



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

мкр. Орлова роща, д. 1, г. Гатчина, Ленинградская область, 188300
Телефон: (81371) 4-60-25, факс: (81371) 3-60-25. E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru
ОКПО 02698654, ОГРН 1034701242443, ИНН 4705001850, КПП 470501001

УТВЕРЖДАЮ

№ 6

«16» мая 2018 г.



Заместитель директора по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

д.ф.-м.н. **В.В. Воронин**

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

– Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» –
на диссертационную работу **Лошаченко Антона Сергеевича**
**«Взаимодействие водорода с дислокационными сетками сращенных
пластин кремния»**, представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.10**
– физика полупроводников.

Актуальность темы

Изучению дислокаций в кремнии уделялось и уделяется довольно большое внимание. Такой повышенный интерес к этой области исследований объясняется тем, что характеристики многих полупроводниковых приборов (солнечных элементов на мульткристаллическом кремнии, детекторов ядерных излучений и др.) а также воспроизводимость результатов ряда технологических процессов хуже из-за дефектов структуры и, прежде всего, дислокаций. Дислокации в алмазоподобной решетке вызывают разрыв межатомных связей, эффективно геттерируют различные примеси из объема кристалла и тем самым обуславливают повышенную рекомбинацию неравновесных носителей заряда. С другой стороны, дислокации могут играть и положительную роль. Так кремний с дислокациями рассматривается в качестве материала для создания светоизлучающих элементов,

совместимых с существующими технологиями микроэлектроники, а также для разработки полевых транзисторов с каналом повышенной проводимости. Поэтому совершенно ясно, что возникает необходимость в разработке технологических приемов, позволяющих, с одной стороны, подавлять рекомбинационную активность дислокаций, а с другой – увеличивать их излучательную способность.

Одним из способов управления дефектно-примесными состояниями в полупроводниках является введение в материал водорода. К настоящему времени установлено, что во многих случаях взаимодействие водорода с примесью или дефектом приводит к подавлению их электрической активности. Достаточно хорошо исследован механизм взаимодействия мелких акцепторов и доноров с водородом. Определены основные конфигурации и параметры образующихся водородосодержащих комплексов. Несколько иная ситуация в случае дислокаций. Несмотря на большое число исследований, четкое понимание механизма взаимодействия водорода с дислокациями в кремнии отсутствует. Нет данных о начальной стадии этого взаимодействия при низких температурах, когда водород уже имеет заметную подвижность в решетке кремния и способен попасть в область упругих напряжений дислокации, но при этом еще не взаимодействует с ее ядром. Детали процесса накопления водорода в деформационном поле дислокаций и влияние его на рекомбинационную активность дислокаций остались вне поля зрения исследователей. Данные об энергии связи водорода с дислокациями также скудны. Однако без знаний основных закономерностей процесса взаимодействия водорода с дислокациями, особенно при низких температурах (300-400 К), невозможно создать комплекс технологических операций, способствующих получению приборов на дислокационном кремнии с оптимальными характеристиками. Из всего вышесказанного следует, что тема диссертационной работы Лошаченко А.С. «Взаимодействие водорода с дислокационными сетками сращенных пластин кремния» является безусловно актуальной. Целью работы является установление основных закономерностей взаимодействия водорода с дислокациями в диапазоне температур 300-400 К, когда водород сохраняет свою подвижность, но не вступает в реакции с состояниями вблизи ядра дислокаций.

Структура и краткое содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, обсуждения результатов, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы – 145 страниц печатного текста, в том числе 6 таблиц и 51 рисунок.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и определены задачи, которые надо решить для ее достижения.

Первая глава содержит подробный обзор литературы о природе и типах дислокаций, рассмотрены имеющиеся теоретические и экспериментальные данные о положении в запрещенной зоне энергетических уровней, ассоциированных с

дислокациями, и влиянии на них отжигов при высокой температуре. Приводится обоснование выбора объекта исследований - сращенных кремниевых пластин, интерфейс которых не содержит каких-либо заметных загрязнений переходными металлами, а регулярные дислокационные сетки локализованы параллельно поверхности на очень малой глубине.

Вторая глава посвящена водороду в кремнии. Она весьма информативна. Рассмотренная диссертантом литература свидетельствует об имеющемся на сегодняшний день огромном объеме экспериментальных результатов и теоретических расчетов, описывающих процессы взаимодействия водорода с точечными дефектами в кремнии. В то же время, как следует из представленного обзора, многие детали процесса взаимодействия водорода с дислокациями остаются практически не изученными, что затрудняет полное понимание механизма водородно-дислокационного взаимодействия.

В главе 3 приведено описание технологии изготовления сращенных пластин и способов приготовления образцов для исследования. Дается подробное описание методов исследования: просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), спектроскопии комбинационного рассеяния (КС). Рассмотрена теория жидкостно-химического способа введения водорода и определения концентрационного профиля легирующей примеси из измерения вольт-фарадных характеристик (C-V метод). Приводятся результаты, взятые из литературы, свидетельствующие о влиянии на концентрационный профиль легирующей примеси дрейфа водорода в поле обратно-смещенного барьера Шоттки при повышенной температуре (RVA-процедура). В этой же главе представлены полученные автором с помощью ПЭМ фотографии интерфейса сращенных пластин.

Глава 4 – демонстрация и анализ полученных автором многочисленных экспериментальных результатов по поведению водорода в контрольных образцах и в образцах с интерфейсом сращенных пластин кремния p-типа проводимости, полученных из вольт-фарадных характеристик концентрационных профилей бора после различных RVA-процедур.

В главе 5 для определения конфигурации водорода в окрестности интерфейса сращенных пластин диссертантом проведены дополнительные исследования исходных и прошедших термическую обработку образцов методом спектроскопии комбинационного рассеяния. За счет уменьшения толщины исследуемых пленок Лошаченко А.С. удалось увеличить чувствительность метода почти в 25 раз.

Глава 6 посвящена изучению взаимодействия водорода с электрически активными центрами вблизи и непосредственно в ядре дислокации. На основании сопоставления данных, полученных при измерении DLTS, C-V характеристик и КР, сделано заключение, что энергия связи (H_{BC}^0) с решеткой растет по мере приближения к ядру дислокации и предлагается диаграмма хода потенциала для

миграции водорода в окрестности ядра дислокации, объясняющая полученные экспериментальные результаты.

В заключении формулируются основные результаты. Список литературы содержит 207 наименований.

Результаты работы и их новизна

Использование сращенных кремниевых пластин в качестве объекта исследований и комплекса экспериментальных методов позволило Лошаченко А.С. получить обширную информацию о поведении водорода в кремнии и механизме его взаимодействия с дислокациями. Получено очень много интересных, представляющих научный и практический интерес результатов. Некоторые из них, с нашей точки зрения, заключаются в следующем:

- Установлено, что дислокационная сетка на интерфейсе сращенных пластин кремния является препятствием для миграции водорода в объем кристалла, а окрестность интерфейса характеризуется повышенным коэффициентом сегрегации водорода ($K \approx 20-100$). Впервые показано, что миграция водорода через дислокационную сетку возможна только при отжиге с приложением внешнего электрического поля.
- Выявлено, что отжиги приводят к перераспределению водорода в окрестности ядра дислокации, при этом часть его переходит в ядро дислокации. Последнее проявляется как пассивация дислокационных глубоких уровней.
- Установлено, что водород в области упругих напряжений кристаллической решетки находится в относительно стабильном нейтральном состоянии и локализован в центре связей между атомами кремния $-(H^0_{BC})$.
- Впервые обнаружено наличие слабосвязанного водорода в окрестности дислокаций. Проведены оценки энергии связи водорода с дислокациями при низких температурах
- Предложена новая методика измерения слабых сигналов комбинационного рассеяния от захороненных в объеме материала слоев, основанная на использовании оптического интерференционного усиления в комбинации с методами просвечивающей оптической и электронной микроскопии.

Новизна исследований

Автором четко сформулирована цель диссертационной работы, которая заключается в установлении основных закономерностей взаимодействия водорода с дислокациями в диапазоне температур 300-400 К, когда водород сохраняет свою подвижность, но не вступает с состояниями вблизи ядра дислокаций. Насколько нам известно, ранее такие исследования не проводились и новизна работы заключается в том, что в ней впервые получены данные о характере и параметрах взаимодействия водорода с дислокациями в кремнии при низких температурах.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается их повторением для большого числа образцов, совпадением для контрольных образцов с литературными данными. Проведенные исследования выполнены с использованием современных физических методик. Все утверждения подтверждены ссылками на источники. Выводы основаны на корреляции данных, полученных различными методами в различных условиях. Следует отметить высокий уровень технологической и экспериментальной работы диссертанта.

Научная и практическая значимость результатов

Экспериментальные результаты диссертации и их теоретическое обоснование важны для понимания процесса взаимодействия водорода с дислокациями. Они являются существенным вкладом в науку о дефектно-примесном комплексообразовании в полупроводниках.

Выполненные в диссертации исследования позволяют сделать практические рекомендации по оптимизации технологии солнечных элементов и светоизлучающих структур. Полученные результаты будут востребованы на предприятиях электронной промышленности. Их целесообразно использовать в ИПТМ РАН, ИФФТ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им.Ульянова (Ленина) в рамках проводимых этими организациями исследовательских работ.

Вопросы и замечания по диссертации

- Травление в водном растворе плавиковой кислоты, как известно, приводит к насыщению водородом поверхностных оборванных связей, возникающих при удалении SiO_2 . Возникает вопрос, влияет ли такая пассивация поверхности на процесс гидрогенизации. В диссертации, к сожалению, этот вопрос не рассматривается.
- Величину изгиба зон на поверхности при погружении p-Si в водный раствор плавиковой кислоты определяет, по-видимому, не только уровень E_{RedOx} , как об этом пишет автор (стр. 57), но и поверхностный заряд, возникающий при травлении SiO_2 .
- Удивляют величины «диффузионных потенциалов» для контрольного образца как до RBA (4.3V), так и после (2.3V), которые много больше ширины запрещенной зоны кремния E_g . Возможные причины таких больших значений отсечек от оси абсцисс зависимостей $1/C^2$ от V автор не обсуждаются.
- Используемая автором терминология в некоторых случаях не соответствует принятой в научном мире. Используются английские слова и выражения, не адаптированные на русский язык.
- В тексте диссертации отсутствует сквозная нумерация формул и имеется значительное количество опечаток и ошибок в пунктуации.

Отмеченные недостатки не снижают практическую и научную ценность диссертационной работы и не влияют на обоснованность защищаемых положений.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённое научное исследование, выполненное автором практически самостоятельно и на достаточно высоком уровне. Полученные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Они прошли многократную апробацию на российских и международных конференциях. Список публикаций автора содержит статьи, опубликованные в рецензируемых журналах.

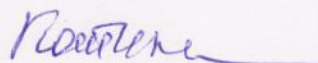
Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (ред. от 02.08 2016г.), её автор, Лошаченко А.С., заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре Отдела полупроводниковых ядерных детекторов (ОПЯД) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ №2/18 от 10.05.18.

Отзыв подготовил

Старший научный сотрудник отдела полупроводниковых ядерных детекторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, кандидат физ.-мат. наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников»



И.М. Котина

Kotina_IM@pnpi.nrcki.ru

Контакты ведущей организации:

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
188300, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1
Тел.: +7 (81371) 460-25, E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru