

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТРУДЫ

XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 9-14 июля 2018 г.)

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

Москва – 2018

УДК 669.
ББК 22.38
Р15
ISBN 978-5-89671-023-3

Труды XXVIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 9 – 14 июля 2018 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018 г., 522с.

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

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор),
к.т.н. Гавриш В.М. (Севастопольский Государственный университет),
Шалковская Н. А. (Севастопольский Государственный университет),
д.ф.-м.н. Кристя В.И.,
к.ф.-м.н. Гайдар А.И.,
к.ф.-м.н. Дьячкова И.Г.,
Смирнова Е.В.
к.т.н. Шахбазов С.Ю.

УДК 669.
ББК 22.38
© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018

ISBN 978-5-89671-023-3

© Труды XXVIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела»

ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

Понедельник, 9 июля**10.00-14.00****Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.**

1. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искандаров Н.А., Хорошилов В.В., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю. «Исследование микроскопических причин радиационного упрочнения стали Eurofer 97 с помощью имитационного облучения ионами»	11
2. Волков Н.В., Олейников И.В., Сысоева Н.В., Сафонов Д.А., Яшин С.А. «Влияние состояния кремниевой подложки и режимов ионно-пучковой обработки на размерные параметры элементов микроэлектронных механических систем»	21
3. Овчинников В.В. «О незатухающем режиме распространения уединенных волн, осуществляющих структурно-фазовые превращения в метастабильных средах»	30
4. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха «Расчет напряжения зажигания слаботоочного газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки»	35
5. Стальцов М.С., Чернов И.И., Калин Б.А., Беляев А.А., Гордеев А.В., Шестакова В.М., Болат-оол А.А., Кузнецова Т.В., Лебедев В.В. «Газовая пористость вдоль пробега ионов в ванадии и его сплавах при последовательном облучении ионами гелия и водорода»	40
6. Korolev A.A., Kozlov S.A., Stumpf S.A., Golovanev Y.S. «Antireflection effect of electronic nonlinearity inertia in violet range for few-cycle laser beams at transparent isotropic dielectric media boundary»	50

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Шиманский В.И., Углов В.В., Черенда Н.Н., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Медин А.А. «Структурные изменения в циркониевом сплаве, легированном хромом и ниобием в результате воздействия компрессионными плазменными потоками»	61
--	----

2. Долуденко И.М., Шаталов А.С., Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н., Артёмов В.В., Бедин С.А., Бондаренко Г.Г., Загорский Д.Л., Фролов К.В., Перунов И.В. «Применение ядерных фильтров для получения слоевых нанопроволок»	70
3. Шаталов А.С., Бондаренко Г.Г., Чигарев С.Г., Дюжиков И.Н., Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Артемов В.В. «Создание спин-инжекторного источника терагерцового излучения на основе массива нанопроволок из ферромагнитных металлов»	78
4. Черкасов Д.А., Долуденко И.М., Бондаренко Г.Г., Артёмов В.В., Загорский Д.Л. «Влияние магнитного поля на структуру нанопроволок, получаемых репликацией пор трековых мембран»	85
5. Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Горелова Е.Г., Каширина Н.В., Петров В.С. «Механизмы формирования слоя ВаО на поверхности прессованного Pd-Ва катода магнетрона с беззнакальным запуском»	93
6. Казенов К.Б., Познырев Е.Н. «Применение времяпролетной позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования изменения физико-химических свойств материалов под воздействием экстремальных факторов окружающей среды»	105
7. Казенов К.Б. «Экспериментальное определение потока быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ядерного реактора типа ВВЭР-1000 при увеличенной топливной загрузке»	111

Вторник, 10 июля

9.00-14.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”

1. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Костюк В.И., Шишов К.А. «Исследования стекла К-208, облученного электронами и протонами средних энергий»	117
2. Арутюнян В.В., Ерицян Г.Н., Григорян Н.Е., Саакян А.А., Цаканов В.М., Григорян Б.А. «Радиационно-стимулированное дефектообразование при облучении кристаллов кремния пикосекундными электронами»	127
3. Арутюнян В.В., Алексанян Е.М., Акопян Н.А., Арестакян А.Г., Бадалян А.О., Григорян Н. Е., Баграмян В.В., Саркисян А.А. «Радиационная стойкость новых композитных терморегулирующих покрытий»	138

4. Гынгазов С.А., Костенко В., Шевелев С.А., Купчишин А.И. «Модифицирование прочностных свойств оксидных материалов ионным облучением»	147
5. Милёхин Ю.М., Коптелов А.А., Коптелов И.А., Рогозина А.А. «Необратимые изменения теплофизических характеристик полимерных материалов при гамма-облучении»	155
6. Медведева И.Ф., Мурин Л.И., Маркевич В.П. «Формирование комплексов C_s-C_s и VO при отжиге E-центров в облученных кристаллах n-Si»	163
7. Макаренко Л.Ф., Ластовский С.Б., Якушевич А.С., Мурин Л.И., Крылов В.П., Татмышевский К.В. «Инжекционно-стимулированные реакции образования бистабильных дефектов в кремнии р-типа, облученном α -частицами»	170

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Дьячкова И.Г., Гурьева П.В, Монахов И.С., Новоселова Е.Г., Шахбазов С.Ю., Шупегин М.Л. «Исследование структуры нанокompозитных танталсодержащих кремний-углеродных пленок»	179
2. Толкачева Е.А., Мурин Л.И., Маркевич В.П. «Особенности процессов радиационного дефектообразования при облучении быстрыми электронами кристаллов Si, содержащих вакансионно-кислородные комплексы»	185
3. Мадатов Р.С., Асадов Ф.Г. «Радиационные эффекты в кристаллах GaS и GaS<YB>»	193
4. Мадатов Р.С., Джахангиров М.М., Фараджова У.Ф., Гаджиева С.А. «Применение метода комбинационного рассеяния света в кристаллах GaS и GaSe до и после ионного внедрения водорода с энергией 70 кэВ»	195
5. Мадатов Р.С., Нуриев И.Р., Мамедов М.А., Мамишова Р.М. «Исследование влияния γ -излучения на фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xSe$ »	198
6. Файзуллаев Б.С., Исламов А.Х. «Инфракрасные спектры кварцевого стекла КУ-1, облученного быстрыми нейтронами»	201

Среда, 11 июля**9.00-14.0 Секция “Радиационная физика металлов”**

1. Волков Н.В., Олейников И.В., Корневский Е.Л., Сафонов Д.А., Яшин С.А. «Применимость моделей ионного перемешивания для условий облучения систем «пленка-подложка» пучками ионов с широким энергетическим спектром»	203
2. Загорский Д.Л., Фролов К.В., Ломов А.А., Чуев М.А., Долуденко И.М., Шаталов А.С., Черкасов Д.А., Бедин С.А., Артёмов В.В., Панов Д.В. «Магнитные свойства нанопроволок из железа, никеля и кобальта, получаемых темплатным методом на основе трековых мембран»	213
3. Бакиева О.Р., Аверкиев И.К., Сурнин Д.В., Немцова О.М. «Исследование локальной атомной структуры поверхности 3d-металлов методом EELFS спектроскопии»	217
4. Быков П.В., Воробьёв В.Л., Тарасенков А.Н., Баянкин В.Я. «Формирование химического состава поверхностных слоёв титана, с напыленным слоем алюминия, методом ионно-лучевого перемешивания»	225
5. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л. «Эволюция радиационной пористости в стали X18H9 при нейтронном облучении»	231
6. Кинев Е.А. «Размер зерна как монитор качества аустенитной стали с повышенной стойкостью к распуханию»	239
7. Углов В.В., Злоцкий С.В., Подобед А.Д. «Эрозия поверхности нанокompозитных пленок ZrSiN, облученных ионами гелия»	248

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция «Физические основы радиационной технологии» (заседание школы молодых учёных)**

1. Чирская Н.П., Золотарев И.А., Тулупов В.И., Новиков Л.С., Оседло В.И. «Моделирование метрологических характеристик спектрометров заряженных частиц»	259
2. Епифанов Н.А., Грибков В.А., Дёмин А.С., Казилин Е.Е., Латышев С.В., Масляев С.А., Миньков К.Н., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Сиротинкин В.П., Падух М. «Особенности деградации керамического покрытия из оксида Al ₂ O ₃ на алюминиевой подложке при импульсном пучково-	269

плазменном и лазерном воздействии»	
3. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А., Романов А.В. «Моделирование зарядовых явлений в МДП-структурах при сильнополевой инжекции электронов и воздействии ионизирующих излучений»	280
4. Ахмелкин Д.М., Андреев В.В., Бондаренко Г.Г. «Исследование инжекционно- и радиационно-термических процессов в диэлектрических пленках МДП-структур»	288
5. Козлова М.В., Шаталов Н.С., Козлов С.В., Павленко В.И., Едаменко О.Д. «Адсорбция радона на шунгите»	298
6. Клименко Д.И., Шаталов Н.С., Козлов С.В., Павленко В.И., Едаменко О.Д. «Наномодифицирование бетонов»	303
7. Горелова Е.Г. «Влияние нанесенной методом ионно-плазменного напыления поверхностной пленки осмия на эмиссионные свойства вольфрам-алюминатного катода»	307

Четверг, 12 июля**10.00-14.00 Секция “Физические основы радиационной технологии”**

1. Мадатов Р.С., Алекперов А.С., Набиев А.Э. «Влияние гамма-лучей на кристаллическую структуру монокристаллов $\text{Ge}_{0.995}\text{Ln}_{0.005}\text{S}$ »	312
2. Воробьев В.Л., Колотов А.А., Ульянов А.Л., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я., Быков П.В., Быстров С.Г. «Формирование наноразмерных поверхностных слоев титанового сплава методом ионно-лучевого перемешивания углерода»	315
3. Воробьев В.Л., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я., Быков П.В. «Формирование наноразмерных поверхностных слоев медно-никелевого сплава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ ионной имплантацией кислорода»	323
4. Понарядов В.В., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Горушко В.А., Омельченко А.А. «Быстрый термический отжиг как метод улучшения электрических параметров подзатворного диэлектрика»	329
5. Саидахмедов К.Х., Нуритдинов И. «Влияние ионизирующего излучения на люминесцентные свойства кристаллов ВГО»	337
6. Гарькуша М. В., Шешин Е. П. «Автоэмиссионный катод нового типа»	346

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция «Радиационная физика неметаллических материалов»**

1. Белько В.И., Гусаков В.Е., Дорожкин Н.Н. «Исследование радиационной стойкости наноразмерных структур методом молекулярной динамики»	348
2. Кабышев А.В., Конусов Ф.В., Павлов С.К. «Оптические свойства пленок нитридов алюминия и кремния, облученных ионами углерода в режиме высокоинтенсивной короткоимпульсной имплантации»	352
3. Курбанов А.М. «Роль примесей и структурных дефектов в образовании радиационных центров окраски в кристаллах $\text{Ca}_3(\text{Nb,Ga})_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ »	362
4. Мадатов Р.С., Тагиев Т.Б., Халыгзаде А.Ш. «Радиационные эффекты в облученных гамма - квантами монокристаллах $\text{GaS}\langle\text{Er}\rangle$ »	369
5. Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А. «Влияние модифицирования в низкотемпературной плазме на адгезионные свойства полимеров»	371

Пятница, 13 июля**10.00-14.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»**

1. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Сандалов В.Н., Амонов М.З., Бузриков Ш.Н. «Поверхностная электропроводность кристаллов LiF, облученных электронами»	375
2. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Чуховский Ф.Н. «Определение пространственной ориентации линейных дефектов кристаллической решетки методом рентгеновской дифракционной микротомографии»	384
3. Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Рошин Б.С., Дымшиц Ю.М., Шишков В.А., Чукалина М.В., Ингачева А.С., Кривонос Ю.С., Дьячкова И.Г. «Конструкция нового автоматизированного лабораторного рентгеновского микротомографа»	390
4. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Кривонос Ю.С., Пантюшов В.В., Сайфутдинов Р.Г. «Исследования конкрементов желчного пузыря человека методом рентгеновской микротомографии»	396
5. Гынгазов С.А., Костенко В., Овчинников В.В., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф. «Влияние ионного облучения на	403

механические свойства алюмооксидной керамики»	
6. Селищев П.А., Боков П.М. «Влияние параметров приповерхностного теплового импульса на неоднородный отжиг радиационных дефектов»	411

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.0 Секция «Радиационная физика металлов»**

1. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Крысина О.В., Денисов В.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Шугуров В.В., Толкачев О.С. «Структурно-фазовые превращения и свойства алюминия, подвергнутого азотированию в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления»	420
2. Голубев О.Л. «Особенности конденсации слоев кремния на поверхности монокристалла вольфрама»	428
3. Гущина Н.В., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Кайгородова Л.И., Распосиенко Д.Ю. «Влияние вылеживания при комнатной температуре и последующего ионного облучения на структуру сплава 1441 (Al-Li-Cu-Mg), подвергнутого мегапластической деформации»	435
4. Новиков Л.С., Ермолаев И.К., Чирская Н.П. «Повреждение металлических материалов ударами техногенных космических частиц»	445
5. Боровицкая И.В., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Парамонова В.В., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Казилин Е.Е. «Особенности изменения топографии поверхности ванадия в условиях отдельного и последовательного воздействия ионов аргона и импульсного лазерного излучения»	455

Суббота, 14 июля**9.00**

1. Овчинников В.В. «Тепловое излучение, взаимодействие заряженных частиц, гравитационное взаимодействие. Мировые физические константы»	464
2. Оксенгендлер Б.Л., Ашуров Х.Б., Максимов С.Е. «Современные тренды в радиационной физике твердого тела («магический квадрат»)»	477
3. Ерофеев В.Т., Урбанович А.И. «Моделирование взаимодействия электромагнитного излучения со средой с пространственной дисперсией, содержащей сфероидальные	481

частицы»	
4. Галанина Л.И., Новиков Л.С. «Моделирование радиационных эффектов в современных элементах микроэлектроники»	491
Обсуждение докладов	
Общая дискуссия	
Закрытие конференции	

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ
ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Арутюнян В.В.¹, Ерицян Г.Н.¹, Григорян Н.Е.¹, Саакян А.А.¹, Цаканов
В.М.², Григорян Б.А.²

¹ Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна Ереванского
физического института (Ереван, Армения)

² Центр синхротронного излучения, CANDLE (Ереван, Армения)

Введение

Импульсное облучение обуславливает влияние очень интенсивного потока радиоактивного облучения в течение очень короткого промежутка времени (10-8 сек и менее) на свойства материалов. Основной чертой этого облучения является высокая плотность потока, что стимулирует новые эффекты, практически отсутствующие при «длительном» облучении. При импульсном облучении процессы, возникающие в объеме и на поверхности материала, не завершаются с прекращением облучения, а продолжают определенное время. Они завершаются формированием стабильных при заданной температуре радиационных дефектов, которые вызывают необратимые изменения свойств, как материалов, так и изготовленных из них устройств. Скорость этих процессов зависит от температуры образца и концентрации примесей, которые взаимодействуют с радиационными дефектами.

Изучение кинетики образования и отжига дефектов, вызванных импульсным облучением, особенно в полупроводниках и полупроводниковых устройствах, представляет особый интерес для радиационной физики твердого тела, поскольку оно выдает дополнительную информацию о температурной и временной стабильности радиационных дефектов в материалах и устройствах. В то же время характерное последствие импульсного облучения - интенсивная ионизация полупроводников - имеет важное значение и приводит к появлению интенсивных нестационарных токов и электрических сил в устройствах.

Для экспериментальных исследований обычно используются известные источники импульсов с длительностью импульса около 10^{-7} секунд, что соответствует области формирования тепловых процессов [1-5, 8]. Вследствие этих воздействий энергия, поглощаемая кристаллом, расходуется на ионизацию, т.е. образование свободных электронов и дырок в зоне проводимости и валентной зоне, а также на нагрев

полупроводникового материала. Таким образом, результирующий ток в момент облучения может быть получен путем выполнения суперпозиции нормального постоянного тока и двух составляющих ионизационного тока [8, 11-14]. Если импульсное облучение длится порядка 10^{-12} секунд (пикосекунды), то имеют место не тепловые процессы (10^{-6} - 10^{-7} с), а «чисто» энергетическое воздействие облучения на атомы материала (Рис. 1). Во всех случаях необходимо учитывать, что увеличение плотности потока облучения может вызвать [9-10]:

1. Изменение концентраций носителей заряда в зоне проводимости и валентной зоне, что изменяет зарядовые состояния взаимодействующих дефектов, а затем и скорость аккумуляции вторичных дефектов при облучении.

2. Увеличение скорости образования пар Френкеля (вакансий V и междоузельных атомов I). В то же время процессы образования дефектов могут отличаться от таковых в случае облучения потоками низкой плотности: точечные дефекты начинают эффективно взаимодействовать друг с другом, коагулируя и частично отжигаясь. В то время как при облучении потоком малой плотности накопление пар Френкеля происходит линейно, при облучении потоком высокой плотности это не так, скорость накопления может быть определена эмпирически [3-5].

3. Процесс насыщения концентрации комплексных дефектов с увеличением дозы облучения при высокой плотности потока происходит быстрее, чем при облучении с низкой плотностью.

Теоретические обсуждения

Прежде всего, дадим оценку так называемому «критерию плотности потока облучения» применительно к кристаллам кремния и указанным выше факторам. Например, при облучении электронами с плотностью потока $J \sim 3 \text{ мА/см}^2$ в секунду (длительность импульса порядка микросекунды, энергия 4 МэВ) собственная концентрации атомов кремния $N_{\text{Si}} = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$, эффективное сечение образования пар Френкеля $\Sigma = 5 \times 10^{-24} \text{ см}^2$, а время жизни захвата вакансий примесью $\tau = 3 \times 10^{-6} \text{ с}$. Для стационарной концентрации вакансий получаем: $N_v = N_{\text{Si}} J \Sigma \tau = 1.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что намного меньше концентрации примесей, обычно присутствующих в кристаллах. Другими словами, среднее расстояние между вакансиями намного выше, чем между вакансией и примесным атомом, а доминирующим процессом является образование комплексов: вакансия - примесный атом, такой как А-центр (концентрация ки-

слорода выше 10^{16}см^{-3}) или E-центр (концентрация примеси выше и более 10^{17}см^{-3}) [2, 3, 13, 14]. Очевидно, что этот результат не соответствует условию 2, и необходимо применять J более 1 ампера, что достижимо в случае пикосекундного облучения.

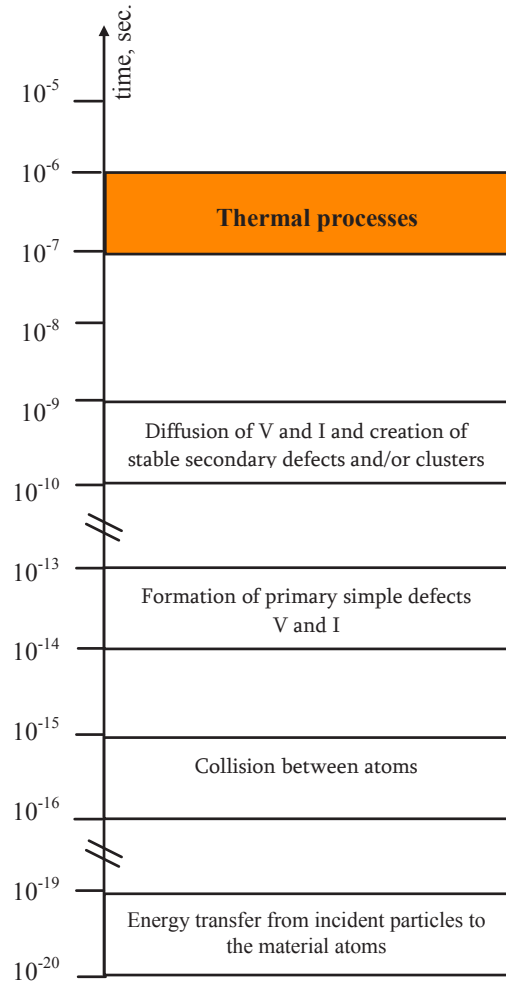


Рис. 1. Схематическое представление временной шкалы образования радиационных дефектов. На рисунке сверху вниз: Время тепловые процессы диффузия V и I, а также образование устойчивых вторичных дефектов и/или кластеров. Формирование первичных простых дефектов V и I. Столкновения атомов. Передача энергии от потока облучающих частиц атомам вещества

Как упоминалось выше, в случае очень короткой длительности импульса облучения среднее время накопления носителей заряда в объеме и в периферийных областях поверхности обычно различается из-за различия скоростей рекомбинации неосновных носителей в объеме и на поверхности. Вследствие этого электроны и дырки, образованные

при облучении, перемещаются в ловушки и образуют обычный ионизационный ток. В этом токе также можно наблюдать два компонента: немедленный и отсроченный.

Для точной характеристики этих переходных процессов необходимо учитывать некоторые факторы, такие как время перераспределения заряда, скорости рекомбинации различных процессов в объеме и на поверхности, особенности геометрии образца и т.д., большинство из которых не известны заранее. При высокой плотности потока облучения, например, гамма облучения ($\phi_\gamma > 10^7 - 10^8$ рад/с) или электронного с энергией электронов 3-5 МэВ (интенсивность 100 пико кулон/пико сек = 100 ампер) образующийся интенсивный ток может быть причиной появления ускоряющего электрического поля, способного влиять на характер процесса [15]. Последнее, в свою очередь, увеличивает ток и напряженность электрического поля. Этот механизм усиления тока, аналогично эффекту положительной обратной связи, может привести со временем к нестабильности и экспоненциальному увеличению тока [6, 7]. Условие стабильности восстанавливается, когда в результате рекомбинации концентрация неравновесных носителей заряда уменьшается до уровня, при котором поток носителей уже не поддерживается электрическим полем [16, 17].

Отметим, что длительные процессы рекомбинации не связаны с малым сечением рекомбинации на центрах захвата, а определяются максимальным значением времени жизни неосновных носителей, которое выражается как [4]:

$$\tau_{\max} = (v S_{\min} \Delta n)^{-1}, \quad (1)$$

где v - тепловая скорость носителей заряда (комнатная температура), Δn - концентрация неравновесных носителей, S_{\min} - наименьшее значение поперечного сечения носителей, захваченных центрами, которое определяется как 10^{-23} см^2 . Релаксационные процессы, для которых характерны времена более чем τ_{\max} , могут быть связаны с долговременными процессами, возникающими вследствие неравномерного распределения носителей из-за образования радиационных дефектов [18-20]. В подобных случаях важны следующие значения: $v = 10^7$ см/сек, $\Delta n \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $S_{\min} \sim 10^{-23} \text{ см}^2$, и мы можем получить из (1) $\tau_{\max} \sim 10^2 - 10^3$ сек, что говорит о достаточно длительном времени жизни для неравновесных носителей [8, 21-23]. Что касается непосредственных процессов и

соответствующих времен существования носителей, можно вычислить время ухода атомов до межатомного расстояния:

$$\tau_{\text{rem}} \approx 10^{-8} \text{ см} / 10^6 (\text{см/сек}) \approx 10^{-14} \text{ сек}, \quad (2)$$

что трудно определить во время эксперимента, но во всех случаях необходимо иметь в виду при точных измерениях. Долговременные процессы характеризуются электростатическим потенциальным барьером U , окружающим неупорядоченные области (созданные облучением), обуславливая пространственное разделение основных и неосновных носителей. Неосновные носители перемещаются в неупорядоченные области и там рекомбинируют, в то время как многочисленные основные носители должны проникать внутрь неупорядоченных областей, преодолевая потенциальный барьер, чтобы вернуть систему в равновесное состояние. Высота потенциального барьера определяет время релаксации [4, 6, 7].

Рассмотрим влияние зарядового состояния взаимодействующих дефектов на барьер U при образовании комплексных дефектов (например, А- или Е- центров) в зависимости от интенсивности облучения J . При взаимодействии двух дефектов с зарядами Z_1e и Z_2e барьер U резко изменяется на $Z_1 Z_2 e^2/r$ (энергия кулоновского взаимодействия энергии, где r - расстояние между дефектами, e - заряд электрона), но заряд дефекта определяется разностью между уровнем энергии на дефекте и уровнем Ферми (квазиуровень) в запрещенной зоне [16, 23-25]. При изменении ионизации в кристалле часть дефектов с заданным зарядовым состоянием изменяется квазинепрерывно, что приводит к изменению скорости накопления комплексов, как в случае взаимодействия двух отдельных дефектов с изменением их заряда. Следовательно, в выражении для зависимости образования дефектов от интенсивности облучения (J) U можно представить непрерывной (линейной), функцией J , т.е.

$$U = U_0 + kJ, \quad (3)$$

где U_0 - потенциальный барьер при $J = 0$, k - коэффициент пропорциональности (число электронно-дырочных пар, создаваемых одной облучающей частицей). Здесь мы не рассматриваем температурные зависимости, поскольку эти процессы имеют низкую вероятность при пикосекундном облучении. В этом случае (на этапе линейной зависи-

мости скорости накопления А- или Е-центров от интенсивности) число вакансий увеличивается при облучении (квазиуровень Ферми находится ниже уровня дефектов). При достаточно высокой скорости образования неравновесных носителей, которая может быть легко достигнута при высокоимпульсном облучении, квазиуровень Ферми будет располагаться выше уровня дефектов [8, 9]. Тогда заполнение заданного уровня, определяемое скоростью электрон-дырочной рекомбинации, в первом приближении не изменится с увеличением J. Этот факт объясняет «насыщение» скорости образования комплексов радиационных дефектов при увеличении J и, возможно, формирование кластеров радиационных дефектов при достаточно высокой дозе импульсного облучения.

Результаты экспериментов и измерений

Электронное облучение проводилось на линейном ускорителе с использованием пикосекундного импульсного электронного пучка с энергией 3,5 МэВ в научно-исследовательском институте синхротронных исследований «CANDLE» (Армения); максимальная доза облучения составляла 6×10^{13} эл/см². Измерения эффекта Холла проводились на образцах кремния следующих размеров: толщина 0,5 мм, ширина 3 мм, длина 10 мм, расстояние 5 мм между проводящими контактами, имеющими форму двойного креста. Измерения проводились при температуре в диапазоне от 80 до 300 К с точностью до 0,5 К. Электрические свойства образцов определялись по измерениям эффекта Холла при следующих параметрах: индукция магнитного поля 0,5 Тесла, постоянный ток через образец от 100 мкА до 2 мА, входное сопротивление вольтметра 10^{12} Ом. Концентрация носителей заряда, их подвижность и электропроводность образцов оценивали по измерениям с использованием четырехзондового метода.

Доза облучения определялась по [10]:

$$D = 6.25 \times 10^{12} Jt/Sel/cm^2, \quad (4)$$

где J - средний ток в μA , t - время экспозиции в секундах, а S - поперечное сечение пучка в см².

Ток пучка измерялся по накопленному заряду в цилиндре Фарадея. Электропроводность и подвижность носителей заряда измерялись с использованием известного метода эффекта Холла при разных температурах. Электрическая проводимость рассчитывалась по формуле $\sigma =$

$\mu n e$, где μ - подвижность (Холла) носителей заряда, n - концентрация основных носителей заряда, e - заряд электрона. Концентрация основных носителей заряда определяется по формуле $n = 1/eR_H$, $R_H = U_H d / I B$ - коэффициент Холла, I - ток через образец, B - напряженность магнитного поля, d - толщина образца. Подвижность носителей заряда определялась по измерениям эффекта Холла:

$$\mu = U_H I / U_p b V \quad (5)$$

где U_H - разность потенциалов между контактами Холла, U_p - разность потенциалов между проводящими контактами, l - длина образца, b - ширина образца.

С учетом известной температурной зависимости концентрации n , когда она намного ниже концентрации донорных (или акцепторных) центров, и если концентрация одних центров преобладает, имеем:

$$n = N_c e^{-\varepsilon/kT} \quad (6)$$

где ε - энергия активации донорного (или акцепторного) центра, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, N_c (эффективная плотность состояний) постоянна для данного образца в данных условиях. Логарифмируя (6), нетрудно найти значение ε , т.е. положение энергетического уровня центра излучения (донора или акцептора) в запрещенной зоне полупроводниковой структуры. На Рис. 2-4 представлены основные параметры кремния в зависимости от температуры и дозы облучения. Сравнивая результаты измерений с ходом кривой, можно указать, что так же ведут себя кластеры радиационных дефектов. По наклону кривых можно судить о кислородном кластере, содержащем центры $E_c - 0.16$ eV (рис. 2-3), т.е. об А-центрах в облученных образцах Si (выращенных по методу Чохральского). Относительные изменения подвижности Холла на Рис. 4 а-б свидетельствуют об аналогичном положении вещей при облучении электронами с энергией 3,5 МэВ (в данной работе) и протонами с энергией 590 МэВ [11], что подтверждает кластеризацию при образовании дефектов, хотя в первом случае энергия намного низкая, т.е. вся энергия облучающих частиц расходуется на формирование дефектов (нет теплового эффекта).

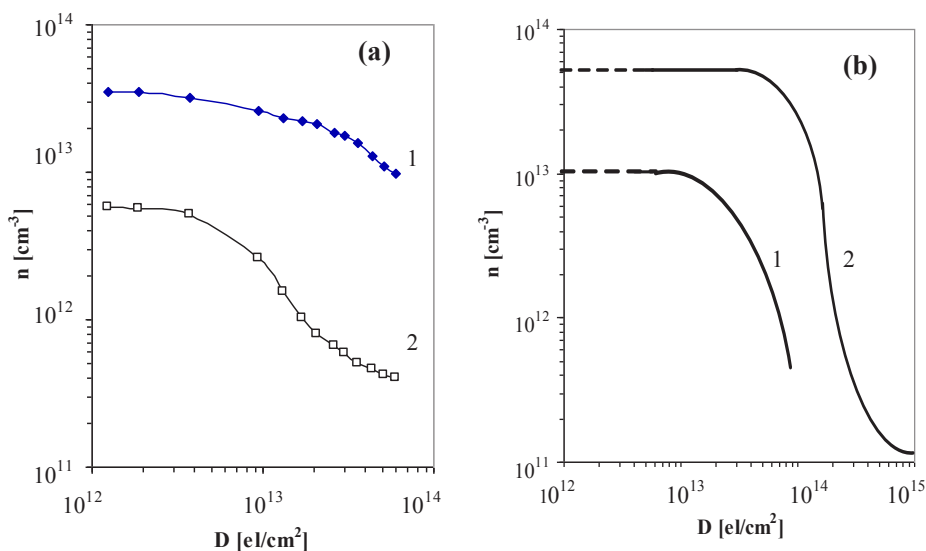


Рис.2. Зависимость концентрации основных носителей заряда в кремнии от дозы электронного облучения: (а) - облучение пикосекундным импульсным пучком электронов с энергией 3,5 МэВ; Начальное удельное сопротивление образцов было таким: 1- $\rho = 124$ Омсм, 2- $\rho = 710$ Омсм. Облучение и измерения проводились при комнатной температуре. (б) - облучение электронами с энергией 50 МэВ. Начальное удельное сопротивление образцов было таким: 1- $\rho = 450$ Омсм; 2 - $\rho = 100$ Омсм

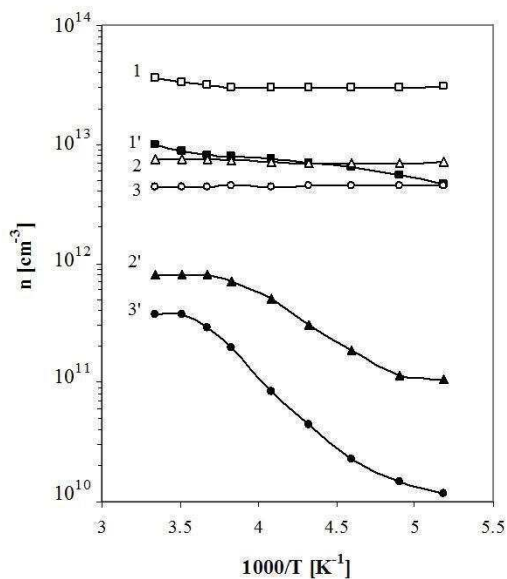


Рис.3. Температурные зависимости концентрации основных носителей заряда для p-Si с различным удельным сопротивлением после облучения пикосекундным импульсным пучком электронов с энергией 3,5 МэВ. Удельное сопротивление образцов до облучения было 120 Омсм (1) и после облучения дозой 6×10^{13} эл/см² (1'), 720 Омсм до (2) и после облучения дозой 1.2×10^{13} эл/см², и 950 Омсм до (3) и после облучения дозой 1.2×10^{13} эл/см² (3')

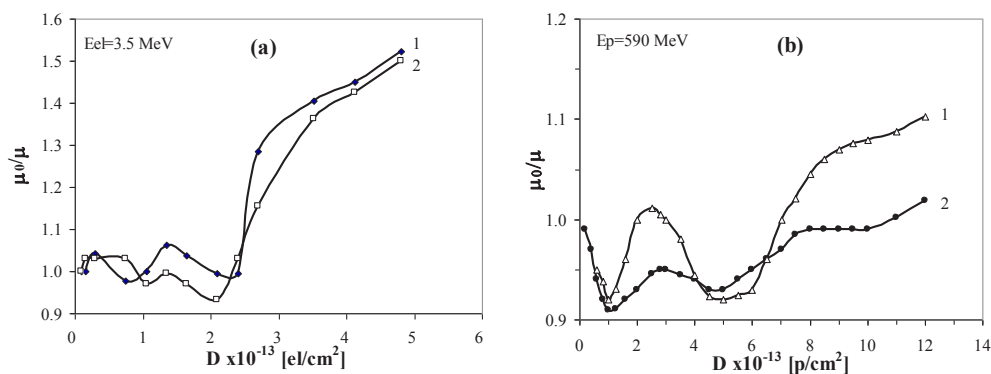


Рис.4. Зависимость подвижности основных носителей заряда в кремнии (относительное изменение) от дозы облучения: (а) – электронное облучение пикосекундными импульсами (энергия электронов 3,5 МэВ); исходное удельное сопротивление образцов было таким: 1- $\rho = 124$ Омсм, 2- $\rho = 710$ Омсм, (б) - облучение протонами с энергией 590 МэВ [11]; исходное удельное сопротивление образцов было таким: 1- $\rho = 0,11$ Омсм, 2- $\rho = 0,46$ Омсм. Облучение и измерения проводились при комнатной температуре

Выводы

Таким образом, импульсное облучение высокой плотности приводит к образованию в полупроводниковых кристаллах типичных структурных дефектов, которые обуславливают переходные процессы, способные существенно изменить свойства кристаллов и нанести серьезный ущерб эффективности полупроводниковых приборов. Эти процессы перехода имеют двойной характер. С одной стороны, это перераспределение и аннигиляция радиационных структурных дефектов, а с другой - релаксация электронного возбуждения. Первое может влиять на полезная мощность устройств в течение длительного времени (возможно, сотни секунд). Важно отметить, что в то же время уровень возбуждения неравновесных носителей должен удовлетворять следующему требованию: $\Delta n/n_0 \leq 1$. Из-за большой разницы между ультрарбыстродействующим облучением (пикосекундная длительность импульсов) и тепловым эффектом (микросекундная длительность процессов) второго явления не наблюдается. А при облучении от обычных источников излучения (длительность импульса 10^{-6} - 10^{-7} сек.) тепловой эффект в значительной мере имеет место (Рис. 1). Дано определение так называемому «критерию плотности потока облучения», который зависит от длительности импульса и интенсивности облучения.

Работа выполнена в рамках гранта № 17А-1С002.

Литература

1. E.A. Carr; Nucl.Sci.NS-11, No 5, 12 (1964); NS -12, No5, 30 (1965).
2. H.J. Stein, et al.; IEEE Trans. Radiation defects. Conference on Irradiation effects in Semiconductors.Toulouse, 7-11 March, 1967.
3. D.I. Vaisburd; Intern. Conf. on Rad. Physics of Semiconductors and Related Materials p. 198-210. Tbilisi 1980.
4. M.K. Sheinkman, A.I. Shik; Fizika i tehnika poluprovodnikov (in Russian), 10, 2, 209, 1976.
5. Y. Condo, M. Hirati., M. Ueda; J. Phys. Soc. Japan 33, No1, 151 (1972).
6. M. Reiche, M. Kittler et al.; Appl. Phys. A, April 2016, 122:389, DOI 10.1007/s 00339 – 016 – 9836-x.
7. Byoung Seo Lee, Joon Sik Lee; Appl. Phys. A, v. 121, Issue 3, 1193, Nov. 2015, DOI 10.1007/s 00339 – 015 – 9489-1.
8. G.D. Watkins; In: Materials science and Technology, ed. By R.W. Cahn P. Haasen, E.J. Kramer (WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA) v.4/5, 105, 2005.
9. D.V. Gromov, V.N. Mordkovich, D.M. Pazhin, P.K. Skorobogatov; Electronics technique, Series 2, Semiconductor devices, issue 1(226), 19, 2011.
10. H.N. Yeritsyan, A.A. Sahakyan, N.E. Grigoryan, V.V. Harutyunyan, et all.; Journal of Modern Physics, 2016, 7, 1413.doi:10.4236/jmp.2016.712128.
11. R.F. Konopleva, V.I. Ostroumov; The interaction of charged high energy particles with silicon and germanium. Moscow. Atom-edition.1975, 127p.
12. P.G. Coleman, C.J. Edwardson, A.P. Knightsand, R.M. Gwilliam; New Journal of Physics.The open access journal for physics. 4(2012) 025007 (7pp), doi:10.1088/1367-2630/14/2/025007.
13. V.V. Emtsev, A.M. Ivanov, et all.;Physics and Technics of Semiconductors. 46, issue 4, 473, 2012.
14. H.N. Yeritsyan, A.A. Sahakyan, V.V. Harutyunyanet all. Journal of Spacecraft and Rockets v.48, No1, 34, 2011. Publication of Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics (NASA).
15. H.N. Yeritsyan, A.A. Sahakyan, N.E. Grigoryan, V.V. Harutyunyan, Journal of Electronic Materials,DOI: 10.1007/S 11664-016-4975-6; 2016, 841-847, 2017-01-20.
16. Y.H. Wang, F.R. Liu, W.Q. Li, T. Fan et all. Journal of Applied Physics 122, 043104 (2017); <http://doi.org/10.1063/1.4993451>.

17. M. Ishfaq, M. Rizvan Khan, M.F. Bhopal, F. Nasimet all. Journal of Applied Physics 115, 174506 (2014); <http://doi.org/10.1063/1.4874942>.
18. Frank Hartmann, NIMA, v.666, 25 (2012).
19. A. Scora, D. Grojo, M. Sentis. Journal of Applied Physics 122, 045702 (2017); <http://doi.org/10.1063/1.4994307>.
20. D. Aberg, A. Hallen, B.G. Svensson; Appl.Surf.Science, 184, 263, (2001).
21. H.J. von Bardeleben, J.L. Cantinet all.Phys. Rev.B 62, 10126 (2000).
22. E.G. Sieverts and J.W. Corbett, "Sol. State Comm., (1) 41 (1982).
23. P.F. Ermolov, D.E. Karmanov, A.K. Leflat, V.M. Manankov, M.M. Merkin and E.K. Shabalina, Semiconductors, (10) 1194 (2002).
24. P.F. Lugakov and I.M. Filipov, Rad. Eff. 90 (3-4) 297 (1985).
25. V.P. Markevich, A.R. Peaker, S.B. Lastovskii, L.I. Murin and J.L. Lindstroem, J. Phys. Condens. Matter 15, S2779 (2002).

**Труды XXVIII Международной конференции
«Радиационная физика твёрдого тела»
(Севастополь, 9 – 14 июля 2018 г.)**

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

Подписано в печать 22. 06. 2018г.
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

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

ISBN 978-5-89671-023-3



9 785896 710233