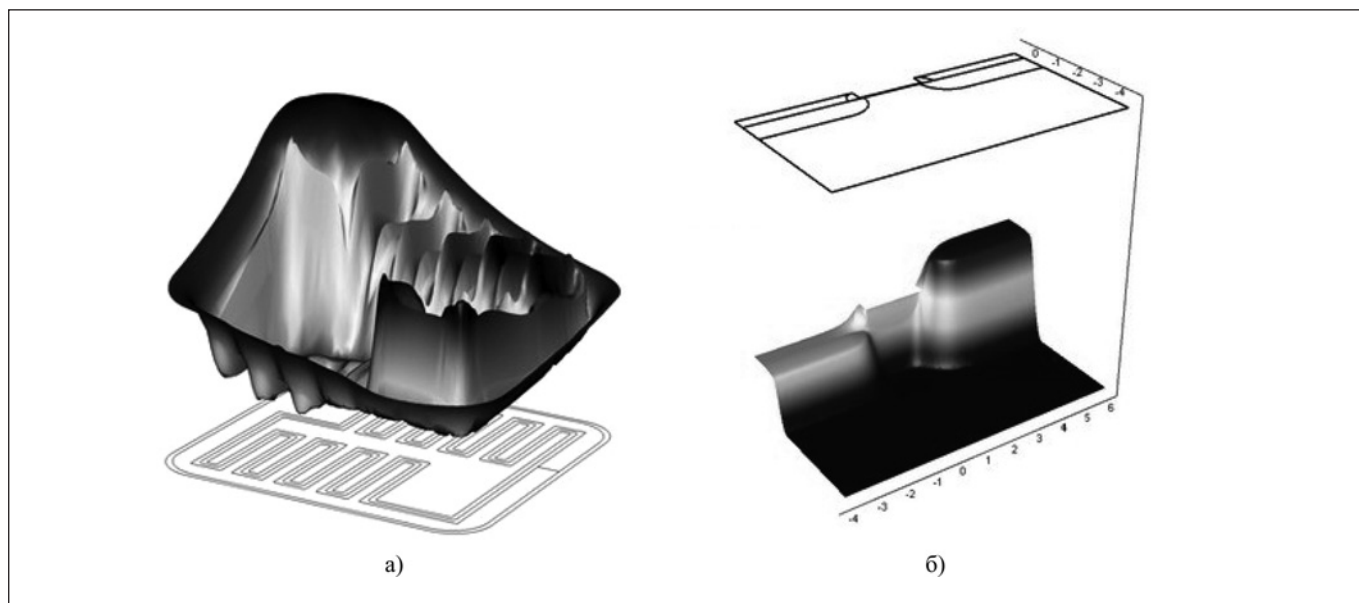


Рис. 6. 3D моделирование биполярного а) и МОП б) транзисторов

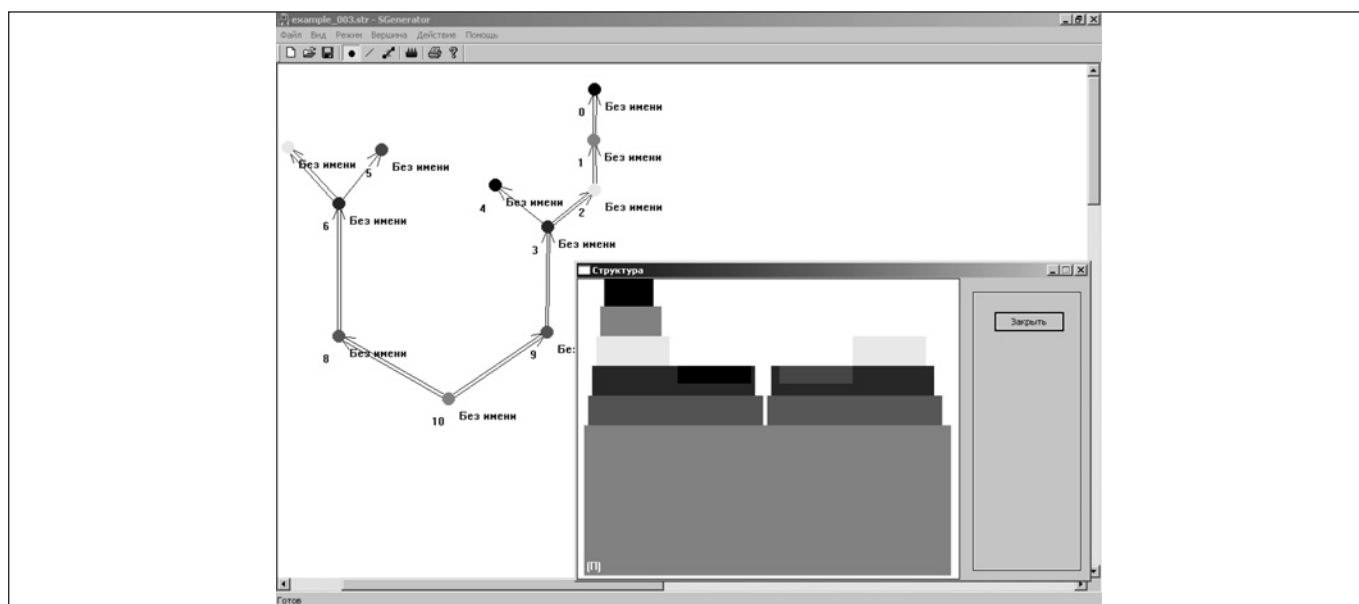


Рис. 7. Интерфейс программы SGenerator - программы генерация 2D интегральной структуры по математической модели функционально-интегрированного элемента (ФИЭ)

ния работоспособности логических и специальных элементов (например, сенсоров), а также элементов памяти переходной схемотехники на базе различных физических и химических процессов.

Разработанное программное обеспечение (ПО)

В соответствии с представляемой теорией разработаны три вычислительные программы:

- SGenerator – программа генерации 2D интегральной структуры по математической модели функционально-интегрированного элемента (ФИЭ) (рис. 7).

- Программа синтеза топологии и технологического процесса.
- Perspective – программа 3D динамической визуализации интегральной структуры.

Система математических структур и математических моделей логических элементов и элементов памяти переходной схемотехники

Ведутся работы по созданию Системы Оптимальных Математических Моделей и Структур интеллектуальных элементов различной степени сложности для 3D СБИС. Часть Системы создана. Формируется база данных 3D интеллектуальных наноструктур.

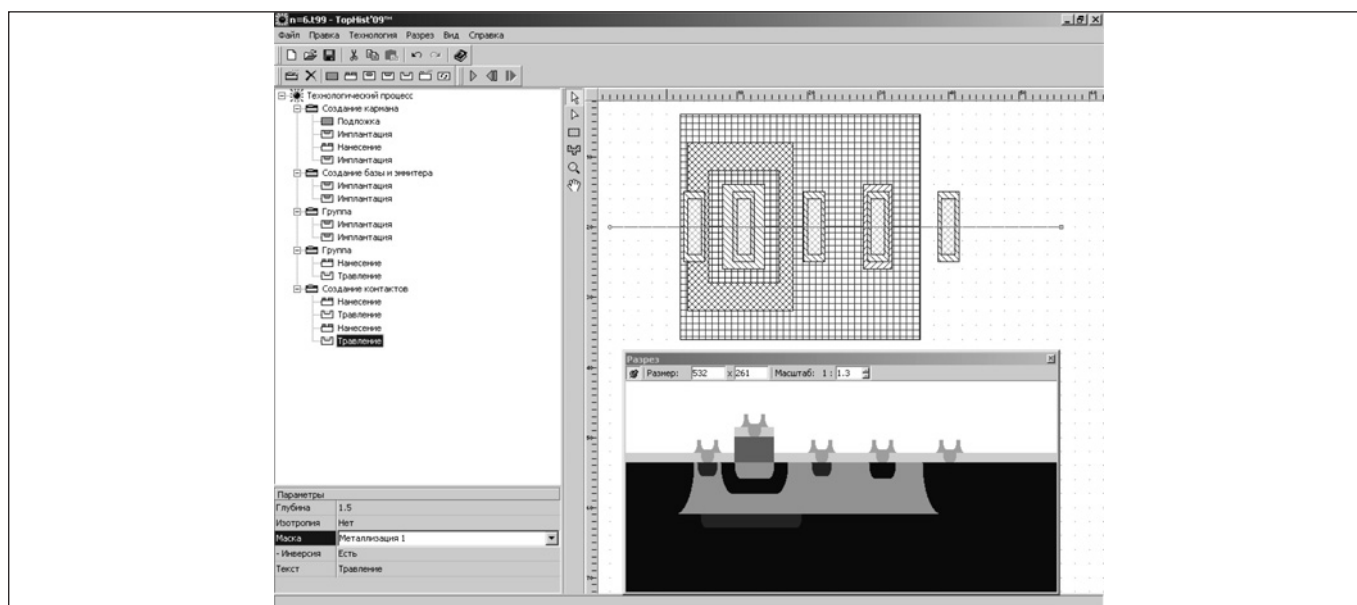


Рис. 8. Интерфейс программы синтеза топологии и технологического процесса

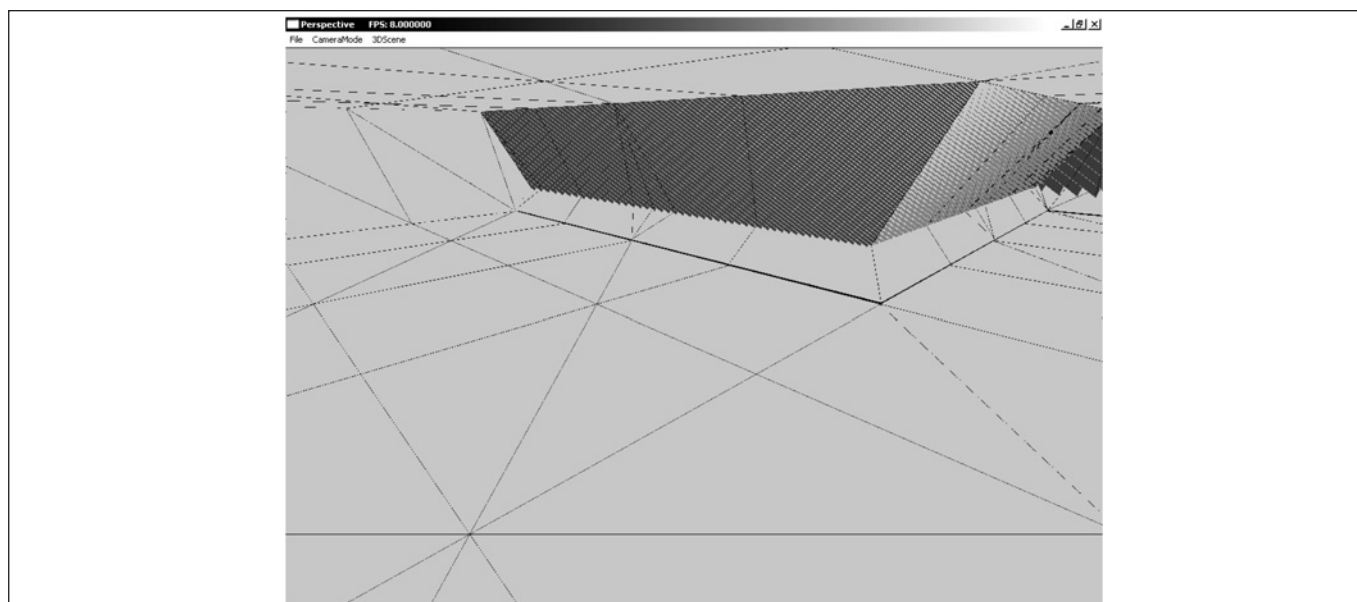


Рис. 9. Результаты работы программы 3D динамической визуализации интегральной структуры

Основное требование – структурная минимизация, т.е. реализация заданных функций 3D элемента минимальным количеством полупроводниковых областей и соединений.

По разработанной системе оптимальных математических моделей [19] для базы данных спроектированы 3D интегральные структуры, как логических элементов, так и элементов памяти размерностью от 3 до 13.

На рис. 10 представлена часть базы 3D структур МОП транзистора и логических переходных элементов И-НЕ.

Так, например, для сравнения: 3D структуры биполярного элемента И-НЕ, синтезированного в переходной схемотехнике:

- содержат всего 8 полупроводниковых областей, в отличие от его транзисторного аналога, содержащего 11 полупроводниковых областей;
- способны вертикально интегрироваться, что еще больше сокращает место, занимаемое на кристалле СБИС.

Сравнительный анализ транзисторной и переходной схемотехник

Были рассмотрены [19] результаты синтеза математических моделей элементов биполярной переходной схемотехники размерностью от 3 до 8.

Все рассмотренные элементы размерностью более трех: НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ, запоминающие и специ-

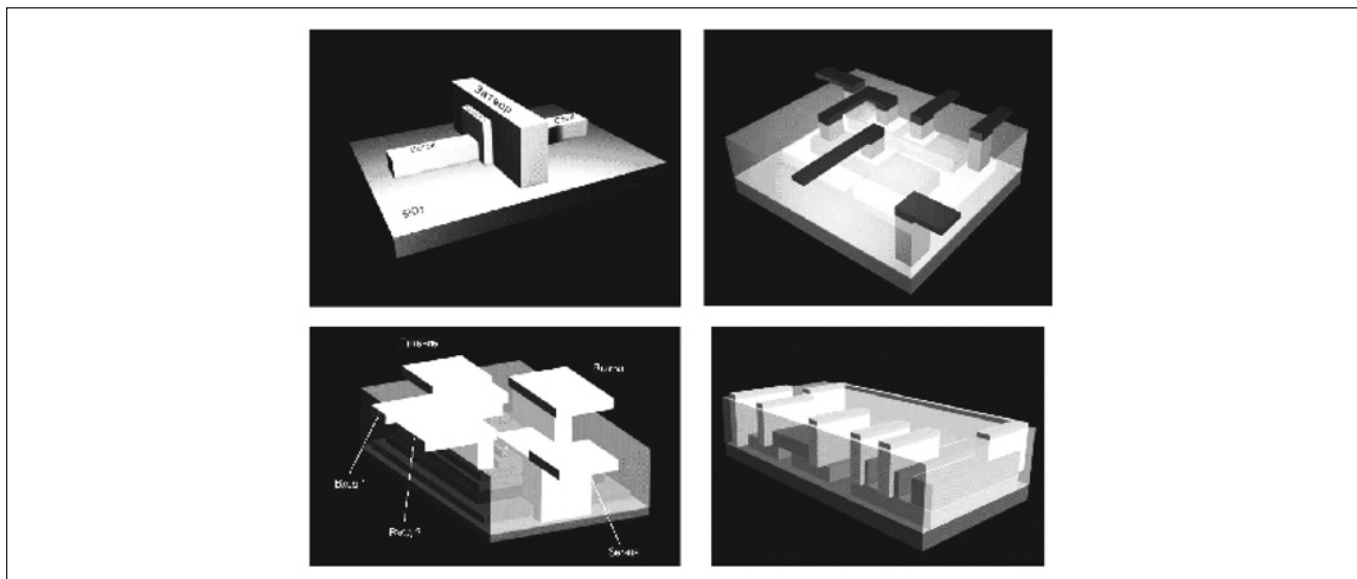


Рис. 10. Часть базы 3D структур МОП транзистора и логических переходных элементов И-НЕ

альные элементы – являются комплиментарными биполярными элементами, среди которых есть схемы, по мощности сравнимые с КМОП схемами.

Эти элементы содержат меньшее количество полупроводниковых областей, р-п переходов и соединений, чем у транзисторных аналогов, что доказывает избыточность транзисторной схемотехники.

Её лишние переходы и соединения, избыточная мощность и порождают проблемы биполярных СБИС, которые проигрывают по аппаратной реализации МОП и КМОП схемам.

Для сравнения схемотехник был проведен анализ элементов переходной и транзисторных схемотехник. Сравнивались элементы, выполняющие одну и ту же или одинаковую по сложности логическую функцию. Элемент И-НЕ переходной схемотехники содержит не только меньшее число р-п переходов, чем транзисторные аналоги, но и его математические модели в максимальной степени приспособлены для трехмерной реализации. Так, например, один комплиментарный биполярный элемент И-НЕ при использовании 7 полупроводниковых слоев различной проводимости на поверхности кристалла занимает площадь двух минимальных полупроводниковых областей (при двух логических входах).

Элементы различных схемотехник сравнивались по числу полупроводниковых областей, числу р-п переходов, числу внутренних (между компонентами) соединений. Также проводилось сравнение по мощности, быстродействию, запасам помехоустойчивости, информационной плотности. Результаты сравнения приведены в таблице 5.

По ряду показателей биполярная переходная схемотехника значительно превосходит биполярную

транзисторную схемотехнику, а по сумме показателей превосходит даже КМОП-транзисторную схемотехнику.

Проблемами переходной схемотехники, требующими решений, являются:

- 1) необходимость разработки новых технологий изготовления, связанных с созданием 3D полупроводниковых структур переходной схемотехники;
- 2) компьютерное моделирование физических структур элементов переходной схемотехники размерностью более 4.

Заключение

Определены цели и задачи, а также настоящее и возможное будущее наносхемотехники.

Продemonстрирован поиск новой концепции на уровне минимального компонента элементной базы.

Описан поиск оптимальной схемотехники. Рассмотрены: новая концепция проектирования вычислительных 3D наносистем – переход от транзисторной схемотехники к переходной и возможности технических систем, построенных на этой схемотехнике.

Разработана качественно новая теория синтеза элементов интеллектуальной 3D наносхемотехники. Основное требование – структурная минимизация, т.е. реализация заданных функций 3-d элемента минимальным количеством полупроводниковых областей и соединений.

Разработан математический аппарат для синтеза математических моделей переходной схемотехники и их визуализации.

Создается база данных 3D интеллектуальных наноструктур переходной схемотехники различной размерности.

Таблица 5. Сравнительный анализ схемотехнических базисов транзисторной и переходной схемотехник

Схемотехника Элемент	КМОП транзисторная схе- мотехника	Биполярная транзисторная схе- мотехника			Биполярная переход- ная схемотехника
		ТТЛ	И ² Л	ЭСЛ	
Логическая функция	И-НЕ	И-НЕ	И-НЕ	ИЛИ-НЕ	И-НЕ
Число полупроводниковых областей элемента	10	11	12	22(12)	8
Число р-п переходов эле- мента	9	10	11	21(11)	7
Число внутренних соеди- нений	5	3	4	15(4)	1
Потребляемая мощность ^{х)}	1	4	3	5	2
Быстродействие ^{х)}	5	3	4	1	2
Запасы помехоустойчиво- сти ^{х)}	1	2	5	4	3
Информационная плот- ность ^{х)}	3	4	2	5	1
Сумма мест	10	13	14	15	8
Общее место	2	3	4	5	1

– относительные значения параметров: 1 – наилучший, ... 5 – наихудший параметр.

Разработано программное обеспечение для разработки 3D структур переходных элементов

Описана структура проекта синтеза и моделирования 3D элементов кремниевой переходной схемотехники, их проблемы и возможности.

Даны рекомендации по разработке математического и компьютерного моделирования 3D элементов кремниевой переходной схемотехники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуленбург М. Нанотехнологии. Новинки завтрашнего дня: Европейская Комиссия, Генеральный директорат по научным исследованиям, 2006.
2. Акасака И. Тенденции развития трехмерных интегральных схем. ТИИЭР т. 74, №12. 1986. С.120.
3. Нанотехнологический портал ЕС www.cordis.lu/nanotechnology
4. Европейский Нанотехнологический Портал www.nanoforum.org
5. Нанотехнологические новости и дискуссии www.nano-invests.de
6. Спонсорство BMBF нанотехнологических исследований <http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>
7. Нанотехнологический портал VDI-TZ www.nanonet.de
8. BMBF-Programm IT-Forschung 2006 - Forderkonzept Nanoelektronik / Изд.: Федеральное министерство образования и исследований; Бонн, март 2002 г.
9. Бахманн Г. Инновации из нанокосмоса: Анализ & оценка технологий будущего (том 28)) Изд.:Технологический центр VDI для BMBF; 1998. Luther.
10. Рубан Х-Г. Нанопизика и нанотехнологии. /Издательство Тойбнер 2002.
11. Патент Японии № 51-32959, HOIL 27/04, 1976.
12. Патент США № 3913121, HOIL 27/02, 1976
13. Schols S., Heremans P. Two-dimensional ATLAS Device Simulation of an Organic Ambipolar Lightemitting Field-Effect Transistor. Simulation Standard -2008.
14. Трубочкина Н.К. Синтез на ЭВМ функционально-интегрированных элементов. Вопросы радиоэлектроники, сер. Технология производства и оборудование, вып.1, 1985, С. 20.
15. Трубочкина Н.К. Логические элементы статических БИС. - М.: МИЭМ, 1987.
16. Трубочкина Н.К. Машинное моделирование функционально-интегрированных элементов: Учебное пособие. - М.: МИЭМ, 1989.
17. Трубочкина Н.К., Мурашев В.Н., Петросян Ю.А., Алексеев А.Е. Функциональная интеграция. Концепция. // Электронная промышленность, 2000, № 4. С. 49-70.
18. Трубочкина Н.К., Мурашев В.Н., Петросян Ю.А., Алексеев А.Е. Функциональная интеграция элементов и устройств. // Электронная промышленность. 2000. № 4. С. 70-88.
19. Трубочкина Н.К. Схемотехника ЭВМ. - М.: МИЭМ, 2008. 256 с.

Трубочкина Надежда Константиновна,
д.т.н., профессор, Московский институт
электроники и математики (МИЭМ)
e-mail: nadin@miem.edu.ru