

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ФТИАН им. К.А. Валиева РАН
чл. корр. РАН



 В.Ф. Лукичев

«05» декабря 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН) на диссертационную работу Баранова Глеба Владимировича «Эффекты пространственного распределения дефектов и примесных атомов в слоистых структурах на основе Si при ионной имплантации» по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертационная работа Г.В. Баранова посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей пространственного распределения радиационных и радиационно-термических дефектов, а также исследованию распределения примесных атомов вблизи границы раздела кремний-диэлектрик. Кроме того, изучаются размерные факторы ионно-имплантированных через маску областей, при которых оказывается существенное влияние механических и электрических полей на распределение примеси.

Новизна работы состоит в том, что продемонстрирована возможность регулирования фона неравновесных точечных дефектов в кремнии за счет граничных эффектов в гетерогенных структурах, что не

рассматривалось ранее в целях управления профилем примеси в реальных структурах микроэлектроники. Найденный автором принцип реализации сепарирования вакансий либо собственных междоузельных атомов из решетки кремния создает уникальную для радиационной физики ситуацию и имеет ряд практически важных следствий. Исследованный эффект способен значимо влиять на пространственное распределение имплантированных примесных атомов в кремнии, что подтверждено в работе на примере атомов As и Sb.

Актуальность выбранной темы обусловлена возможностями применения изученного эффекта для решения практически важных задач микроэлектроники: предельного повышения концентрации примесных атомов в приповерхностных областях, уменьшения глубины p-n-переходов, повышения крутизны профиля залегания примеси. Таким образом, тема работы актуальна с точки зрения фундаментальных задач радиационной физики, а выполненные исследования обладают значимой научной новизной.

Диссертационная работа включает список используемых сокращений, введение, четыре главы, основные результаты работы и выводы, список работ, опубликованных по теме диссертации, список цитируемой литературы из 82 наименований и содержит 132 страницы, в том числе 51 рисунок и 3 таблицы. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цель и задачи, излагаются положения научной новизны, практической значимости, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу литературы по теме диссертационных исследований. Обзор посвящён процессам радиационного дефектообразования и диффузии примесных атомов в Si в условиях пересыщенного твердого раствора собственных точечных дефектов радиационного происхождения. Особое внимание уделяется

анализу пространственного распределения первичных радиационных дефектов в Si и хорошо известному факту пространственного разделения профилей первичных V и I в гомогенной матрице. Кроме того, обсуждаются прикладные задачи стимулированной диффузии примесных атомов и вторичного радиационно-термического дефектообразования в Si.

Во второй главе впервые теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность термически устойчивого интегрального разделения компонентов пар Френкеля, возникающих при ионной имплантации в различные слоистые гетерогенные структуры, при котором становится возможным получить в области диффузии имплантированной примеси сильные пересыщения только по вакансиям или собственным атомам в междоузлиях.

В третьей главе продемонстрирована эффективность управления диффузионными процессами примесных атомов за счет создания нетипового фона радиационных дефектов на примере имплантации в модельных условиях ионов Sb и As в структуру SiO₂-Si. Впервые показано, что при этом диффузия атомов Sb в Si на стадии постимплантационного отжига может быть практически полностью подавлена, а диффузия атомов As в Si имеет сложный характер и требует учета явления «восходящей диффузии».

Четвертая глава посвящена теоретическим исследованиям эффектов управления ионно-имплантированным профилем примесных атомов при формировании мелкозалегающих локальных ионно-легированных областей в Si под воздействием электрических и механических полей. В главе определены критические размеры мелкозалегающих ионно-имплантированных областей, при которых существенное влияние на их формирование в части коррекции

металлургической границы будут оказывать механические и электрические поля, связанные с присутствием маскирующего слоя.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть применены при разработке и исследовании процессов ионной имплантации при изготовлении структур микро- и нанoeлектроники. Автором получена модель, адекватно описывающая диффузионный профиль примесных атомов мышьяка в условиях устойчивого разделения компонентов радиационных пар Френкеля на границе раздела фаз структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$. Кроме того, были определены критические размеры мелкозалегающих ионно-имплантированных областей, при которых на их формирование будут оказывать существенное влияние механические и электрические поля, связанные с присутствием маскирующего слоя.

Полученные автором результаты могут быть использованы при разработке и исследовании технологических процессов ионной имплантации в организациях РАН, профильных организациях электронной промышленности: ФТИАН РАН, ИФП СО РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АО «НИИМЭ», ПАО «Микрон».

Следует отметить большую проделанную работу диссертанта в области моделирования процессов образования дефектов и их диффузии, постановке экспериментов, в которых были определены ключевые параметры наблюдаемых эффектов.

Однако в ходе обсуждения работы был выявлен и ряд недостатков, которые можно сформулировать в виде следующих замечаний:

1. Имеются незначительные замечания к оформлению работы. Например, на стр. 23 и стр. 32 слово «бор» написано с большой буквы. На стр. 47 имеется ссылка на рис. 1, которого нет в работе, по-видимому, автор имел в виду рисунок 2.1.

2. В главе 4 моделирование проведено для ряда значений 180 нм, 90 нм, 65 нм, 45 нм, 32 нм, 22 нм, соответствующего ряду проектных норм УБИС. Тем не менее, рассмотренные в этой главе энергии имплантации приводят к глубине легирования, требуемой в дорожной карте для соответствующих технологических процессов. Было бы интересно рассмотреть результаты, относящиеся к суб-10 кэВ диапазону энергий имплантации.

3. В главе 4 проведен расчет значений поля во вскрытых в маске окнах, но не проведен расчет потенциала, также не выполнено сравнение результатов с данными экспериментов из литературы.

Несмотря на отмеченные незначительные недостатки, диссертационная работа Баранова Г.В. производит положительное впечатление и является завершенным научным исследованием. Тема работы полностью соответствует паспорту научной специальности, по которой проходит защита, а результаты диссертации имеют важное научное и практическое значение. Считаем, что работа выполнена на высоком уровне, отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатской диссертации на соискание ученых степеней согласно п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.). Автореферат достаточно полно и ясно отражает содержание диссертационной работы, а основные публикации по теме диссертации в полной мере раскрывают ее суть. Выводы и положения, вынесенные на защиту, полностью соответствуют поставленной задаче диссертации, обоснованно следуют из результатов проведенной автором работы.

Результаты диссертационной работы были рассмотрены на научном семинаре ФТИАН РАН «Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники» 05 ноября 2017 г., а настоящий

отзыв был одобрен на заседании Ученого совета ФТИАН им. К.А. Валиева РАН 28 ноября 2018 г., протокол № 7-018.

Считаем, что Баранов Глеб Владимирович, безусловно, заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

канд. физ.-мат. наук,

с. н. с. лаб. МССП

Мяконьких А.В.



Сведения о лице, утвердившем отзыв: Лукичев Владимир Федорович, Чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, директор ФТИАН им К.А. Валиева РАН, адрес 117218, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., 34, Тел.: +7 (499) 129-54-92, e-mail: lukichev@ftian.ru

Сведения о составителе отзыва: Мяконьких Андрей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаб. Микроструктурирования и субмикронных приборов ФТИАН им К.А. Валиева РАН, адрес 117218, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., 34, Тел.: +7 (499) 129-55-08, e-mail: miakonkikh@ftian.ru