

На правах рукописи

ЕМЦЕВ Константин Вадимович

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ IV ГРУППЫ И НИТРИДАХ III ГРУППЫ
С МЕЛКИМИ ПРИМЕСЯМИ

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
Кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург-2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Козловский Виталий Васильевич

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «__» _____ 2007 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:
195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корп. 2, ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.05

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Облучение кристаллических твердых тел ядерными частицами, энергия которых достаточна для упругого смещения регулярных атомов из узлов решетки, представляет собой самый распространенный и контролируемый способ образования дефектов структуры и изменения их концентрации. Практическое значение таких работ очевидно. На основе полученной информации совершенствуются технологические процессы изготовления радиационно-устойчивых материалов и разрабатываются технологические приемы целенаправленного изменения их электрических и оптических свойств за счет введения дефектов радиационного происхождения при строго дозированном облучении; см., например, [1]. Научный аспект радиационных исследований кристаллических твердых тел заключается в более глубоком понимании природы и сущности фундаментальных процессов в реальных кристаллах.

Среди исследованных полупроводниковых материалов указанные вопросы удалось в основном разрешить только для кремния, для которого блестящие исследования структуры радиационных дефектов с помощью электронного парамагнитного резонанса, выполненные Дж. Уоткинсом с сотр. [2], были дополнены данными электрических, оптических, фотоэлектрических и других измерений. Однако до сих пор радиационные эксперименты проводились в основном на слабо и умеренно легированном кремнии с концентрацией носителей заряда до 10^{17} см⁻³. Природа и поведение точечных дефектов в сильнолегированных материалах мало изучены, хотя в настоящее время интерес к этой проблеме резко возрос в связи с новыми потребностями производства полупроводниковых приборов.

К сожалению, несмотря на большой объем выполненных работ, вопрос о механизмах образования, энергетических спектрах и природе дефектов в германии остается во многих отношениях открытыми, а моделирование радиационных процессов обычно проводится на основе представлений об идентифицированных в кремнии точечных дефектов. Поэтому актуальным является вопрос об исследовании радиационных дефектов в германии, исходя из вновь возникшего интереса электронной промышленности к этому полупроводнику и его сплавов с кремнием. Как и следовало ожидать, главное внимание исследователей привлечено к взаимодействию собственных дефектов с мелкими примесными центрами III и V групп, поскольку последние являются основными легирующими примесями в кремнии и германии.

В последние годы огромный всплеск интереса к исследованию прямозонных нитридов III группы, таким как нитрид галлия и нитрид индия, обусловлен их перспективным использованием в оптоэлектронике. Однако анализ имеющейся литературы показывает, что информация о свойствах собственных точечных дефектах в этих материалах скудна и противоречива, а радиационные эксперименты на этих материалах практически отсутствуют. Поэтому накопление экспериментальных данных, относящихся к свойствам точечных дефектов в нитридах III группы и составляющих основу инженерии дефектов с мелкими легирующими примесями, представляется крайне актуальным.

Принимая во внимание вышесказанное, **целью данной работы** являлось изучение процессов образования и отжига радиационных дефектов главным образом в сильнолегированных полупроводниковых материалах IV группы и нитридах III группы с мелкими легирующими примесями. В соответствии с этим были определены основные **задачи работы**:

- провести сравнительное изучение скорости образования первичных и вторичных радиационных дефектов в сильнолегированном кремнии *n*- и *p*-типа при облучении быстрыми электронами при двух температурах $T= 4,2$ К и 300 К, а также сопоставить сечения образования электрически активных дефектов с расчетным сечением образования первичных радиационных дефектов (пар Френкеля);
- провести сравнительное исследование высокотемпературных процессов отжига радиационных дефектов в сильнолегированном кремнии *n*-типа с различными мелкими примесями V группы;
- провести сравнительное изучение процессов образования радиационных дефектов в германии с различными мелкими примесями V группы под действием гамма-облучения ^{60}Co ;
- использовать облучение сильнолегированного нитрида галлия и нитрида индия ядерными частицами для получения первичной информации о свойствах образующихся радиационных дефектов.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что использование данных по изменению удельной электропроводности для определения абсолютных изменений концентрации носителей заряда в вырожденном кремнии при облучении быстрыми электронами и в процессе отжига сильно переоценивает последние, так как основное предположение о неизменности подвижности носителей заряда при относительно малом изменении электропроводности облученных вырожденных материалов (даже в пределах нескольких

процентов) оказывается неверным. В действительности, ошибка может достигать 50%. В случае вырожденных материалов необходимы прямые электрические измерения концентрации электронов и дырок методом эффекта Холла.

2. Определены сечения образования электрически активных дефектов в вырожденном кремнии *n*- и *p*-типа, облученных быстрыми электронами с энергией 2,5 МэВ при $T = 4,2$ К и 300 К. Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными сечениями образования первичных дефектов (пар Френкеля) позволило пересмотреть существующие модельные представления об электрической активности пар Френкеля в кремнии.

3. Выявлены особенности отжига радиационных дефектов в сильнолегированном кремнии *n*-типа с мелкими примесями V группы по сравнению с процессами отжига радиационных дефектов в материалах с низким уровнем легирования, в которых доминирующими дефектами являются *E*-центры (акцепторный комплекс *вакансия – примесный атом V группы*). Эти особенности указывают на формирование в сильнолегированном материале комплексов, включающих в свой состав вакансию и несколько примесных атомов.

4. Детальное исследование процессов образования и отжига дефектов в германии *n*-типа с мелкими примесями V группы, подвергнутом гамма-облучению ^{60}Co и последующему изохронному отжигу, позволило определить свойства акцепторных центров радиационного происхождения, содержащих примесные атомы V группы. По своим свойствам указанные дефекты идентифицированы как комплексы *вакансия – примесный атом V группы*, по структуре аналогичные *E*-центрам в кремнии.

5. Показано, что электрические параметры нитрида галлия *n*-типа с мелкой примесью кремния при радиационном воздействии изменяются за счет образования глубоких акцепторов, которые сопоставляются вакансиям в подрешетке галлия. Однако этот процесс компенсации электронной проводимости в облученном *n*-GaN при комнатной температуре в значительной мере смягчается одновременным образованием неглубоких доноров радиационного происхождения $\approx E_C - 70$ мэВ. Последние отнесены к вакансиям в подрешетке азота. Установлено также, что мелкая примесь кремния в *n*-GaN не взаимодействует с собственными точечными дефектами, и ее концентрация остается неизменной при облучении и отжиге нитрида галлия.

6. Установлено, что облучение тонких пленок вырожденного или почти вырожденного нитрида индия *n*-типа протонами с энергией 150 кэВ (с пробегом за пределами самой пленки) приводит к интенсивному образованию радиационных дефектов с мелкими донорными состояниями, в результате чего концентрация носителей заряда в

облученном n -InN может превысить исходную концентрацию на порядок величины и более. Кинетика образования указанных дефектов, их электрические свойства, а также процесс отжига позволяют отнести эти дефекты к вакансиям в подрешетке азота, стабильными при комнатной температуре.

Практическая значимость.

Результаты диссертационной работы по точечным радиационным дефектам в кремнии и германии вносят существенный вклад в современные представления о природе и свойствах первичных и вторичных дефектов в элементарных полупроводниках IV группы, в частности в проблему образования комплексов с мелкими легирующими примесями. Выявленные особенности комплексов с несколькими примесными атомами, образующихся в сильнолегированном кремнии, в частности их высокая термическая устойчивость, должны учитываться при выращивании таких кристаллов. Новые данные о точечных дефектах в нитриде галлия и индия позволяют по-новому взглянуть на проблемы инженерии дефектов в указанных материалах и их твердых растворах и могут быть практически использованы при «холодном легировании» дефектами радиационного происхождения.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Резкая асимметрия сечения образования электрически активных дефектов в вырожденном кремнии n - и p -типа при температурах облучения, близких к температуре жидкого гелия, определяется различием электрической активности первичных радиационных дефектов (пар Френкеля и их компонентов).

2. Высокотемпературный отжиг дефектов, образующихся в сильнолегированном кремнии n -типа при облучении быстрыми электронами, резко отличается от процессов отжига, наблюдаемых в кремнии с низким уровнем легирования мелкими примесями V группы, за счет формирования вакансионных комплексов, включающих в себя несколько примесных атомов.

3. Определены акцепторные состояния вторичных радиационных дефектов, образующихся в германии n -типа с различными мелкими примесями V группы при взаимодействии этих примесных атомов с собственными точечными дефектами. По своей природе эти дефекты отнесены к комплексам *вакансия – примесный атом V группы*, структура которых аналогична E -центрам в кремнии.

4. Изменения электрических параметров нитрида галлия n -типа с мелкой примесью кремния в процессе облучения быстрыми электронами с энергией 0,9 МэВ при $T = 300$ К и последующего отжига до $T \approx 700$ К определяются следующими факторами: образованием и отжигом дефектов с донорными уровнями $\approx E_C - 70$ мэВ и дефектов с глубокими

акцепторными состояниями, а также отсутствием взаимодействия мелкой примеси кремния с собственными точечными дефектами.

5. Электрические свойства нитрида индия n -типа в результате радиационного воздействия изменяются в основном за счет образования собственных точечных дефектов с мелкими донорными состояниями, которые идентифицируются по своим свойствам как вакансии в подрешетке азота.

Таким образом, исследованные полупроводниковые материалы позволяют показать различные типы поведения мелких донорных примесей во взаимодействии с собственными точечными дефектами при облучении: образование комплексов акцепторного типа (одновременно с потерей мелких донорных состояний) в кремнии и германии, отсутствие какого-либо взаимодействия (при наличии простой компенсации мелких донорных центров глубокими акцепторами радиационного происхождения) в нитриде галлия и эффективное «легирование» мелкими донорными центрами за счет образования собственных точечных дефектов в нитриде индия, при котором концентрация образованных центров может намного превысить исходную концентрацию доноров.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях:

- International conference on shallow level centers in semiconductors, Warsaw, Poland, 2002.

-

- 23rd International conference on defects in semiconductors, Japan, 2005.

- XXXVI Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 2006 г.

- XVI Международное совещание «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 2006 г.

- Workshop on defects relevant to engineering advanced silicon-based devices, Crete, Greece, 2006.

- Всероссийская конференция «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Нижний Новгород, 2006 г.

Материалы диссертации проходили регулярную апробацию на семинарах СПбГПУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Список литературы содержит 101 наименование. Отдельно приведен список публикаций автора по теме диссертации из 8 наименований. Объем диссертации 128 страниц, в том числе 30 рисунков и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации кратко обоснована актуальность работы, определены цели исследований, сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе даны краткие пояснения к понятиям и терминам, используемым в радиационных экспериментах, а также проведен анализ литературных данных.

Учитывая ведущую роль, которую играет кремний в современной микроэлектронике, обзор начинается с очень краткого представления литературных данных, относящихся к точечным дефектам в этом полупроводнике. Ввиду огромного объема имеющейся информации основной акцент в обзоре сделан на свойствах тех собственных дефектов и вторичных комплексах с мелкими примесными атомами III и V групп, которые могут быть актуальными для материалов, исследованных в данной работе. Это, прежде всего, сильно легированные монокристаллы кремния. Следует отметить, что для такого кремния сведения о доминирующих типах дефектов в литературе весьма скудны и разрознены, хотя в настоящее время потребность в систематическом изучении такого материала, включая радиационное воздействие, несомненна.

Радиационные дефекты в другом полупроводнике IV группы – ближайшем аналоге кремния – германии феноменологически исследованы достаточно хорошо, однако их идентификация, особенно комплексов с мелкими легирующими примесями, носит предположительный характер. Хорошо известно, что германий, легированный мелкими примесями V группы, при облучении быстрыми электронами и гамма-облучении испытывает конверсию типа проводимости $n \rightarrow p$ вследствие активного взаимодействия этих донорных примесей с собственными дефектами, в результате чего происходит уменьшение концентрации мелких примесных центров. Предполагается, что возникающие комплексы с примесными атомами в облученном германии аналогичны E-центрам в кремнии, атомная и электронная структура которых надежно установлена [2]. К сожалению, энергетический спектр таких дефектов, ответственных за уменьшение концентрации мелких донорных центров в облученном германии, не был достоверно определен до настоящей работы, хотя в литературе обсуждались отдельные модельные соображения [3].

Что касается радиационных дефектов в нитриде галлия и нитриде индия, то можно с уверенностью констатировать, что до проведения настоящих радиационных экспериментов сколько-нибудь систематические исследования радиационных дефектов в

них отсутствовали, поскольку в то время спорными были даже вопросы исходного легирования этих полупроводников.

Таким образом, представленный обзор литературы позволил выделить актуальные аспекты радиационных экспериментов в указанных полупроводниковых материалах и обозначить цели исследований.

Во второй главе диссертации описаны детали техники эксперимента, использованной в настоящей работе.

В качестве исходных материалов были выбраны монокристаллы вырожденного и сильно легированного кремния, выращенные по методу Чохральского. Концентрация мелких примесей V группы (P, As и Sb) или III группы (B) в них находилась в пределах от $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Напротив, для монокристаллов германия *n*-типа, легированного мелкими примесями V группы (P, As, Sb и Bi), концентрация была в интервале от $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для того, чтобы удовлетворить требованиям надежных измерений методами нестационарной емкостной спектроскопии. Что же касается нитридов III группы, то это были эпитаксиальные пленки, выращенные в основном на подложках из сапфира. Технология выращивания пленок была различной (MOCVD, HVPE, plasma-assisted MBE) и технологические процессы модифицировались в ходе экспериментов с целью получения наиболее чистых материалов и по возможности с минимальной концентрацией ростовых дефектов.

Для генерации собственных точечных дефектов были использованы различные источники облучения в зависимости от исходных электрических параметров исследуемых материалов. В частности, применялись ускорители с пучком быстрых электронов на выходе, энергия которых составляла 1 МэВ и 2.5 МэВ. Кроме того, облучение проводилось с помощью гамма-лучей от источника ^{60}Co . Для нитридов III группы в основном применялось облучение протонами с энергией 150 кэВ.

Проведение радиационных экспериментов включало в себя измерения электрических параметров исследуемых материалов в исходном состоянии, после облучения и в процессе изохронного отжига. Измерение эффекта Холла и удельной электропроводности с помощью метода Ван-дер-Пау при различных температурах давало возможность определить температурные зависимости концентрации и подвижности свободных носителей заряда, анализ которых для невырожденных полупроводников на основе соответствующих уравнений электронейтральности позволял оценить отдельно как полную концентрацию мелких центров, так и концентрацию компенсирующих дефектов. Для полупроводника *n*-типа уравнение электрической нейтральности записывается в общем виде [4,5]

$$n = \sum_i \frac{N_{di}}{1 + \beta_{di}^{-1} \exp\left(\frac{E_F - E_{di}}{kT}\right)} - \sum_k \frac{N_{ak}}{1 + \beta_{ak}^{-1} \exp\left(\frac{E_{ak} - E_F}{kT}\right)} \quad (2.5)$$

где N_{ak} – концентрация компенсирующих акцепторов, образуемых k -м уровнем; E_{ak} и β_{ak} – энергия ионизации и фактор вырождения рассматриваемого уровня; N_{di} – концентрация донорного уровня, образуемого i -м примесным центром; E_{di} и β_{di} – энергия ионизации и кратность вырождения рассматриваемого уровня; k – постоянная Больцмана; E_F – уровень Ферми. Для исследования радиационных дефектов в слабо легированном германии n -типа проводились также измерения емкостных спектров. Для этого изготавливались структуры с барьером Шоттки и использовалась высокочувствительная установка DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy).

В данной главе дано краткое описание технологии изготовления электрических контактов к образцам и процедуры проведения изохронного отжига облученных образцов. Обсуждение этих важных вопросов техники экспериментов позволяет заключить, что выбранный путь исследования радиационных дефектов в указанных выше полупроводниковых материалах обеспечивает получение достоверной информации об их электрических свойствах и параметрах. Это, в свою очередь, дает возможность делать надежные выводы о природе точечных дефектов и их взаимодействии с легирующими примесями.

В третьей главе приведены данные электрических измерений радиационных дефектов в сильно легированном кремнии. Содержание этой главы распадается на две части. В первой части обсуждаются процессы образования дефектов в вырожденном n -Si и p -Si при двух температурах облучения быстрыми электронами, при $T = 4.2$ К и 300 К. Во второй части приведены результаты исследования изохронного отжига радиационных дефектов в сильно легированном кремнии n -типа.

Электронное облучение вырожденного кремния при двух температурах позволило с общих позиций взглянуть на процессы образования первичных дефектов. При благоприятных условиях наблюдения удалось зарегистрировать самую большую скорость образования первичных дефектов в кремнии (см. таблицу), что, в свою очередь, указывает на пороговую энергию упругого смещения регулярных атомов кристаллической решетки между 20 эВ и 30 эВ. Далее огромное различие как в скорости удаления носителей заряда в вырожденных материалах n - и p -типа при криогенных температурах $T < 10$ К (более чем в 20 раз даже для быстрых электронов с энергией 2,5 МэВ) (рис. 1а), так и в изменении

подвижности свободных электронов и дырок (рис. 1б) объясняется различной

	Скорость удаления η , см ⁻¹	
n-Si при $T < 10\text{K}$	< 0.02 0.18 ± 0.06	[6] (наст. работа)
n-Si при $T = 300\text{K}$	1.1 ± 0.02 4 ± 1	[6] (наст. работа)
p-Si при $T < 10\text{K}$	1.1 ± 0.5 5 ± 1	[6] (наст. работа)
p-Si при $T = 300\text{K}$	2.2 ± 0.4 6 ± 1	[6] (наст. работа)

Таблица. Скорости удаления носителей заряда в вырожденном кремнии ($n, p > 10^{19}$ см⁻³), подверженном облучению быстрыми электронами. Энергия быстрых электронов составляла 1,0 МэВ и 2,5 МэВ в [6] и настоящей работе, соответственно.

скорости удаления носителей заряда, что часто применяется ввиду простоты техники измерений, ведет к значительному искажению результатов.

Данные по изохронному отжигу радиационных дефектов в сильно легированном кремнии *n*-типа ясно показали, что эти процессы протекают совершенно иначе, чем реакции залечивания *E*-центров (комплексов *вакансия - примесный атом V группы*) в умеренно легированном *n*-Si. Для последних характерна стадия отжига указанных комплексов и, соответственно, стадия восстановления исходной концентрации носителей заряда около $T = 400$ К. Напротив, в сильно легированном *n*-Si восстановление исходной концентрации электронов наблюдается при существенно более высоких температурах $T =$

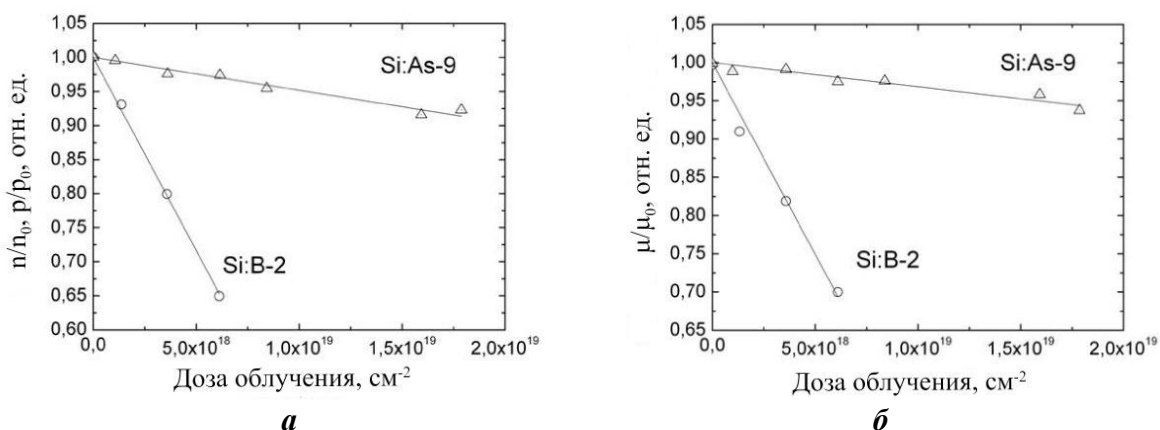


Рис. 1. Относительные изменения концентрации (а) и подвижности (б) носителей заряда в зависимости от дозы облучения в вырожденном кремнии после облучения электронами с энергией 2,5 МэВ при $T = 4,2$ К.

600 – 700 К, что объясняется формирования комплексов *вакансия - два примесных атома V группы* при отжиге. Следует отметить, что такие модельные представления согласуются

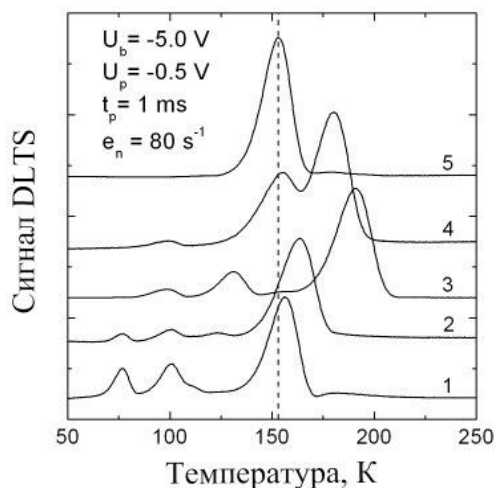


Рис.2. DLTS спектры образцов Ge, легированных P (1), As (2), Sb (3), и Bi (4) после γ -облучения. Для сравнения спектр 5 был записан на образце Ge, обогащенном кислородом.

радиационных экспериментов позволил сделать ряд новых заключений. В качестве примера на рис.2 показаны емкостные спектры для облученных образцов германия с различными мелкими примесями. Было установлено, что доминантный пик в спектрах проявляется при разных температурах в зависимости от химической природы примеси. Для сравнения приведен также спектр, в котором основной пик связан с комплексами *вакансия – атом кислорода*. Использование лапласовской модификации емкостных измерений позволило выявить закономерности в изменении таких характеристических параметров рассматриваемых центров как энергия активации эмиссии электронов ΔE_{ne} , предэкспоненциальный фактор A_{ne} и кажущееся сечение захвата

$$\sigma_{na} = \sigma_{n0} \exp(\Delta S/k),$$

где σ_{n0} – сечение захвата при $1/T = 0$, которое используется для описания многофононных процессов захвата на глубокие центры, а ΔS – изменение энтропии при ионизации глубоких состояний. Измеренные величины ΔE_{ne} и A_{ne} для основных электронных ловушек радиационного происхождения подчиняются правилу Майера - Нелделя, согласно которому для однотипных дефектов $\ln(A_{ne})$ является линейной функцией ΔE_{ne} . Тем самым подтверждается вывод о том, что речь идет о примесных комплексах одного типа. Анализ данных позволил определить изменения энтальпии и энтропии при ионизации рассматриваемых дефектов. По сравнению с E -центрами в кремнии, для которых $\Delta S \leq k$, в германии для аналогичных комплексов эта величина существенно больше. Как и в кремнии, изохронный отжиг обсуждаемых дефектов в области $T = 120^\circ - 160^\circ \text{C}$ также проявляет зависимость от химической природы примесей.

Особенности использованных барьеров Шоттки на германии n -типа позволили исследовать процессы захвата дырок на радиационные дефекты при инжекции неосновных носителей заряда при прямом смещении. Скорость образования ловушек для

с данными [7], полученными при исследовании процессов аннигиляции позитронов на радиационных дефектах в вырожденном кремнии n -типа.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению радиационных дефектов в n -Ge, легированном мелкими примесями V группы (P, As, Sb и Bi), в развитие предварительного исследования радиационных дефектов в n -Ge:Sb [8]. Системный подход к постановке

электронов и дырок в облученном *n*-Ge оказались близкими по величине, а энергия активации эмиссии основных и неосновных носителей заряда и термическая стабильность дефектов явно обнаруживают зависимость от химической природы примеси V группы. Все это позволило описать рассматриваемые процессы захвата как проявление двух акцепторных состояний одного и того же комплекса *вакансия – примесный атом V группы*.

В пятой главе приводятся и обсуждаются результаты изучения радиационных дефектов в нитридах III группы на примере нитрида галлия и нитрида индия *n*-типа.

Нитрид галлия. Наиболее интересные результаты в радиационных экспериментах по изучению точечных дефектов в *n*-GaN, легированных мелкой примесью кремния, были получены на чистых и слабо компенсированных образцах с концентрацией и подвижностью носителей заряда при комнатной температуре около $n \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_n \approx 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, соответственно. Было установлено, что облучение *n*-GaN быстрыми электронами при комнатной температуре приводит к простой компенсации электронной проводимости глубокими акцепторами радиационного происхождения. Таким образом, мелкая примесь кремния не взаимодействует с собственными точечными дефектами кристаллической решетки при указанных условиях облучения и ее концентрация остается неизменной в процессе облучения. Было также установлено, что в результате облучения образуются дефекты с неглубокими донорными состояниями около $E_C - 70 \text{ мэВ}$, которые почти полностью ионизованы при $T \approx 300\text{К}$. Эффективная скорость образования радиационных дефектов донорного и акцепторного типов примерно равны ($\eta_d^{\text{rad}} \approx 0.3 \text{ см}^{-1}$ и $\eta_a^{\text{rad}} \approx 0.2 \text{ см}^{-1}$). Сильные изменения подвижности носителей заряда в облученном *n*-GaN свидетельствуют о том, что процессы рассеяния электронов при криогенных температурах определяются многозарядными акцепторами. Исследование процессов изохронного отжига рассматриваемых радиационных дефектов в облученном *n*-GaN показало, что до температур $T \leq 200^\circ \text{С}$ их концентрации остаются неизменными (в пределах погрешности измерений). Полный отжиг этих дефектов происходит практически одновременно на одной стадии $T = 200^\circ - 400^\circ \text{С}$ и, как следствие, наблюдается восстановление исходных значений концентрации и подвижности носителей заряда. Глубокие акцепторные состояния наиболее вероятно связаны с вакансиями галлия V^{3-} , и тогда сильное изменение подвижности носителей заряда при облучении получает естественное объяснение, так как парциальный вклад рассеяния на заряженных дефектах пропорционален второй степени зарядового числа рассеивающих центров. Согласно теоретическим представлениям [9], вакансии азота в GaN обладают неглубокими донорными состояниями, что позволяет интерпретировать радиационные дефекты

донорного типа $\approx E_C - 70$ мэВ как принадлежащие этим собственным дефектам. Таким образом, по предварительной идентификации дефектов, электрическую активность в облученном n -GaN проявляют вакансии в обеих подрешетках. Собственные междоузельные атомы галлия и азота, по современным теоретическим представлениям, являются глубокими донорами.

Нитрид индия. В этом материала ситуация с собственными точечными дефектами представляется более запутанной в силу некоторых технологических особенностей роста пленок n -InN. Для радиационных экспериментов на n -InN подходящим является облучение протонами с энергией $E = 150$ кэВ. Во всех случаях протонное облучение n -InN приводит к эффективному образованию дефектов донорного типа, в результате чего концентрация носителей заряда в диапазоне температур $T = 78$ -300 К резко возрастает. Это свидетельствует о том, что возникающие донорные центры обладают мелкими состояниями. Скорость образования рассматриваемых дефектов при облучении n -InN составляет около 10^4 см⁻¹. Кинетика образования этих радиационных дефектов линейна, что характерно для процессов генерации собственных точечных дефектов. Исследование процесса изохронного отжига радиационных дефектов показало, что первые признаки отжига начинаются при температуре выше $T = 150^\circ\text{C}$. Основная стадия отжига охватывает температурный интервал $T = 200^\circ - 400^\circ\text{C}$. К сожалению, при более высоких температурах само бинарное соединение становится неустойчивым и проведение отжига невозможно. Теоретические расчеты дефектов в этом полупроводнике [10] указывают, что вакансии азота могут обладать мелкими донорными состояниями, хотя положение энергетических уровней не определено с удовлетворительной точностью. Принимая во внимание тип электрической активности радиационных дефектов в n -InN и характер кинетики образования, они могут быть идентифицированы как вакансии азота.

В заключении кратко сформулированы основные научные результаты работы. Они состоят в следующем.

1. Исследованы процессы образования первичных и вторичных точечных дефектов в сильно легированном кремнии, подвергнутом облучению быстрыми электронами с энергией 2,5 МэВ при двух температурах - вблизи температуры жидкого гелия и при комнатной температуре. Совместный анализ полученных результатов с известными данными по удалению носителей заряда в вырожденном кремнии при электронном облучении с более низкой энергией, а также с данными по диффузному рассеянию рентгеновских лучей радиационными дефектами позволили сделать вывод о том, пары Френкеля как первичные дефекты электрически нейтральны в материале n -типа. Их разделение на компоненты происходит в температурном интервале 80 – 100 К. Напротив,

в материале *p*-типа первичные дефекты положительно заряжены. Их разделение на компоненты не имеет резко выраженной стадии вследствие высокой подвижности собственных междоузельных атомов при криогенных температурах. Сопоставление наблюдаемой скорости генерации первичных дефектов в вырожденном кремнии с расчетной скоростью генерации пар Френкеля в рамках простой модели упругого смещения регулярных атомов при рассеянии быстрых электронов дает возможность оценить пороговую энергию смещения между 20 эВ и 30 эВ. Изучение процессов высокотемпературного отжига точечных дефектов в сильно легированном облученном кремнии *n*-типа указало на взаимодействие диффундирующих *E*-центров с мелкой примесью *V* группы и формирование термически более устойчивых вакансионных комплексов с двумя примесными атомами.

2. Детальное изучение процессов взаимодействия собственных точечных дефектов с мелкими примесями *V* группы в гамма-облученном германии *n*-типа позволило идентифицировать вакансионные комплексы с участием этих примесных атомов и проследить закономерности в изменении их свойств в зависимости от химической природы мелкой донорной примеси.

3. Исследованы процессы образования и отжига радиационных дефектов в нитриде галлия *n*-типа с мелкой донорной примесью кремния. Установлено, что при облучении *n*-GaN быстрыми электронами с энергией около 1 МэВ, а также в процессе отжига до 400⁰С примесные атомы не взаимодействуют с собственными точечными дефектами, и все изменения электрических параметров материала при таком радиационном воздействии определяются вакансиями азота и галлия.

4. Проведены радиационные эксперименты на вырожденных образцах нитрида индия *n*-типа с исходной концентрацией носителей заряда в диапазоне от 10¹⁷ см⁻³ до 10²⁰ см⁻³, облученных протонами с энергией 150 кэВ. Показано, что при облучении образуются дефекты с мелкими донорными состояниями, концентрация которых линейно растет с дозой облучения во всем диапазоне от 10¹⁴ см⁻² до 10¹⁶ см⁻². Установлено, что концентрация этих радиационных дефектов с мелкими донорными состояниями в относительно чистых образцах *n*-InN может быть увеличена на два – три порядка величины. Таким образом, электрические параметры облученного материала полностью определяются электрическими свойствами мелких донорных центров радиационного происхождения, которые идентифицируются как вакансии азота, неподвижные до $T=200^{\circ}\text{C}$.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V. Kozlovskii. Radiation defect engineering. World Scientific, 2005.
2. G.D. Watkins. Intrinsic point defects in semiconductors // Materials Science and Technology.(Wiley-VCH Verlag GmbH & Co/ KGaA).2005. V.4/5. P.105-142.
3. Т.В. Машовец, В.В. Емцев, С.Н. Абдурахманова. Модель процесса образования γ -радиационных дефектов в германии, легированном примесями V группы // «Физика и техника полупроводников».1974. Т.8. В.1. С.96-104.
4. Зеегер К. Физика полупроводников. - М.: Мир, 1977.
5. Блейкмор Дж. Физика твердого тела - М.: Мир, 1988.
6. L.L. Sivo and E.E. Klontz. Studies of radiation damage in degenerate silicon irradiated at low temperatures. Phys. Rev. 1969. V.178. P.1264-1273.
7. V. Ranki and K. Saarinen. Formation of vacancy-impurity complexes in highly As- and P-doped Si. Physica B. 2003. V. 340-342. P.765-768.
8. V.V. Markevich, A.R. Peaker, V.V. Litvinov, V.V. Emtsev and L.I. Murin. Electronic properties of antimony-vacancy complex in Ge crystals. J. Appl. Phys. 2004. V.95. P.4078 -4083.
9. P. Bogusławski, E.L. Briggs and J. Bernholc. Native defects in gallium nitride. Phys. Rev. B. 1995. V.51. P.17225-17258.
10. S. Stampfl, C.G. Van de Walle, D. Vogel, P. Krüger and J. Pollmann. Native defects and impurities in InN: First-principles studies using the local-density approximation and self-interaction and relaxation-corrected pseudopotentials. Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. R784 -R7849.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. V. V. Emtsev, P. Ehrhart, K. V. Emtsev, D. S. Poloskin, U. Dedek. Defect production in heavily doped n-Si irradiated with fast electrons at cryogenic temperatures. //Physica B. 2006. V. 376-377. P. 173-176.
2. V. P. Markevich, I.D. Hawkins, A.R. Peaker, K. V. Emtsev, V. V. Emtsev, V. V. Litvinov, L. I. Murin, L. Dobaczewski. Vacancy-donor atom pairs in Ge crystals doped with P, As, Sb, and Bi. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70, No. 23, P. 235213.
3. V. V. Emtsev, V. Yu. Davydov, K. V. Emtsev, D. S. Poloskin, G. A. Oganessian, V. V. Kozlovskii, E. E. Haller. Shallow donor centers in gallium nitrides. // Phys. Stat. Sol. (c). 2003. V. 0, No 2, P. 601-604.

4. К. В. Емцев, В. В. Козловский, В. В. Емцев, В. Ю. Давыдов, Д. С. Полоскин, Г. А. Оганесян. Легирование n-GaN радиационными дефектами. // Труды XVI Международного совещания “Радиационная физика твердого тела”. Севастополь. 2006.
5. В. В. Козловский, К.В. Емцев, В. Ю. Давыдов, В. В. Емцев, А. А. Клочихин, Г. А. Оганесян. Образование дефектов в n-InN, подвергнутом облучению протонами и быстрыми электронами. Тезисы докладов VII российской конференции по физике полупроводников, Москва (Звенигород), ФИАН им. П.Н. Лебедева, 2005. С. 290.
6. V.V. Kozlovskii, E.V. Bogdanova, V.V. Emtsev, K.V. Emtsev, A.A. Lebedev and V.N. Lomasov. Direct experimental comparison of the effects of electron irradiation on the charge carrier removal rate in n-type silicon and silicon carbide. //Mater. Sci. Forum.(Trans Tech Publications, Switzerland-Germany-UK-USA). 2005. V.483-485. P.385-388.
7. К.В.Емцев, В.В.Козловский. Легирование широкозонных полупроводников радиационными дефектами. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. № 3. С. 156-161.
8. В.В. Козловский, В.В. Емцев, К.В. Емцев, В. Ю. Давыдов, Г.А. Оганесян. Радиационное дефектообразование в нитриде индия под действием заряженных частиц. Тезисы докладов XXXVI Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2006. Изд. МГУ. С. 144.