

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

# ТРУДЫ

XXV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 6-11 июля 2015 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,  
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва – 2015

УДК 669.  
ББК 22.38  
P15  
ISBN 978-5-89671-020-2

Труды XXV Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 6 – 11 июля 2015 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2015 г., 644с.

В рамках конференции проводилась XIX Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор),  
д.ф.-м.н. Кристя В.И.,  
д.т.н. Прасицкий В.В.,  
Горелова Е.Г.  
Мелкумян А.Б.  
Митрофанова Т.Е.

УДК 669.  
ББК 22.38

© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2015

ISBN 978-5-89671-020-2

© Труды XXV Международной  
конференции «Радиационная физика  
твёрдого тела»

## ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

**Понедельник, 6 июля****10.00-13.00****Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.**

1. Овчинников В.В. «О радиационно-динамическом воздействии ионизирующих излучений на конденсированные среды»	11
2. Дидык А.Ю., Вишневский Р., Вилчиньска-Китовска Т., Исакова Л.Д. «Синтез микрочастиц в водороде при давлении 3,5 кбар с оловянным стержнем под действием тормозных $\gamma$ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ»	21
3. Андриевский Р.А. «Поверхности раздела в наноматериалах как эффективные стоки для радиационных дефектов»	38
4. Ивченко В.А. «Атомное строение каскадов атомных смещений в металлических материалах после радиационных воздействий»	40
5. Якушин В.Л., Джумаев П.С., Емельянова О.В., Калинин Б.А., Польский В.И. «Модифицирование микроструктуры и поверхностное упрочнение 12 %-ных хромистых сталей при обработке потоками импульсной газовой плазмы»	49
6. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Дубинина М.И., Крестя В.И., Фишер М.Р. «Моделирование ионизации рабочего газа в слаботочном газовом разряде в смеси аргон-ртуть»	60

**13.00-14.00 Перерыв.****14.00-17.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Богачев И.А., Калинин Б.А., Лебедева Л.Ю., Олевский Е.А., Стальцов М.С., Чернов И.И. «Свойства реакторной ферритно-мартенситной стали, полученной при оптимизированных режимах спарк-плазменного спекания»	65
2. Печенкин К. В., Ганченкова М. Г. «О растворимости водорода в никеле: расчет из первых принципов»	74

3. Якушин В.Л., Джумаев П.С., Малиева Е.М. «Влияние импульсной плазменной обработки на трибологические характеристики 12%-ных хромистых сталей ЭП823 и ЭК181»	80
4. Дидык А.Ю., Ерискин А.А., Бондаренко Г.Г., Кобзев А.П., Никулин В.Я., Силин П.В., Белоус В., Васяк Я., Хаевска Е. «Распределение дейтерия и водорода в Zr, Ni и Ti сборках фольг при воздействии импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы»	90
5. Боровицкая И.В., Люблинский И.Е., Бондаренко Г.Г., Парамонова В.В., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Ляховицкий М.М., Жарков М.Ю. «Особенности коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в жидком литии высокой чистоты»	105
6. Ризаханов Р.Н., Бармин А.А., Иванов А.В., Ивлиева В.В., Рудштейн Р.И. «Слоистый композиционный материал на основе оксида алюминия и хрома для применения в термонапряженных узлах ракетно-космической техники»	115
7. Морозов Е.В., Масляев С.А., Демин А.С., Ромахин П.А., Пименов В.Н., Грибков В.А. «Осаждение металлов и повреждаемость вольфрамовой мишени потоками ионов и плазмы в установках «Плазменный фокус»	126

**Вторник, 7 июля****9.00-13.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”**

1. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Косогоров А.В. «Структурные изменения поверхности стекла при электронном облучении»	137
2. Попов В.П., Гутаковский А.К., Сафронов Л.Н., Антонов В.А., Подлесный С.Н., Куприянов И.Н., Пальянов Ю.Н., Калинин А.А., Рубанов С. «Формирование NV-центров и наноструктур в облученном ионами алмазе»	147
3. Тыщенко И.Е., Попов В.П. «Радиационно-стойкие структуры кремний-на-изоляторе с ионно-модифицированным встроенным диэлектриком»	160
4. Сергеев А.П., Сергеев П.Б. «Кинетика и механизмы наработки дефектов в чистых кварцевых стеклах при электронном облучении»	171
5. Загорский Д.Л., Фролов К.В., Коротков В.В., Бедин С.А.,	182

Кругликов С.С., Перунов И.В. «Исследование многокомпонентных металлических нанопроволок, полученных методом матричного синтеза на основе трековых мембран»	
6. Пискарев М.С., Гильман А.Б., Ионов А.М., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А. «Влияние модифицирования в разряде постоянного тока на адгезионные свойства и структуру поверхности пленок полиэфирсульфона»	189
7. Урбанович А.И., Жвавый С.П. «Моделирование фазовых переходов, инициируемых в CdTe импульсным излучением лазера»	197
8. Корнеев А.В., Ревазов В.О., Селезнев В.П. «Исследование оптических свойств лейкосапфира при воздействии ионизирующих излучений»	206
9. Крючков С.В., Кухарь Е.И. «Абсолютная отрицательная проводимость сверхрешетки в поле электромагнитного излучения»	213
10. Королев А.А., Иванов А.В., Козлов С.А., Штумпф С.А. «Влияние плазмы на генерацию кратных гармоник при взаимодействии нескольких интенсивных предельно коротких световых импульсов в прозрачной диэлектрической среде»	219

**13.00-14.00 Перерыв.****14.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Ластовский С.Б., Маркевич В.П., Коршунов Ф.П., Якушевич А.С., Мурин Л.И., Макаренко Л.Ф. «Радиационно-индуцированные бистабильные центры с глубокими уровнями в кремнии <i>p</i> -типа»	226
2. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Christen J., Степович М.А., Туртин Д.В. «Оценка электрофизических параметров полупроводников по результатам измерений катодолюминесценции экситонов»	235
3. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. «Модификация МДП-структур сильнополевой инжекцией электронов и электронным облучением»	242
4. Матюхин П.В., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И., Черкашина Н.И. «Взаимодействие высокоэнергетических полей гамма-излучения с металлокомпозиционным материалом на	253

основе алюмосодержащей матрицы»	
5. Новоселова Е.Г., Смирнов И.С., Терентьев А.В., Шупегин М.Л. «Влияние условий формирования на кластерную структуру нанокompозитных пленок на основе ПФМС»	258
6. Yusupov Lochin. «Growth of TiO <sub>2</sub> nanorods on transparent substrates for solar energy harvesting devices»	264

**Среда, 8 июля****9.00-13.00 Секция “Радиационная физика металлов”**

1. Дрожжина М.В., Калинин Б.А., Николаева И.Д., Стальцов М.С., Чернов И.И., Бажал С.В., Глотов А.И., Романов В.А., Лагов П.Б. «Использование ускорителя ЭПП-15 для имитационных исследований радиационной повреждаемости реакторных материалов»	269
2. Рогожкин С.В., Корчуганова О.А., Алеев А.А. «Кинетика распада твердого раствора сплава Fe-22%Cr при термическом старении»	276
3. Портных И.А., Панченко В.Л. «Микроструктура стали ЭК-164 после нейтронного облучения при температурах от 440 до 600°C до повреждающих доз 36...94 сна»	285
4. Панченко В.Л., Пастухов В.И. «Аномальное локальное порообразование, наблюдаемое в 12% хромистых сталях после нейтронного облучения при температуре 1200...1300°C»	299
5. Ельникова Л.В., Фунтиков Ю.В. «Анализ дефектной структуры галфенолов методом позитронной аннигиляционной спектроскопии»	305
6. Валько Н.Г. «Влияние режимов электролиза и облучения на элементный состав и морфологию поверхности покрытий Co-Ni-Fe»	314
7. Черенда Н.Н., Ласковнев А.П., Басалай А.В., Шиманский В.И., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Формирование биосовместимых поверхностных слоев в сплаве Ti-6Al-4V с помощью компрессионных плазменных потоков»	318
8. Голубев О.Л., Блащенко Н.М. «Изменения изотопного состава ионного тока полевого испарения вольфрама при высоких температурах эмиттера»	327
9. Молодцов В. Л., Печенкин В. А., Аверин Л. В. «Метод расчета характеристик повреждающей дозы в металлах при	332

ускорительном облучении»	
--------------------------	--

**13.00-14.00 Перерыв.****14.00-17.00 Секция «Физические основы радиационной технологии» (заседание школы молодых учёных)**

1. Жарков М.Ю., Люблинский И.Е., Вертков А.В. «Реализация концепции замкнутой циркуляции лития внутрикамерными элементами токамака Т-11М на основе литиевых капиллярно-пористых систем»	338
2. Ризаханов Р.Н., Бармин А.А., Иванов А.В., Ивлиева В.В., Лаптев И.Н., Рудштейн Р.И. «Получение и испытание керамического композита на основе нитрида бора с повышенной стойкостью к ионной бомбардировке для применения в составе холловского двигателя»	345
3. Колодяжный А.Ю., Шешин Е.П. «Катодоллюминесцентный источник света на основе катодно-модуляторного узла с отклоняющими электродами»	358
4. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И. «Исследование изменения структуры полимерных композитов после воздействия вакуумного ультрафиолета методом ИК-спектроскопии»	367
5. Романов А.В., Степович М.А. «Модели спектров вторичной флуоресценции конденсированного вещества в спектрометрах с дисперсией по длинам волн»	371
6. Бондаренко Г.Г., Ли И.П., Гайдар А.И., Леденцова Н.Е. «Исследование изменения структурных характеристик конгломератов порошков карбонильного Ni при различных режимах их термообработки»	379

**Четверг, 9 июля****9.00-13.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»**

1. Суржиков А.П., Власов В.А., Лысенко Е.Н., Малышев А.В., Николаев Е.В. «Твердофазное образование литий-титановых ферритов в условиях нагрева электронными пучками импульсного и непрерывного действия»	387
2. Павлов Ю.С., Лагов П.Б. «Физико-технические основы и примеры применения радиационных методов обработки твердотельных электронных приборов»	398

3. Ревина А.А., Павлов Ю.С. «Роль радиационной химии в современной нанотехнологии»	406
4. Петросянц К.О., Кожухов М.В. «Приборно-технологическое моделирование характеристик SiGe ГБТ при воздействии протонов»	415
5. Петросянц К.О., Попов Д.А. «Приборно-технологическое моделирование 45nm high-k МОПТ с учетом воздействия гамма-излучения»	424
6. Ивашутенко А.С., Франгульян Т.С., Гынгазов С.А. «Спекание циркониевой керамики с использованием микроволнового и искрового методов нагревов»	432
7. Валько Н.Г., Война В.В., Лукашик О.А., Петрученя Е. Ю. «Электролитическое осаждение Zn-Co покрытий в поле рентгеновского излучения»	438
8. Кузнецов П.М., Федоров В.А. «Анализ колебаний эрозионного факела, возникающего в результате лазерного воздействия на металлическую поверхность»	442

**13.00-14.00 Перерыв.****14.00-17.00 Секция «Радиационная физика неметаллических материалов»**

1. Загорский Д.Л., Коротков В.В., Бедин С.А., Парфёнов Д.А., Артёмов В.В. «Стабильность нанопроволок, синтезированных на основе трековых мембран»	446
2. Курбанов А.М., Нуритдинов И. «Автолокализация электронных возбуждений и образование центров окраски в кристаллах $Gd_3Sc_2Al_3O_{12}$ »	454
3. Охрименко О.Б. «Особенности атермического взаимодействия СВЧ излучения со структурами оксид/полупроводник»	462
4. Yavidov B.Ya. «Polaronic system with disordered density-displacement type electron-phonon interaction»	470
5. Федоров И.А., Лобанов С.В., Шешин Е.П. «Исследование термо- и автоэмиссионных свойств наноструктурированного материала на основе интеркалированного пирографита»	478
6. Буртелов В.А., Шешин Е.П. «Формирование эмиссионных центров на поверхности ТРГ фольги искровым разрядом через диэлектрическую маску»	487

**Пятница, 10 июля**



**9.00-13.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»**

1. Дидык А.Ю., Боровицкая И.В., Куликаускас В.С., Бондаренко Г.Г., Ерискин А.А., Никулин В.Я., Силин П.В., Белоус В., Васяк Я., Хаевска Е. «Исследование распределения дейтерия и водорода в сборках Ta CD <sub>2</sub>  Ta, Ta Ta CD <sub>2</sub>  Ta Ta и Nb CD <sub>2</sub>  Nb, после воздействия высокотемпературной плазмы аргона на установке ПФ-4»	497
2. Онанко А.П., Онанко Ю.А. «Влияние изменения дефектной наноструктуры на указательную поверхность упругих свойств и автоматизированная система визуализации анизотропии после облучения»	509
3. Кабышев А.В., Конусов Ф.В. «Ионно-термическая модификация оксида алюминия»	520
4. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Савичкин Д.О. «Расчет коэффициента распыления катода в слаботоочном газовом разряде в смеси «аргон-ртуть»	531
5. Тимошенко С.П., Графутин В.И., Евстафьев С.С., Прокопьев Е.П., Бритков О.М., Хмелевский Р.О. «Аннигиляционный контроль производства и качества материалов на основе металлов и кремния методами ДУАЛ (DWAL), ВРАФ (TDAP) и УРАФ (ADAP)»	536
6. Дьячкова И.Г., Новоселова Е.Г., Смирнов И.С. «Влияние температуры на формирование нарушенных слоев в кремнии при протонном облучении»	539
7. Галанина Л.И., Новиков Л.С. «Оценка вероятности одиночных радиационных сбоев в результате ядерного взаимодействия первичных частиц с материалами микросхем»	550
8. Амрастанов А.Н., Степович М.А., Гинзгеймер С.А. «Оценка теплового воздействия электронного пучка на однородный полупроводниковый материал. Результаты математического моделирования»	557

**13.00-14.00 Перерыв.****14.00-17.00 Секция «Радиационная физика металлов»**

1. Чернова А. Д., Печенкин В. А., Конобеев Ю. В. «Расчет температур и напряжений в образце при облучении в ВЭМ»	564
2. Демина Е.В, Воронин А.В., Гусев В.К., Новохацкий А.Н.,	569

Прусакова М.Д., Морозов Е.В., Бер Б.Я., Борматов А.А., Сотников Г.Ю. «Структурные изменения в поверхностном слое вольфрама, подвергнутого воздействию большого числа импульсов гелиевой плазмы»	
3. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Никуличева Т.Б., Мишунин М.В. «Структура зоны аккомодации механического двойника в технически чистом титане»	576
4. Selyshchev P. A., Akintunde S. O. « Influence of irradiation on formation of compound layer as result of chemical reaction and diffusion»	579
5. Чирская Н.П., Воронина Е.Н., Новиков Л.С. «Математическое моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с микроструктурами космических аппаратов»	590
6. Аленина М.В., Колотов В.П. «Активационные свойства рекомендуемых материалов для защитного блока бланкета строящегося термоядерного реактора и их соответствие критериям малоактивируемых конструкционных материалов»	600

**Суббота, 11 июля****9.00**

1. Куленников Э.Л., Красильников В.В. «О перспективе создания центра ядерной медицины»	605
2. Оксенгендлер Б.Л., Ашуров Х.Б., Максимов С.Е., Тураев Н.Ю. «Фрактальная концепция в радиационной физике твёрдого тела»	617
3. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И., Ястребинская А.В. «Моделирование процессов взаимодействия высокоэнергетических излучений с радиационно-защитными композиционными материалами»	627
4. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Масловский В.М., Столяров А.А., Тихонов А.Н., Ахмелкин Д.М. «Сильнополевая и плазменная модификация структур метал-диэлектрик-полупроводник»	632
<b>Обсуждение докладов</b>	
<b>Общая дискуссия</b>	
<b>Заккрытие конференции</b>	

СИЛЬНОПОЛЕВАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУР  
«МЕТАЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК»

Андреев В.В.<sup>1</sup>, Бондаренко Г.Г.<sup>2</sup>, Масловский В.М.<sup>3</sup>, Столяров А.А.<sup>1</sup>,  
Тихонов А.Н.<sup>2</sup>, Ахмелкин Д.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал (248600, Калуга,  
ул. Баженова, 2. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа  
экономики» (Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20.

E-mail: [gbondarenko@hse.ru](mailto:gbondarenko@hse.ru)

<sup>3</sup> ФГУП НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина (124460,  
Зеленоград, 1-й Западный проезд, дом 4. E-mail: acdmaslovsky@mail.ru)

Перспективным направлением решения задачи создания полупроводниковых приборов, параметры которых можно изменять после их изготовления, является разработка диэлектрических пленок, способных изменять в широком диапазоне свое зарядовое состояние и сохранять его длительное время в процессе эксплуатации, а также разработка новых методов модификации характеристик МДП-структур [1,2]. Значительное количество исследований в настоящее время посвящено проблеме улучшения характеристик МДП-структур путем проведения специальных обработок, к которым относятся плазменная, радиационная, термическая и т.д. [1-7]. В связи с разработкой в последнее время новых методов плазменной обработки, одним из которых является плазмоструйная (ПСО), стало возможным получение новых эффектов, дающих возможность изменять свойства полупроводниковых структур [8]. Особый интерес представляют методы модификации полупроводниковых приборов с МДП-структурой, основанные на сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик, позволяющие проводить индивидуальную коррекцию параметров каждого прибора [9,10].

В данной работе проведено исследование процессов изменения зарядового состояния МДП-структур в результате сильнополевой инжекционной обработки и последующего отжига, а также плазменной обработки полупроводниковых кристаллов. Найдены режимы обработки, позволяющие улучшить характеристики подзатворного диэлектрика МДП-структур.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термического диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), а также МДП-структуры с пленкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слоем фосфорно-силикатного стекла (ФСС), изготовленные на кремнии n-типа. Двоокись кремния толщиной  $10 \div 50$  нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температурах  $850 \div 1000$  °С с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси  $\text{POCl}_3\text{-O}_2$  при температуре 900 °С. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС, варьировалось время загонки фосфора в пределах от 2 до 6 минут. В качестве затвора использовались плёнки поликремния ( $\text{Si}^*$ ), легированные фосфором до 20 Ом/ и пленки алюминия площадью  $10^{-4} \div 10^{-2}$  см<sup>2</sup>.

Для инжекционной модификации электрофизических характеристик МДП-структур использовалась сильнополевая туннельная инжекция электронов из кремниевой подложки [9,10] в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 до 10 мкА/см<sup>2</sup>. В процессе инжекции осуществлялся контроль напряжения на МДП-структуре, что позволило получить информацию об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки непосредственно в процессе модификации. Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике отрицательного заряда, после инжекционных воздействий МДП-структуры подвергались отжигу при температуре 200°С в течение времени от 10 с до 30 мин.

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с использованием высокочастотного C-V метода и метода многоуровневой токовой нагрузки [11]. В течение сильнополевой инжекции, в режиме протекания постоянного тока измерялось приращение напряжения на МДП-структуре  $\Delta V_I$ , характеризующее изменение зарядового состояния исследуемого образца [10,11].

ВЧ плазменная обработка проводилась в стандартных промышленных установках с реакторами объемного и диодного типа на частоте 13,6 МГц в кислородной плазме. В данной работе использовалась также новая технология обработки поверхности полупроводниковых пластин электродуговой плазменной струей (ЭДПС) [8], использующая поток Ag-плазмы, который формируется многоструйным генератором электрической дуги при атмосферном давлении. При обработке ЭДПС используется гидродинамически непрерывная высокоэнтальпийная

( $10^4$  Дж/град), низкотемпературная ( $2 \cdot 10^4$  К) плазменная струя. Транспорт заряженных и нейтральных возбужденных частиц к поверхности осуществляется путем диффузии через тонкий приграничный слой плазмы. Таким образом, чрезвычайно высокая плотность потока (порядка  $10^{20}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ ) активных частиц с кинетической энергией  $< 0,1$  эВ взаимодействует с поверхностью. При этом плотность потока энергии также весьма высока (порядка  $10^3$  Вт/см $^2$ ). При этом поток квантов в диапазоне ближнего ультрафиолета (УФ)  $> 10^{17}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ . Изменение температуры поверхности во время обработки контролировалось скоростью пересечения пластины плазменной струей и обычно не превышало 200 К.

В ранее проведенных исследованиях [4,9,10] было показано, что отрицательный заряд, накапливающийся в плёнке фосфорно-силикатного стекла (ФСС) в МДП-структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO $_2$ -ФСС в процессе туннельной инжекции электронов в сильных электрических полях, может использоваться для коррекции порогового напряжения МДП-приборов с такой структурой. При этом для получения приборов с высокой термополевой стабильностью после сильнополевой инжекционной модификации зарядового состояния их необходимо отжигать при температуре около 200 °С [10].

Важным условием сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур с пленкой SiO $_2$ -ФСС является минимизация других механизмов изменения зарядового состояния диэлектрической пленки, помимо накопления отрицательного заряда в ФСС, что достигается совершенствованием технологии формирования многослойного диэлектрика и подбором режимов инжекции. При инжекции электронов из кремния с увеличением концентрации фосфора и ростом толщины слоя ФСС увеличивается диапазон возможных изменений порогового напряжения МДП-транзисторов. Однако для обеспечения приемлемых значений плотности поверхностных состояний величина инжектированного заряда при корректировке порогового напряжения не должна превышать 0,3 мКл/см $^2$ . Диапазон токового воздействия при изменении зарядового состояния МДП-приборов целесообразно ограничить в диапазоне  $10^{-7} \div 10^{-5}$  А/см $^2$ . Уменьшение амплитуды токового воздействия сопровождается трудностями технической реализации и нецелесообразно в связи со значительным возрастанием времени инжекции требуемой величины заряда. Увеличение плотности инжекционного тока приводит к значительному возрастанию вероятности пробоя образца, а также к повышению плотности поверхностных состояний и

генерации положительного заряда в  $\text{SiO}_2$  [1-3,9] при инжекции электронов из Si.

Другим направлением применения сильнополевой туннельной инжекции для модификации диэлектрических пленок МДП-структур является проведение инжекционно-термической обработки (ИТО), позволяющей повышать надежность МДП-приборов и выявлять образцы, содержащие зарядовые дефекты. Инжекционно-термическая обработка МДП-структур заключается в сильнополевой инжекции в диэлектрик заданной плотности заряда электронов и последующем высокотемпературном ( $200^\circ\text{C}$ ) отжиге образцов. ИТО может заменять радиационные обработки МДП-приборов.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения МДП-структур по величине заряда, инжектированного до пробоя образца для необработанных МДП-структур (1), после инжекционной обработки (2) и после инжекционной обработки и последующего отжига (3). Как видно из рис. 1, инжекционная обработка позволяет исключить структуры с грубыми зарядовыми дефектами (плотность заряда, инжектированного до пробоя, менее  $0.1 \text{ мКл/см}^2$ ), и, тем самым, значительно повысить надежность приборов и интегральных микросхем. Однако при такой обработке без отжига происходит незначительное снижение инжекционного ресурса структур и приборов на их основе (гистограмма 2, рис.1). Снижение ресурса объясняется зарядовой деградацией как самой диэлектрической пленки, так и границы раздела кремний-двуокись кремния, протекающей при инжекции заряда [4, 5]. Для устранения деградационных процессов мы проводили отжиг образца после обработки при температуре  $200^\circ\text{C}$  в течении 1 часа. Как видно из рис. 1, гистограммы 3, после проведения отжига наблюдается восстановление инжекционного ресурса. Инжекционно-термическая обработка позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции и при этом практически не снижается инжекционный ресурс образцов. Благодаря применению инжекционно-термической обработки, может происходить достаточно заметное повышение инжекционной и радиационной стойкости МДП-структур.

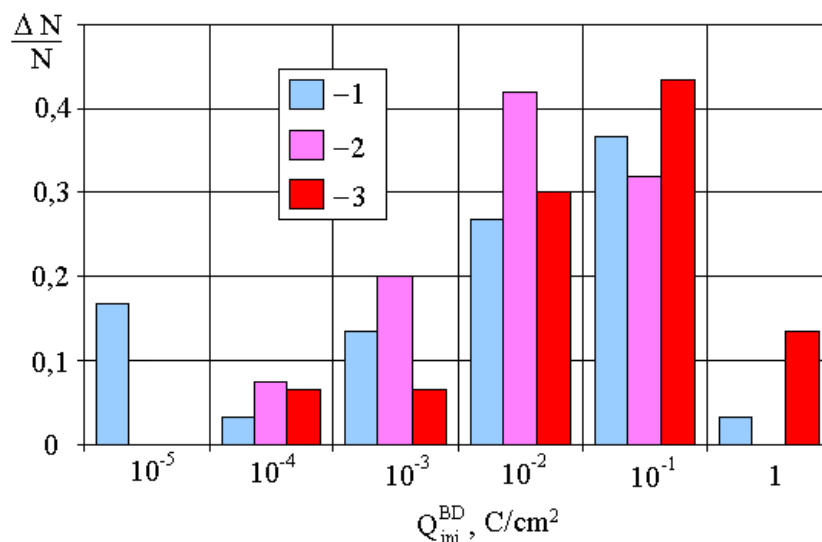


Рис. 1. Относительные гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до пробоя образца: 1 – образцы без обработки; 2 – после инжекционной обработки; 3 – после инжекционно-термической обработки.

Найдено, что при определенных режимах плазменные обработки могут значительно снижать плотность и скорость генерации новых электронных ловушек в двуокиси кремния, возникающих при сильно-полевой инжекции заряда электронов. Это позволяет значительно повысить зарядовую стабильность структуры и увеличить такой важный параметр, как величина заряда, инжектированного в диэлектрик до пробоя образца [8-10]. На рис. 2 представлены гистограммы зарядовой стабильности, характеризующие распределение по пластине МДП-структур в зависимости от величины заряда, инжектированного в диэлектрик до их пробоя для необработанных (1) и обработанных (2) в плазме пластин с исследуемыми образцами. Как видно из рис. 2, после плазменной обработки максимальная величина заряда, инжектируемая до пробоя образца, может увеличиваться более чем на порядок.

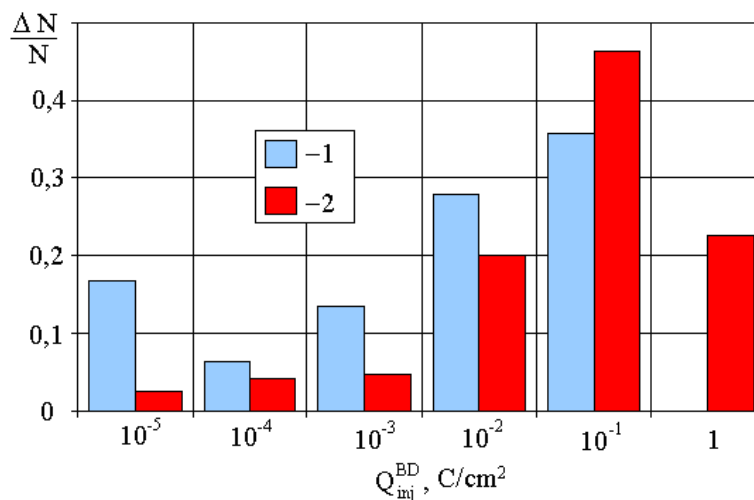


Рис. 2. Относительные гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до пробоя образца: 1 – образцы без обработки; 2 – после плазменной обработки.

Изменение электрофизических параметров системы Si-SiO<sub>2</sub> после воздействия ЭДПС проводилось на основе анализа изменения распределения МДП-структур по значениям электрофизических параметров (на основе анализа гистограмм). Достоверность такого воздействия подтверждается изменением распределений МДП-структур как по значениям генерационных времен жизни носителей, для чего регистрируются изменения гистограмм времен релаксации нестационарной емкости МДП-структур, измеряемым на одной пластине не менее чем у 100 структур, так и по величине зарядовой стабильности МДП-структур, сформированных на кремниевой подложке. Параметры воздействия ЭДПС: плотность потока аргоновой плазмы -  $10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; кинетическая энергия электронов – 0,1 эВ, давление – атмосферное [8]. Проводилось измерение времен релаксации нестационарной емкости одних и тех же МДП-структур до и после воздействия ЭДПС.

На рис.3 приведена профилограмма времени релаксации  $\tau$  нестационарной емкости МДП-структуры, регистрируемая по диаметру пластины перпендикулярно траектории плазменной струи после обработки ЭДПС. Начальная величина  $\tau$  составляла 2÷3 с для пластины 1 и 3÷4 с для пластины 2. Область непосредственного контакта плазменной струи с пластиной лежала в диапазоне  $x/D = 0,2 \div 0,5$ , где  $D=10$  см - диаметр пластины, а  $x$  - расстояние от её края. В соответствии с результатами [2] генерационное время жизни носителей пропорционально времени релаксации нестационарной ёмкости. Значительное



уменьшение генерационного времени жизни в области вне воздействия плазменной струи связано с генерацией поверхностных состояний (ПС) на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> под действием плазменного излучения (видимый и ближний УФ диапазоны) и изменением их зарядового состояния. Увеличение плотности ПС в структурах с внутренними механическими напряжениями может происходить вследствие транспорта дырок, образующихся в окисле, к межфазной границе Si-SiO<sub>2</sub>. Захват дырок на локализованные состояния, образованные напряженными Si-O связями, вызывает перемещение атомов из локального в абсолютный минимум свободной энергии, что приводит к возникновению трёхкоординированного кремния, формирующего ПС.

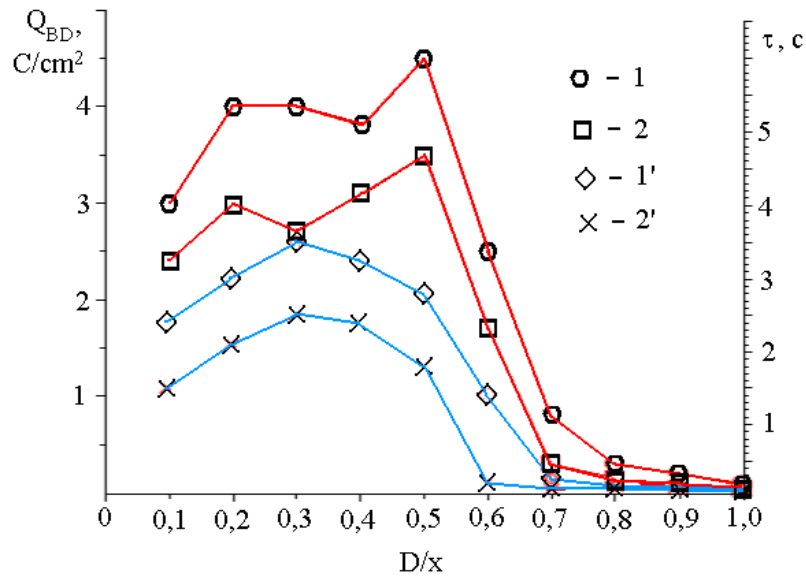


Рис. 3. Распределение заряда, инжектированного до пробоя,  $Q_{BD}$  (кривые 1,2) и времени релаксации нестационарной емкости  $\tau$  (кривые 1',2') МДП-структур по диаметру пластины, перпендикулярному к траектории обработки пластины плазменной струей (область контакта с плазменной струей  $x/D = 0,2-0,5$ ). Для пластины №1 – кривые 1,1' и для пластины №2 кривые 2,2'.

Наиболее интересный результат заключается в том, что полученное распределение  $\tau$  коррелирует с распределением зарядовой стабильности  $Q_{BD}$ , регистрируемым на тех же пластинах вдоль диаметра перпендикулярно траектории плазменной струи (рис. 3). Зарядовая стабильность регистрировалась по величине заряда, пропускание которого через МДП-структуру приводит к необратимому пробоему диэлектрика. Наличие положительного встроенного заряда приводит к резкому уменьшению  $Q_{BD}$  [10], так как область положительного заряда локали-

зует ток, пропускаемый через диэлектрик. Начальное значение  $Q_{BD}$  составляло величину  $0,2 \div 0,6$  Кл/см<sup>2</sup>.

Таким образом, новый важный результат состоит в том, что ЭДПС-обработка может в несколько раз увеличить зарядовую стабильность МДП-структур. Это обусловлено возможностью захвата электронов в окисле, препятствующего росту тока в диэлектрике в предпробойном состоянии. О накоплении отрицательного заряда в результате захвата электронов на ловушки окисла свидетельствует временная зависимость напряжения на МДП-структуре при пропускании через нее постоянного тока (рис. 3). Электроны инжектируются из кремния и в сильных полях индуцируют реакцию, в результате которой дефект, содержащий гидроксильную группу, изменяет свое зарядовое состояние, в соответствии с реакцией  $Si-O-H + e \Rightarrow Si-O^{\cdot-} + H$  [8,12]. Концентрация таких гидроксильных групп с сечением захвата электронов  $\approx 10^{-17}$  см<sup>2</sup> составляет  $10^{17} \div 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Увеличение концентрации гидроксильных групп в результате ЭДПС обработки представляется вполне естественным. Так, например, в работе [8] между плотностями электронных и дырочных ловушек показана возможность антибатной корреляции – появление электронных ловушек (плотность  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>) сопровождается уменьшением концентрации дырочных ловушек.

Таким образом, показано, что инжекционно-термическая обработка позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции и зарядовыми дефектами. При этом практически не снижается ресурс работы приборов на основе МДП-структур. Установлено, что проведение инжекционно-термической обработки позволяет повысить инжекционную и радиационную стойкость наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов за счет модификации структуры диэлектрической пленки. Найдено, что плазменные воздействия также могут улучшать характеристики МДП-приборов, повышая инжекционную и радиационную стойкость подзатворного диэлектрика за счет создания в объеме пленки SiO<sub>2</sub> требуемой плотности электронных ловушек. В результате захвата отрицательного заряда на созданные плазмой электронные ловушки повышается величина потенциального барьера на инжектирующей границе раздела, что приводит к уменьшению локальных токов, протекающих в местах дефектов диэлектрической пленки.

*Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2015 году, а также в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана Министерства образования и науки РФ (проект № 1117).*

#### Литература

1. Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Wiley-IEEE Press. 2009. ISBN: 0471731722. 624 p.
2. Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии.- Л.: ЛГУ, 1988.-304 с.
3. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides // J. Appl. Phys. 2005. Vol.98. P.121301.
4. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures// Thin solid films. 2003. V.427. P.377-380.
5. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем// Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 5. С.382-391.
6. Назаров А.Н., Лысенко В.С. ВЧ плазменная обработка как метод радиационно-термического наводораживания микроэлектронных кремниевых структур // Микроэлектроника. 1994. Т.23. № 4. С.45-65.
7. Воронкова Г.М., Попов В.Д., Протопопов Г.А. Уменьшение плотности ловушечных центров в оксиде кремния при радиационно-термической обработке // Физика и техника полупроводников. 2007. Том. 41. Вып. 8. С.977-980.
8. Maslovsky V.M., Pavlov G. Ya. Effect of electronic arc plasma jet treatment on MOS-structure reliability // Proceedings of MRS Symp. 1995. V.391. P.139-143.
9. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields// Vacuum. 2002. Vol. 67/3-4. P.507-511.
10. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of Gate Dielectric in MOS Devices by Injection-Thermal and Plasma Treatments// Acta Phys. Pol. A. 2014. Vol. 125. No. 6. P.1371-1373.

11. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A.: Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol 41, 2012, p. 012017
12. Андреев В.В., Масловский В.М., Сафонов А.Г., Столяров А.А. Модификация диэлектрических пленок МДП-приборов // Электроника: НТБ. Спецвыпуск. (00137). 2014. С.167-176.

**Труды XXV Международной конференции  
«Радиационная физика твёрдого тела»  
(Севастополь, 6 – 11 июля 2015 г.)**

Научный редактор:  
д.ф.-м.н. Бондаренко Геннадий Германович

Подписано в печать 29. 05. 2015г.  
Бумага типографская. Печать - ризография.  
Формат 70x108/16.  
Тираж 100 экз. Заказ 385.

Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ»  
115054, Москва, ул. М.Пионерская, д. 12  
Тел/факс (499) 959-37-03, 959-37-05 e-mail:  
[info@niipmt.ru](mailto:info@niipmt.ru)

Отпечатано в ООО «Телер»  
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 28  
Тел/факс (495) 937-86-64, e-mail: [piskarev@teler.ru](mailto:piskarev@teler.ru)

