

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.315.592

КОРОЛИК

Ольга Васильевна

**ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ
ОБРАБОТКИ ВОДОРОДОМ, ГЕЛИЕМ, АРГОНОМ НА СВОЙСТВА
ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Минск, 2010

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель –

Дроздов Николай Александрович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры энергофизики физического
факультета Белорусского государственного
университета.

Официальные оппоненты:

Богатырев Юрий Владимирович,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник
лаборатории радиационных воздействий
Государственного научно-производственного
объединения «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси по
материаловедению».

Горбачук Николай Иванович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры физики полупроводников и
наноэлектроники физического факультета
Белорусского государственного университета.

Оппонирующая организация –

Государственное научное учреждение
«Институт физики им. Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси».

Защита состоится 18 июня 2010 года в 14.00 на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу:
220030, г. Минск, ул. Бобруйская, 5, корпус физического факультета, ауд. 321.

Телефон ученого секретаря 8-017-209-55-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского
государственного университета.

Автореферат разослан «15» мая 2010 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доктор физико-математических наук,
профессор

П.И. Гайдук

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Развитие кремниевой микро- и нанoeлектроники, ориентированное на сокращение размеров активных областей устройств, выдвигает новые требования к параметрам и методам получения функциональных слоев и одновременно повышает роль поверхности в формировании выходных характеристик приборов. В этой связи, развитие методов управления свойствами поверхности, а также способов диагностики ее свойств (в особенности, неразрушающих) имеет безусловную актуальность. Одним из известных способов модификации свойств приповерхностной области материала является ионно-плазменная обработка. Ее влияние в общем случае обусловлено как введением примесных атомов, так и различными процессами, связанными с воздействием ионного пучка (ионное травление, ионно-стимулированная диффузия, формирование разупорядоченных областей вследствие накопления точечных дефектов и т.д.). Поэтому сочетание эффектов ионно-плазменного воздействия с влиянием вводимых в материал из плазменного источника примесей является мощным инструментом, с помощью которого возможно существенно модифицировать свойства приповерхностной области. С другой стороны, одной из важнейших примесей в кремнии является водород. Его способность пассивировать существующие и создавать новые дефекты, влиять на дефектообразование при различных воздействиях (термическом, радиационном) нашли применение в ряде технологий микроэлектроники и фотовольтаики. Одним из распространенных способов гидрогенизации кремния является ионно-плазменная обработка, влияние которой, очевидно, обусловлено как воздействием пучка ионов, так и введением водорода. Глубокое понимание протекающих при этом процессов может быть достигнуто путем сравнительного исследования ионно-плазменных обработок водородом и инертными газами. Сказанное выше говорит об актуальности работы, в которой представлены как результаты сопоставления влияния низкотемпературной низкоэнергетичной ионно-плазменной обработки водородом, гелием и аргоном на свойства пластин кремния, так и новые данные, раскрывающие специфику проявления и природу фотоЭДС в промышленных пластинах кремния.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Диссертационная работа выполнена на кафедре энергофизики Белорусского государственного университета. Тема диссертационной работы соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и приклад-

ных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 годы, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 512 от 17 мая 2005 г., в частности, пунктам 3.3 «структура и свойства кристаллических и неупорядоченных систем, научные основы создания новых магнитных, сегнетоэлектрических, полупроводниковых, сверхпроводящих, квантово-электронных и сверхтвердых материалов»; 7.3 «физические и химические процессы в полупроводниках, тонких слоях и пленках твердого тела и на границах раздела фаз»; 7.4 «методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»; 7.5 «материалы с новыми свойствами, обеспечивающие создание опто-, микро- и нанoeлектронных устройств, схемотехнические решения для построения таких устройств».

Работа проводилась в рамках выполнения следующих программ и отдельных проектов:

1. «Влияние обработки в водородной плазме на параметры кремниевых приборных структур», договор № Ф03М-117 с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, сроки исполнения – 2003-2005 г.г.

2. «Измерение фотоэлектрических характеристик базовых конструкций фотодиодов и исследование изменения этих характеристик при обработке фотодиодных структур в водородной плазме», договор с ИЭ НАН Беларуси от 10 января 2005 года, сроки исполнения – 2005 г.

3. «Исследование процессов формирования наноструктур на поверхности кремния при водородо-плазменном, химическом и плазмохимическом воздействии», задание № 6.08 ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии», сроки исполнения – 2006-2010 г.г.

4. «Разработка нового низкотемпературного способа формирования диэлектрических слоев оксида кремния нанометровых толщин», договор № Т08-157 с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, сроки исполнения – 2008-2010 г.г.

Цель и задачи исследования. *Целью* работы является установление особенностей влияния ионно-плазменной обработки водородом, гелием, аргонном на электрические, фотоэлектрические свойства пластин кремния и структуру их приповерхностной области, а также выявление закономерностей и механизмов формирования сигнала фотоЭДС промышленных пластин монокристаллического кремния.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

1. Установление влияния на спектры фотоЭДС промышленных пластин кремния Чохральского разного типа проводимости и уровня легирования облучения высокоэнергетичными электронами и химического травления поверхности.

2. Изучение трансформации электрофизических параметров пластин кремния разного типа проводимости и уровня легирования в результате низкотемпературной (от 25 до 350 °С) низкоэнергетичной (300 эВ) ионно-плазменной обработки водородом, гелием, аргоном.

3. Изучение влияния ионно-плазменной обработки водородом, гелием, аргоном на структуру приповерхностной области пластин кремния.

4. Сравнительный анализ влияния ионно-плазменной обработки различными ионами (водородом, гелием, аргоном) на электрофизические и структурные свойства пластин кремния и построение моделей, объясняющих наблюдаемые эффекты.

Объектом исследования являлись промышленные пластины монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, как исходные, так и прошедшие низкотемпературную низкоэнергетичную ионно-плазменную обработку водородом, гелием, аргоном.

Предметом исследования являлись электрофизические, фотоэлектрические и структурные свойства исходных и прошедших ионно-плазменную обработку пластин кремния.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Установленные особенности спектров фотоЭДС промышленных пластин кремния, выращенного по методу Чохральского, заключающиеся в формировании наряду с известной полосой барьерной фотоЭДС составляющей с максимумом на длине волны 1160-1170 нм и полушириной 41-45 нм, а также разработанная модель ее формирования, учитывающая фотоиндуцированные переходы «зона - поверхностный уровень», переходы «зона - зона», диффузионное разделение и взаимодействие возбужденных носителей заряда.

2. Установленная общность влияния ионно-плазменной обработки водородом, гелием или аргоном (энергия ионов 300 эВ, температура от 25 до 350 °С, длительность 30 мин) на свойства пластин кремния, связанная с формированием собственных структурных нарушений и состоящая в том, что

- поверхностное сопротивление, знак термоЭДС, форма вольт-фарадных характеристик для пластин n-типа сохраняются, а сигнал барьерной фотоЭДС уменьшается, как минимум, на два-три порядка величины;
- для пластин p-типа на обработанной стороне поверхностное сопротивление увеличивается на два порядка, изменяется знак термоЭДС, возникает сигнал барьерной фотоЭДС;
- вне зависимости от типа проводимости пластин возникает приповерхностный слой, обогащенный кислородом, толщиной до 10 нм с показателем преломления 1,7-2,6.

3. Установленные особенности влияния ионно-плазменной обработки водородом на свойства пластин кремния, проявляющиеся в смене вида вольт-фарадных характеристик пластин КДБ 40, прошедших обработку при 300-350 °С, а также в уменьшении толщины обогащенного кислородом слоя, формируемого на поверхности, с ростом температуры обработки до 300-350 °С, что связано с возможностью взаимодействия атомов водорода и кислорода в кремнии.

Личный вклад соискателя. Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены лично соискателем. Работа выполнялась под руководством кандидата физико-математических наук, доцента Дроздова Н.А., которым были сформулированы научная идея и основные задачи исследования. Соавторы приведенных публикаций участвовали в проведении технологических обработок исследованных образцов и отдельных измерений. Оже-профилометрия была выполнена совместно с В.А. Уховым, эллипсометрия – совместно с Н.А. Крекотень, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия – совместно с С.П. Кобелевой, спектроскопия ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения – С.Ю. Турищевым. Квантовохимические расчеты атомной и электронной структуры кластеров кремния, содержащих атомы водорода и кислорода, были выполнены А.Л. Пушкарчуком и В.А. Пушкарчуком.

Апробация результатов исследований. Результаты проведенных исследований докладывались на следующих конференциях:

- Международная научная конференция “Тонкие пленки и наноструктуры”, 7–10 сентября 2004 г., Москва, Россия,
- 4th International Conference “New electrical and electronic technologies and their industrial implementation”, 21–24 June 2005, Zakopane, Poland,
- 3-ая Российская школа ученых и молодых специалистов по физике, материаловедению и технологии получения кремния и приборных структур на его основе «Кремний. Школа-2005», 04–07 июля 2005 г., Москва, Россия,
- 6th International Conference “Ion implantation and other applications of ions and electrons”, 26–29 June 2006, Kazimierz Dolny, Poland,
- 12th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors, 9 –13 September 2007, Berlin, Germany,
- Международная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела», 23–26 октября 2007 г., Минск, Беларусь,
- 4-ая Российская конференция с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе (Кремний-2007), 03–06 июля 2007 г., Москва, Россия,

- o 12th International Conference “Gettering and defect engineering in semiconductor technology”, 14–19 October 2007, Erice, Italy,
- o 7th International Conference “Ion implantation and other applications of ions and electrons”, 16–19 June 2008, Kazimierz Dolny, Poland,
- o 1-я Международная конференция “Наноструктурные материалы-2008: Беларусь – Россия – Украина”, 22–25 апреля 2008 г., Минск, Беларусь,
- o International meeting “Nanostructured systems: Technology – Structure – Properties – Applications”, 13–16 October 2008, Uzhgorod, Ukraine,
- o International conference “Nanomeeting-2009”, 26–29 May 2009, Minsk, Belarus,
- o 6th International Conference “New electrical and electronic technologies and their industrial implementation”, 23–26 June 2009, Zakopane, Poland,
- o 23rd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors, 23–28 August 2009, Utrecht, Netherlands,

а также на отчетных конференциях ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии» и научных семинарах кафедры энергофизики БГУ.

Опубликованность результатов. По результатам исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 19 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом около 2,5 авторских листов, 3 статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций, 2 статьи в сборниках научных трудов и 7 тезисов докладов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 133 страницы. В работе приведено 57 рисунков, занимающих 19 страниц, 18 таблиц на 4 страницах. Библиографический список состоит из списка использованных источников, содержащего 160 наименований на 11 страницах, и списка публикаций соискателя, содержащего 19 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** проводится анализ сведений о поведении водорода в кристаллическом кремнии. Рассматриваются возможные состояния водорода в решетке, взаимодействие с легирующими примесями, кислородом, радиационными дефектами, границами зерен, дислокациями, а также электрически активные и неактивные дефекты, возникающие в результате введения водорода в кри-

сталл. Указывается, что при анализе механизмов воздействия плазменной гидрогенизации на электрофизические свойства пластин кремния наблюдаемые результаты, как правило, связываются со специфическим поведением водорода в решетке, в то время как процессы, связанные с воздействием ионного пучка на приповерхностную область материала, зачастую не принимаются во внимание.

Рассматриваются наиболее распространенные и информативные методы анализа свойств кремния. Отмечается, что несмотря на развитую теорию фотоЭДС в полупроводниках, специфика ее проявления в реальных кристаллах кремния требует дополнительного исследования.

На основании проведенного анализа литературных данных формулируются цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приведено описание исследованных образцов, процесса ионно-плазменной обработки и использованных методов исследования. В качестве объектов исследования использовались промышленные пластины кремния, выращенного по методу Чохральского, толщиной 0,4-0,55 мм, n- и p-типов проводимости удельным сопротивлением от 0,5 до 40 Ом·см со стандартной обработкой поверхностей (механическая и химическая полировка рабочей стороны, механическая полировка или шлифовка противоположной стороны). Содержание кислорода в пластинах, определенное методом ИК-поглощения, составляло $(4-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Пластины нарезались на образцы размером $1 \times 1,5 \text{ см}^2$.

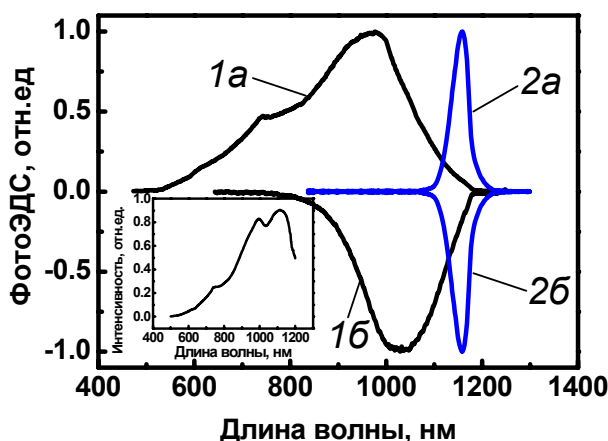
Ионно-плазменные обработки водородом, гелием и аргоном проводились в диапазоне температур от комнатной до 350 °С в течение 30 мин. Энергия ионов и плотность тока составляли соответственно 300 эВ и 0,15 мА/см².

Измерения спектров фотоЭДС пластин кремния проводились с помощью установки, реализованной на основе монохроматора МДР23. Спектральное разрешение при измерениях спектров фотоЭДС составляло не более 5 нм. Тип проводимости прошедших обработку пластин определялся по знаку термоЭДС. Поверхностное сопротивление определялось четырехзондовым методом с помощью стандартного измерителя ИУС-3. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись с использованием цифровых вольтметров В7-45 и В7-54, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) – приборами Agilent E4980A и Agilent 4285A. При этом на тыльной поверхности пластин формировался сплошной омический контакт, а в качестве контакта к рабочей стороне использовался прижимной зонд. При измерении ВФХ устанавливалась параллельная схема замещения C_p - R_p , амплитуда и частота переменного сигнала соответственно составляли 40 мВ и 100 кГц. Распределение концентраций атомов кремния и кислорода по глубине пластин, прошедших ионно-плазменную обработку, определялось с помощью сканирующего оже-микронзонда PHI-660 (Perkin Elmer). Рентгеновские фотоэлектронные спектры были сняты на установке

ESCALAB MK II ($Al_{K\alpha}$). Показатель преломления и толщина слоев, сформированных на поверхности пластин в результате ионно-плазменных обработок, определялись методом эллипсометрии (эллипсометр ЛЭМ-3М, длина волны 632,8 нм, угол падения 70° и 73°).

В третьей главе представлены результаты исследования спектров фотоЭДС исходных промышленных пластин монокристаллического кремния.

Экспериментально обнаружено, что в пластинах кремния n- и p-типа проводимости удельным сопротивлением от 0,5 до 40 Ом·см при освещении одной из сторон светом в диапазоне длин волн 400 – 1225 нм и присоединении прижимных контактов к освещаемой и противоположной сторонам (контакты располагаются вне области освещения) регистрируется сигнал фотоЭДС, в спектрах которого в общем случае имеются две составляющие (рисунок 1).



кривые 1а, 2а – освещение с рабочей стороны; кривые 1б, 2б – освещение с тыльной стороны; на вставке – спектр излучения использованной лампы

Рисунок 1 – Спектры фотоЭДС исходных пластин кремния, нормированные на максимум сигнала

Для исходных исследованных пластин форма линии спектра первой составляющей (кривые 1а и 1б на рисунке 1) аналогична линии спектра фотоЭДС мелкого p-n перехода и зависит от типа освещаемой поверхности пластины, а знак сигнала – как от типа освещаемой поверхности, так и от типа проводимости пластины. Для пластин, подвергнутых облучению электронами с энергией 3,5 МэВ, с ростом флюенса до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ интенсивность сигнала уменьшается в несколько десятков раз, а максимум в спектре смещается в область

коротких или длинных волн при освещении пластины с рабочей или тыльной сторон, соответственно. Перечисленные выше экспериментальные факты позволяют утверждать, что данная составляющая есть барьерная фотоЭДС, обусловленная изгибом зон вблизи поверхности кристалла.

Вторая составляющая в спектрах фотоЭДС (кривые 2а и 2б на рисунке 1) представляет собой узкую (полуширина 41-45 нм) линию, максимум которой располагается на длине волны 1160-1170 нм, а длинноволновая граница превышает значение, соответствующее оптической ширине запрещенной зоны кремния (1175 нм при комнатной температуре), и достигает 1220-1225 нм. На облу-

ченных электронами пластинах с увеличением флюенса до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ форма линии спектра сохраняется, а интенсивность изменяется в пределах нескольких десятков процентов. Форма линии спектра второй составляющей не может быть описана известными соотношениями для спектральной зависимости фотоЭДС барьерной структуры ни при каких параметрах диффузионной длины и скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда, что указывает на ее небарьерную природу. Возникновение этой составляющей объясняется фотоиндуцированными переходами «зона - поверхностный уровень» и диффузионным разделением генерируемых при этом свободных и возбужденных на локализованные состояния носителей. Быстрый спад сигнала фотоЭДС с уменьшением длины волны обусловлен начинающимися переходами «зона-зона», генерирующими свободные электроны и дырки, что приводит к уменьшению напряженности поля, созданного диффузионным разделением носителей.

В четвертой главе приведены результаты сравнительного исследования влияния ионно-плазменной обработки водородом, гелием и аргоном на электрофизические свойства пластин кремния.

Обнаружено, что ионно-плазменная обработка как водородом, так и гелием или аргоном при температурах от 25 до 350 °С приводит к изменению знака термоЭДС на обработанной поверхности пластин р-типа, в то время как для пластин n-типа знак термоЭДС при аналогичной обработке сохраняется. При этом для пластин р-типа на обработанной стороне поверхностное сопротивление увеличивается на один-два порядка величины, в то время как величина поверхностного сопротивления пластин n-типа после ионно-плазменных обработок, проведенных в использованных режимах, остается прежней.

Обнаружено, что ионно-плазменная обработка пластин кремния n-типа водородом, гелием или аргоном приводит к резкому (как минимум, на два-три порядка величины) уменьшению величины сигнала фотоЭДС и исчезновению сигнала в коротковолновой (менее 900 нм) области. Для пластин кремния р-типа, прошедших аналогичную ионно-плазменную обработку, наблюдается столь же резкое (приблизительно на один-три порядка величины) увеличение интенсивности сигнала фотоЭДС и изменение формы спектра: в отличие от исходных пластин, фотоЭДС наблюдается в широком спектральном диапазоне (500-1200 нм). Это означает, что ионно-плазменная обработка пластин р-типа водородом, гелием или аргоном приводит к формированию потенциального барьера на обработанной поверхности.

Общность влияния ионно-плазменной обработки различными ионами (водород, гелий или аргон) объясняется совместным протеканием следующих процессов, обусловленных воздействием ионного пучка: ионным травлением тонкого (несколько нанометров) поверхностного слоя; формированием тонкого

приповерхностного аморфизованного слоя; созданием положительного поверхностного заряда; генерацией междоузельных атомов кремния. Влияние ионно-плазменной обработки на свойства пластин р-типа определяется формированием приповерхностного аморфизованного слоя и, как следствие, барьерной гетероструктуры “ α -Si/c-Si”; формированием обедненного/инверсного слоя вследствие создания положительного поверхностного заряда; вытеснением атомов бора из узлов решетки в электрически неактивное междоузельное положение атомами Si_i. Исчезновение сигнала фотоЭДС в пластинах n-типа после ионно-плазменной обработки объясняется ионным травлением слоя, формирующего барьерную фотоЭДС в исходных пластинах, и возникновением обогащенной области вследствие создания положительного поверхностного заряда.

Обнаружено, что поперечные ВФХ пластин кремния, прошедших ионно-плазменную обработку водородом в использованных режимах, качественно схожи с ВФХ структур «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП). Для пластин марки КЭФ4,5 форма ВФХ соответствует ВФХ МДП-структуры на подложке n-типа. Вид ВФХ пластин р-типа, прошедших ионно-плазменную обработку водородом, зависит от уровня легирования. ВФХ пластин КДБ12 вне зависимости от температуры обработки соответствуют ВФХ МДП-структуры на подложке р-типа. Для пластин марки КДБ40, прошедших обработку при комнатной температуре, форма ВФХ соответствует ВФХ МДП-структуры на подложке р-типа (рисунок 2а), однако после ионно-плазменной обработки водородом при 300-350 °С измеряемые ВФХ соответствуют ВФХ МДП-структур на подложке n-типа (рисунок 2б).

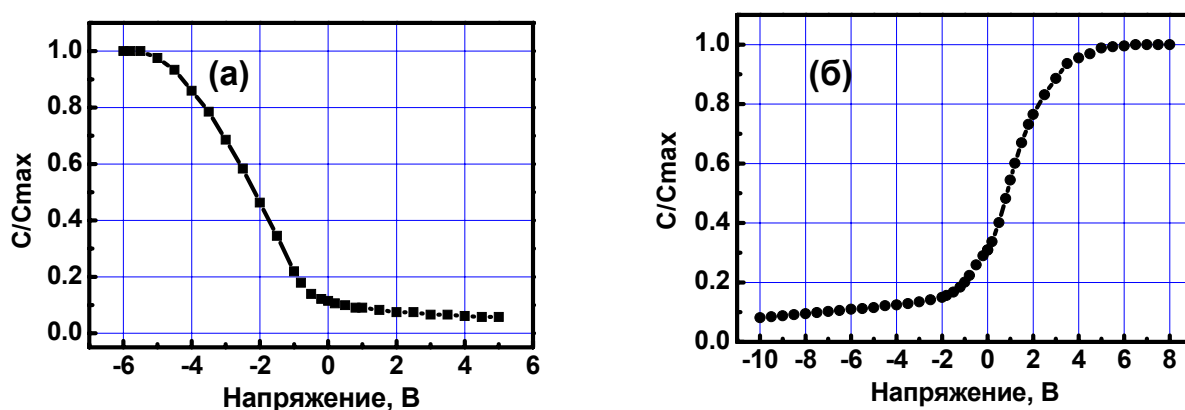


Рисунок 2 – Вольт-фарадные характеристики пластин кремния КДБ40, прошедших ионно-плазменную обработку водородом при 25 °С (а) и 335 °С (б) в течение 30 мин

Для пластин р-типа, прошедших ионно-плазменную обработку ионами He^+ или Ar^+ , вне зависимости от уровня легирования и температуры обработки наблюдаются ВФХ, характерные для МДП-структур с подложкой р-типа.

Наблюдаемые изменения формы ВФХ пластин кремния КДБ40 при повышении температуры ионно-плазменной обработки водородом указывают на появление в них приповерхностного слоя n-типа вследствие формирования мелких доноров, что приводит к перекомпенсации материала из р- в n-тип. Отсутствие такой перекомпенсированной области n-типа в пластинах КДБ12 объясняется большей концентрацией акцепторов в данном материале. В качестве мелких доноров, наиболее вероятно, выступают мелкие кислородные термодоноры, водородностимулированное образование которых при данных температурах известно из литературы.

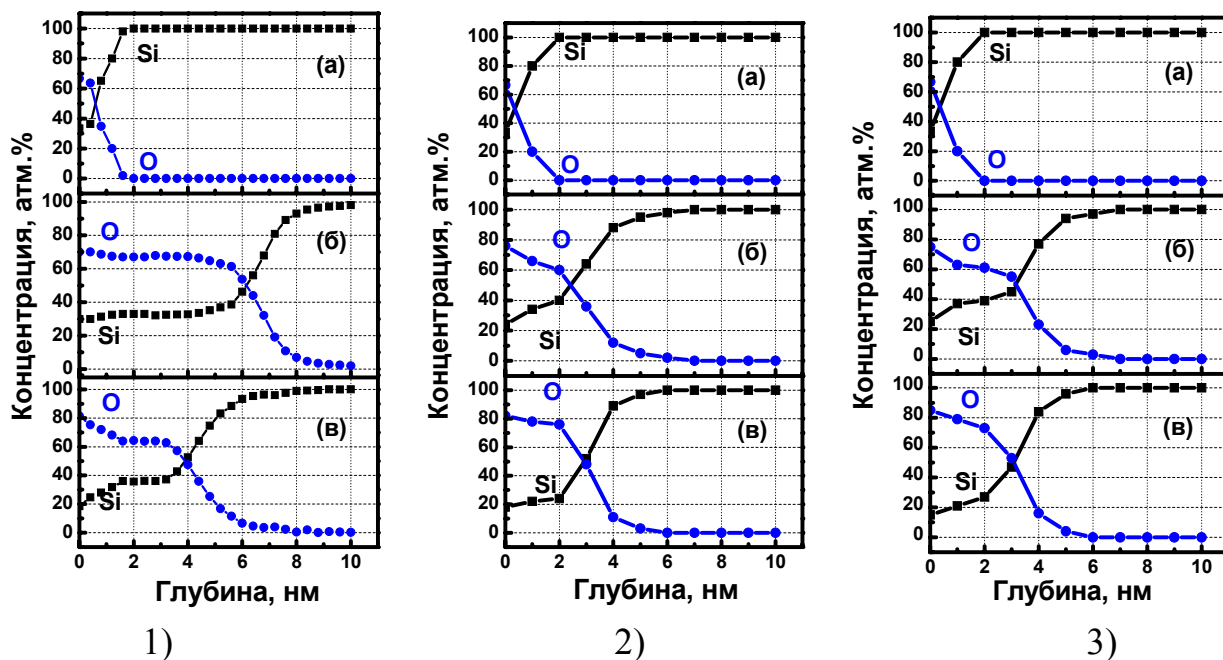
Обобщение экспериментальных результатов данной главы позволило установить существование двух механизмов влияния ионно-плазменной обработки на электрофизические параметры пластин кремния. Первый из них проявляется вне зависимости от типа ионов и температуры обработки и связан с воздействием на материал ионного пучка. Второй механизм реализуется только в случае ионно-плазменной обработки водородом при повышенной (более 300 °С) температуре и заключается в формировании приповерхностного n-слоя вследствие водородно-стимулированного введения в материал комплексов донорного типа.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния низкотемпературной низкоэнергетичной ионно-плазменной обработки на структуру приповерхностной области пластин кремния.

Методом оже-электронной спектроскопии в сочетании с ионным травлением обнаружено, что ионно-плазменная обработка пластин кремния водородом, гелием или аргоном при температурах от 25 до 350 °С приводит к формированию на их поверхности слоя, обогащенного кислородом (рисунок 3). Для пластин, обработанных ионами водорода, в приповерхностной области толщиной 4 – 10 нм соотношение концентраций кислорода и кремния постоянно и соответствует стехиометрическому диоксиду кремния. В пластинах, обработанных гелием или аргоном, концентрация кислорода монотонно уменьшается с глубиной.

Измерения рентгеновских фотоэлектронных спектров показали, что ионно-плазменная обработка водородом изменяет соотношение интенсивностей линий $I_{\text{SiO}_2}/I_{\text{Si}}$, соответствующих 2р-электронам окисленного и неокисленного кремния. Соотношение $I_{\text{SiO}_2}/I_{\text{Si}}$ в результате ионно-плазменной обработки водородом увеличивается по сравнению с исходными образцами, причем обработка при 25 °С увеличивает соотношение $I_{\text{SiO}_2}/I_{\text{Si}}$ в среднем в 50 раз, а обработка при

335 °С – в 35 раз. Это означает ослабление эффекта образования обогащенного кислородом слоя с ростом температуры ионно-плазменной обработки водородом.



- 1) – в исходной пластине кремния КДБ12;
 (б) – в пластине КДБ12, прошедшей ионно-плазменную обработку водородом (1), гелием (2), аргоном (3) при температуре 25 °С;
 (в) – в пластине КДБ12, прошедшей ионно-плазменную обработку водородом (1), гелием (2), аргоном (3) при температуре 325-350 °С

Рисунок 3 – Концентрационные профили кремния и кислорода, определенные методом оже-электронной спектроскопии

Методом эллипсометрии обнаружено, что показатель преломления обогащенных кислородом слоев, сформированных на поверхности пластин кремния в результате ионно-плазменной обработки, не зависит от типа проводимости и удельного сопротивления пластин и лежит в пределах от 1,7 до 2,6, т.е. существенно превышает показатель преломления термически выращенного диоксида кремния (1,4-1,55). Это может быть объяснено наличием переходной области между слоем состава SiO_2 и кремниевой подложкой.

Измерение поперечных ВАХ с использованием прижимного зонда показало, что ионно-плазменная гидрогенизация пластин кремния в изученных режимах приводит к уменьшению их поперечной проводимости вне зависимости от типа проводимости и полярности приложенного напряжения, как правило, на один-три порядка величины. Следовательно, наблюдаемое уменьшение проводимости не связано с возникновением/пассивацией электрически активных дефектов, а обусловлено формированием на поверхности пластин слоя, прояв-

ляющего диэлектрические свойства. Определенная из поперечных ВАХ величина удельного сопротивления обогащенного кислородом слоя, сформированного в результате ионно-плазменной обработки водородом при комнатной температуре, может достигать $(5-10) \cdot 10^{12}$ Ом·см.

С помощью программы SRIM-2008 были оценены профили распределения ионов водорода, гелия и аргона, а также генерируемых ими собственных точечных дефектов по глубине пластин. Расчеты показали, что количество вакансий, создаваемых ионами водорода, гелия и аргона с энергией 300 эВ, составляет соответственно 0,3, 3,5 и 5,8. С учетом использованного в экспериментах флюенса ионов (порядка 10^{18} см⁻²) и малой (несколько нанометров) глубины их проецированного пробега можно сделать вывод о возникновении в пластинах разупорядоченной приповерхностной области вследствие накопления точечных дефектов, что находится в согласии с результатами исследования ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения. Можно предположить, что такой разупорядоченный слой способен легко окисляться за счет взаимодействия как с остаточным кислородом в вакуумной камере, так и с атмосферным кислородом после извлечения обработанных образцов из камеры.

Методом оже-профилометрии обнаружено, что повышение температуры ионно-плазменной обработки пластин кремния ионами гелия или аргона от 25 до 350 °С не влияет на толщину формируемого слоя, обогащенного кислородом, в то время как толщина слоя, возникающего в результате ионно-плазменной обработки водородом, уменьшается (рисунок 3). На основании этого с учетом результатов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии установлено, что повышение температуры ионно-плазменной обработки водородом ослабляет эффект окисления кремния. Данный факт объясняется диффузионным оттоком водорода из приповерхностной области с ростом температуры и означает, что окисление происходит более интенсивно при наличии водорода в разупорядоченном кремнии. Это находится в согласии с квантовохимическими расчетами структуры кластеров кремния, содержащих атомы водорода и кислорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Обнаружено, что в промышленных пластинах монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, удельным сопротивлением от 0,5 до 40 Ом·см регистрируется сигнал фотоЭДС, в спектрах которого в общем случае наряду с известной полосой барьерной фотоЭДС присутствует линия с максимумом на длине волны 1160-1170 нм и полушириной 41-45 нм, длинноволновая граница которой превышает значение, соответствующее оптической ширине запрещенной зоны кремния (1175 нм при комнатной температуре), и достигает 1220-1225 нм. При изменении освещаемой стороны пластины (рабочая или тыльная) форма обнаруженной линии остается постоянной, в отличие от формы спектра барьерной фотоЭДС. Облучение пластин кремния высокоэнергетичными (3,5 МэВ) электронами флюенсом до $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ не влияет на спектральную форму, положение в спектре и полуширину обнаруженной линии, в то время как спектр сигнала барьерной фотоЭДС изменяется в соответствии с известным уменьшением диффузионной длины носителей заряда [1-А, 2-А, 10-А, 14-А, 15-А, 16-А].

2. Разработана модель формирования узкой линии в спектрах фотоЭДС пластин кремния, заключающаяся в том, что появление сигнала обусловлено фотоиндуцированными переходами «зона - поверхностный уровень» и диффузионным разделением генерируемых при этом свободных и возбужденных на локализованные состояния носителей заряда; электронно-дырочные пары, генерируемые в результате переходов «зона-зона», уменьшают напряженность поля, созданного диффузионным разделением носителей, что влечет за собой уменьшение сигнала.

Предложенная модель объясняет особенности обнаруженной фотоЭДС: красную границу спектра, смещенную в область длинных (1220-1225 нм) волн, (вследствие участия в ее формировании переходов «зона - поверхностный уровень»); отсутствие сигнала в области коротких волн (вследствие подавления поля, созданного диффузионным разделением носителей, генерируемыми электронно-дырочными парами); сохранение формы линии и ее положения в спектре при изменении освещаемой поверхности (из-за малости коэффициента поглощения света в данном спектральном диапазоне) [3-А, 4-А, 16-А].

3. Обнаружено, что ионно-плазменная обработка пластин монокристаллического кремния р-типа водородом, гелием или аргоном (энергия ионов 300 эВ, температура от 25 до 350 °С, длительность 30 мин) приводит к изменению знака термоЭДС и увеличению на один-два порядка поверхностного сопротивления

на обработанной поверхности, а также к появлению в широком спектральном диапазоне (500-1200 нм) сигнала фотоЭДС, величина которого на один-три порядка больше, чем в исходных пластинах. Для пластин n-типа при аналогичной обработке знак термоЭДС и поверхностное сопротивление не изменяются, а фотоЭДС уменьшается, как минимум, на два-три порядка, причем в коротковолновой (менее 900 нм) области сигнал исчезает.

Общность влияния ионно-плазменной обработки на свойства пластин р-типа определяется формированием тонкого приповерхностного аморфизованного слоя и, как следствие, гетероструктуры “*a*-Si/*c*-Si”; формированием обедненного/инверсного слоя вследствие создания положительного поверхностного заряда. В пластинах n-типа исчезновение сигнала фотоЭДС в результате ионно-плазменной обработки обусловлено ионным травлением слоя, формирующего барьерную фотоЭДС в исходных пластинах, и возникновением обогащенной области вследствие создания положительного поверхностного заряда [1-А, 2-А, 4-А, 6-А, 7-А, 12-А, 13-А, 17-А, 19-А]. Данные представления согласуются с известными моделями взаимодействия ионных пучков с кристаллами.

4. Методом оже-электронной спектроскопии при послойном стратифицировании обнаружено, что ионно-плазменная обработка пластин кремния как водородом, так и гелием или аргоном при температурах от 25 до 350 °С приводит к формированию приповерхностного слоя, обогащенного кислородом. Толщина слоя максимальна в пластинах, обработанных ионами водорода, причем в приповерхностной области толщиной 4-10 нм соотношение концентраций кислорода и кремния постоянно и соответствует стехиометрическому диоксиду кремния. В пластинах, обработанных гелием или аргоном, концентрация кислорода монотонно уменьшается с глубиной. Методом монохроматической эллипсометрии обнаружено, что показатель преломления сформированных слоев лежит в пределах 1,7-2,6, что превышает показатель преломления диоксида кремния (1,4-1,55). Измерение поперечных вольт-амперных характеристик показало, что ионно-плазменная обработка водородом приводит к уменьшению поперечной проводимости пластин кремния р- и n-типа при любой полярности приложенного напряжения на один-три порядка величины.

Формирование слоя, обогащенного кислородом, на поверхности пластин кремния связано с возникновением разупорядоченной области при ионно-плазменной обработке. Возникновение такой области согласуется с расчетами по программе SRIM-2008, основанной на известных моделях взаимодействия ионов с конденсированными средами [5-А, 6-А, 7-А, 8-А, 9-А, 11-А, 12-А, 13-А, 17-А, 18-А, 19-А].

5. Обнаружено, что поперечные вольт-фарадные характеристики пластин кремния р-типа марки КДБ40, прошедших ионно-плазменную обработку водо-

родом при температуре 300-350 °С, качественно схожи с вольт-фарадными характеристиками структур «металл-диэлектрик-полупроводник» на подложке n-типа, в то время как после обработки гелием или аргоном наблюдаются характеристики, соответствующие структурам «металл-диэлектрик-полупроводник» на подложке p-типа.

На основании измеренных вольт-фарадных характеристик установлено, что изменение типа проводимости приповерхностной области пластин кремния КДБ40 с p- на n- дополнительно обусловлено введением донорных центров. В качестве комплексов донорного типа, ответственных за перекомпенсацию, могут выступать мелкие кислородные термодоноры, что согласуется с известным водородностимулированным образованием их при данных температурах.

Таким образом, измерение вольт-фарадных характеристик с учетом термоЭДС, поверхностного сопротивления и спектров фотоЭДС позволяет выделить специфику влияния ионно-плазменной обработки водородом при температуре 300-350 °С на электрофизические параметры кремниевых пластин, состоящую в том, что наряду с воздействием на материал ионного пучка происходит формирование приповерхностной области, легированной донорами [6-А, 12-А, 17-А, 19-А].

6. Методом оже-электронной спектроскопии при послойном стравливании обнаружено, что при повышении температуры ионно-плазменной обработки пластин кремния водородом от 25 до 350 °С толщина формируемого обогащенного кислородом слоя уменьшается, в то время как толщина слоя, возникающего в результате обработки гелием или аргоном, остается постоянной. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии обнаружено, что в результате ионно-плазменной обработки водородом увеличивается соотношение интенсивностей линий I_{SiO_2}/I_{Si} , соответствующих 2p-электронам окисленного и неокисленного кремния, причем обработка при 25 °С увеличивает соотношение I_{SiO_2}/I_{Si} в среднем в 50 раз, а обработка при 335 °С – в 35 раз.

На основании этого установлено ослабление эффекта образования обогащенного кислородом слоя при повышении температуры ионно-плазменной обработки водородом, что обусловлено уменьшением толщины насыщенной водородом области, способной к ускоренному окислению, за счет увеличения его диффузионного оттока [5-А, 6-А, 9-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Наличие обнаруженной линии в спектрах фотоЭДС может быть использовано для диагностики качества поверхности кремниевых пластин, в частности, для диагностики поверхностных электронных состояний. Эффект формирования приповерхностного слоя, обогащенного кислородом, в процессе ионно-плазменной обработки может служить основой для разработки нового технологического подхода к созданию диэлектрических слоев на поверхности пластин кремния при низких температурах.

Результаты работы могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами физики кремния и кремниевой микроэлектронной технологии. В Республике Беларусь это ОАО «Интеграл», ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», БГУИР.

Результаты исследования используются при чтении спецкурса «Современные методы исследования материалов», «Основы твердотельной электроники» студентам кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, внедрены в лабораторный практикум кафедры и могут быть включены в программу аналогичных спецкурсов и лабораторных практикумов других высших учебных заведений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1-А. Влияние низкотемпературной гидрогенизации на спектры фотоЭДС пластин кремния / Н.А. Дроздов, О.В. Зинчук (Королик), А.В. Мазаник, А.К. Федотов, С.В. Чигирь // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2006. – №1. – С. 46–51.

2-А. Photoresponse of hydrogen plasma treated and electron irradiated silicon wafers / O. Zinchuk (Korolik), N. Drozdov, A. Mazanik, A. Fedotov, P. Żukowski, J. Partyka, P. Węgierek, T. Kołtunowicz // Vacuum. – 2007. – Vol. 81. – P. 1332–1336.

3-А. Спектры фотоЭДС промышленных пластин кремния / Н.А. Дроздов, О.В. Зинчук (Королик), А.В. Мазаник, А.К. Федотов // Материалы электронной техники. – 2007. – №4. – С. 66–69.

4-А. Influence of low-temperature Argon ion-beam treatment on the photovoltage spectra of standard Cz Si wafers / A.M. Saad, O.V. Zinchuk (Korolik), N.A. Drozdov, A.K. Fedotov, A.V. Mazanik // Solid State Phenomena. – 2008. – Vols. 131–133. – P. 333–338.

5-А. Formation of insulating oxygen-containing layer on the silicon wafer surface using low-temperature hydrogenation / O. Zinchuk (Korolik), A. Saad, N. Drozdov, A. Fedotov, S. Kobeleva, A. Mazanik, A. Patryn, V. Pilipenko, A. Pushkarchuk // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2008. – Vol. 19. – P. 273–276.

6-А. Effect of the hydrogen and argon ion-beam treatments on the structural and electrical properties of Cz Si wafers: comparative study / O. Zinchuk (Korolik), N. Drozdov, A. Fedotov, A. Mazanik, N. Krekotsen, V. Ukhov // Vacuum. – 2009. – Vol. 83. – P. S99–S102.

7-А. Quantum chemical modelling of Si sub-surface amorphisation due to incorporation of H atoms and its stabilisation by O atoms / A. Pushkarchuk, A. Saad, V. Pushkarchuk, A. Fedotov, A. Mazanik, O. Zinchuk (Korolik), S. Turishchev // Physica status solidi (c). – 2010. – №. 3-4. – P. 650–653.

Статьи в сборниках научных трудов

8-А. Влияние низкоэнергетичной ионно-лучевой обработки водородом на свойства пластин кремния / Н.А. Дроздов, О.В. Зинчук (Королик), С.П. Кобелева, Ю.С. Ковалев, А.В. Мазаник, С.И. Тютюнников, А.К. Федотов, С.В. Чигирь // Сб. науч. тр. / ГрГУ, под ред. Маскевича С.А. [и др.]. – Гродно, 2005. – Вып.

4: Низкоразмерные системы-2: Физико-химия элементов и систем с низкоразмерным структурированием (получение, диагностика, применение новых материалов и структур). – С. 148–153.

9-А. Формирование диэлектрического кислородсодержащего слоя на поверхности пластин кремния Чохральского в результате низкоэнергетичной низкотемпературной гидрогенизации / О.В. Зинчук (Королик), А.В. Мазаник, А.Л. Пушкарчук, В.А. Пушкарчук, В.А. Ухов, А.К. Федотов // Сб. науч. тр. / Нац. Акад. Наук Беларуси, Науч.-практ. Центр НАН Беларуси по материаловедению, под ред. Витязя П.А. (отв. ред), Лабунова В.А. и Урбановича В.С. – Минск: Белорус. Навука, 2009. – С. 124–130.

Статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций

10-А. Surface photovoltage in Silicon – “dry” and “wet” phenomenological properties / N.A. Drozdov, O.V. Zinchuk (Korolik), A. Patrin, L. Bychto, G. Iieczko // New electrical and electronical technologies and their industrial implementation (NEET'2005): proc. of 4th International conference, Poland, Zakopane, 21–24 June 2005 / Lublin University of Techn.; edit.: P. Węgierek, T. Kołtunowicz. – Lublin, 2005. – P. 284–286.

11-А. Моделирование методом функционала плотности структурных параметров приповерхностных слоев кремния, легированных атомами водорода / А.Л. Пушкарчук, В.А. Пушкарчук, О.В. Зинчук (Королик), А.В. Мазаник, В.А. Пилипенко, А.К. Федотов // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ 2007): сборник докладов Международной научной конференции, Беларусь, Минск, 23–26 октября 2007 г.: в 3 т. / НАН Беларуси, Объед. ин-т физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 90–92.

12-А. Zinchuk (Korolik), O.V. Modification of the Cz silicon wafer properties by low-energy low-temperature hydrogen ion-beam treatment / O.V. Zinchuk (Korolik), A.L. Pushkarchuk, A.V. Mazanik // Physics, chemistry and application of nanostructures (Nanomeeting – 2009): proc. of International conference, Belarus, Minsk, 26–29 May 2009/ edit.: V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. – Minsk, 2009. – P. 398 – 401.

Тезисы докладов конференций

13-А. Трансформация поверхности кремния при воздействии низкоэнергетичной ионно-лучевой обработки водородом / Н.А. Дроздов, О.В. Зинчук (Королик), С.П. Кобелева, Ю.С. Ковалев, С.И. Тютюнников, А.К. Федотов, С.В. Чигирь, В.А. Яковлев // Тонкие пленки и наноструктуры (ПЛЕНКИ – 2004): материалы Международной научной конференции, Россия,

Москва, 7–10 сентября 2004.: в 2 ч. / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики; редколлегия: А.С. Сигов [и др.]. – Москва, 2004. – С. 163.

14-А. Зинчук (Королик), О.В. Спектры фотоЭДС исходных и гидрогенизированных пластин кремния / О.В. Зинчук (Королик) // Кремний. Школа – 2005: сборник тезисов лекций и докладов Третьей Российской школы ученых и молодых специалистов по физике, материаловедению и технологии получения кремния и приборных структур на его основе, Россия, Москва, 4–7 июля 2005 г. / МИСиС. – Москва, 2005. – С.109–111.

15-А. Photoresponse of hydrogen plasma treated and electron irradiated silicon wafers / O. Zinchuk (Korolik), N. Drozdov, A. Fedotov, A. Mazanik, P. Żukowski, J. Partyka, P. Węgierek, T. Kołtunowicz // Ion implantation and other applications of ions and electrons: book of abstracts of the 6th International symposium, Poland, Kazimierz Dolny, 26–29 June 2006 / Maria Curie-Skłodowska University; edit.: J. Żuk, J. Filiks. – Lublin, 2006. – P. 57.

16-А. Спектры фотоЭДС промышленных пластин кремния / Н.А. Дроздов, О.В. Зинчук (Королик), А.В. Мазаник, А.К. Федотов // Кремний 2007: тезисы докладов Четвертой Российской конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе, Россия, Москва, 3–6 июля 2007 г. / МИСиС. – Москва, 2007. – С.94–95.

17-А. Effect of the hydrogen and argon ion-beam treatments on the structural and electrical properties of Cz Si wafers: comparative study / O. Zinchuk (Korolik), N. Drozdov, A. Fedotov, A. Mazanik, J. Partyka, P. Węgierek, T. Kołtunowicz // Ion implantation and other applications of ions and electrons: book of abstracts of the 7th International Conference, Poland, Kazimierz Dolny, 16–19 June 2008 / Lublin university of technology; edit.: J. Żuk, J. Filiks. – Lublin, 2008. – P. 73.

18-А. Наноструктурирование поверхности кремния при ионно-лучевой обработке водородом / А.Л. Пушкарчук, В.А. Пушкарчук, О.В. Зинчук (Королик), А.В. Мазаник, А.К. Федотов, В.В. Федотова // Nanostructured systems: Technology – Structure – Properties – Applications: abstracts of international meeting, Uzhgorod, Ukraine, 13–16 October 2008 / National Academy of Sciences of Ukraine. – Uzhgorod, 2008. – P. 161.

19-А. Comparative analysis of the influence of low-energy hydrogen and helium ion-beam treatments on the structural and electrical properties of Cz Si wafers / A. Fedotov, A. Mazanik, O. Zinchuk (Korolik), N. Stas'kov, V. Ukhov, J. Partyka // New electrical and electronical technologies and their industrial implementation (NEET'2009): proc. of 6th International conference, Poland, Zakopane, 23–26 June 2009 / Lublin University of Techn.; ed. by T. Kołtunowicz. – Lublin, 2009. – P. 111.

РЕЗЮМЕ

Королик Ольга Васильевна

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДОРОДОМ, ГЕЛИЕМ, АРГОНОМ НА СВОЙСТВА ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Ключевые слова: кремний, ионно-плазменная обработка, водород, гелий, аргон, электрические свойства, фотоЭДС, структурные свойства.

Целью работы является установление особенностей влияния ионно-плазменной обработки водородом, гелием, аргонem на электрические, фотоэлектрические свойства пластин кремния и структуру их приповерхностной области, а также выявление закономерностей и механизмов формирования сигнала фотоЭДС промышленных пластин монокристаллического кремния.

Проводились измерения спектральных зависимостей фотоЭДС, термоЭДС, поверхностного сопротивления, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, также использовались рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, оже-электронная спектроскопия при послойном травлении, эллипсометрия.

Установлено, что: в спектрах фотоЭДС промышленных пластин кремния, выращенного по методу Чохральского, наряду с известной полосой барьерной фотоЭДС формируется составляющая с максимумом на длине волны 1160-1170 нм и полушириной 41-45 нм, что объясняется предложенной моделью; имеет место общность влияния ионно-плазменной обработки водородом, гелием или аргонem на свойства пластин кремния, связанная с формированием собственных структурных нарушений и состоящая в том, что поверхностное сопротивление, знак термоЭДС, форма вольт-фарадных характеристик для пластин n-типа сохраняются, а сигнал барьерной фотоЭДС уменьшается, в то время как для пластин p-типа на обработанной стороне поверхностное сопротивление увеличивается, изменяется знак термоЭДС, возникает сигнал барьерной фотоЭДС; вне зависимости от типа проводимости пластин в результате обработки на поверхности возникает слой, обогащенный кислородом, толщиной до 10 нм с показателем преломления 1,7-2,6, причем толщина слоя уменьшается с ростом температуры обработки водородом.

Наличие обнаруженной линии в спектрах фотоЭДС может быть использовано для диагностики качества поверхности кремниевых пластин, в частности, для диагностики поверхностных электронных состояний. Эффект формирования приповерхностного слоя, обогащенного кислородом, может служить основой для разработки нового технологического подхода к созданию диэлектрических слоев на поверхности пластин кремния при низких температурах.

РЭЗЬЮМЭ

Каролік Вольга Васільеўна

УПЛЫЎ НІЗКАЭНЕРГЕТЫЧНАЙ ІОННА-ПЛАЗМЕННАЙ АПРАЦОЎКІ ВАДАРОДАМ, ГЕЛІЕМ, АРГОНАМ НА ЎЛАСЦІВАСЦІ ПЛАСЦІН МОНАКРЫШТАЛІЧНАГА КРЭМНІЮ

Ключавыя словы: крэмній, іонна-плазменная апрацоўка, вадарод, гелій, аргон, электрычныя ўласцівасці, фотаЭРС, структурныя ўласцівасці.

Мэтай работы з'яўляецца ўстанаўленне асаблівасцей уплыву іонна-плазменнай апрацоўкі вадародам, геліем, аргонам на электрычныя, фотаэлектрычныя ўласцівасці пласцін крэмнію і структуру іх прыпаверхневай вобласці, а таксама выяўленне заканамернасцей і механізмаў фарміравання сігнала фотаЭРС прамысловых пласцін монакрышталічнага крэмнію.

Праводзіліся вымярэнні спектральных залежнасцей фотаЭРС, тэрмаЭРС, паверхневага супраціўлення, вольт-амперных і вольт-фарадных характарыстык, таксама выкарыстоўваліся рэнтгенаўская фотаэлектронная спектраскапія, ажэ-электронная спектраскапія пры паслойным страўліванні, эліпсаметрыя.

Вызначана, што: у спектрах фотаЭРС прамысловых пласцін крэмнію, вырашчанага па метадзе Чахральскага, поруч з вядомай паласой бар'ернай фотаЭРС фарміруецца састаўляючая з максімумам на дліне хвалі 1160-1170 нм і паўшырынёй 41-45 нм, што тлумачыцца прапанаванай мадэллю; мае месца агульнасць уплыву іонна-плазменнай апрацоўкі вадародам, геліем ці аргонам на ўласцівасці пласцін крэмнію, звязаная з фарміраваннем уласных структурных парушэнняў і якая заключаецца ў тым, што паверхневае супраціўленне, знак тэрмаЭРС, форма вольт-фарадных характарыстык для пласцін n-тыпу захоўваюцца, а сігнал бар'ернай фотаЭРС памяншаецца, тым часам як для пласцін р-тыпу на апрацаваным баку паверхневае супраціўленне павялічваецца, змяняецца знак тэрмаЭРС, узнікае сігнал бар'ернай фотаЭРС; незалежна ад тыпу праводнасці пласцін у выніку апрацоўкі на паверхні ўзнікае слой, абагачаны кіслародам, таўшчыней да 10 нм з паказчыкам праламленай 1,7-2,6, пры гэтым таўшчыня слоя памяншаецца з ростам тэмпературы апрацоўкі вадародам.

Прысутнасць выяўленай лініі ў спектрах фотаЭРС можа быць выкарыстана для дыягностыкі якасці паверхні крэмніевых пласцін, у прыватнасці, для дыягностыкі паверхневых электронных станаў. Эфект фарміравання прыпаверхневага слоя, абагачанага кіслародам, можа служыць асновай для распрацоўкі новага тэхналагічнага падыходу да стварэння дыэлектрычных слаёў на паверхні пласцін крэмнію пры нізкіх тэмпературах.

SUMMARY

Korolik Olga Vasil'evna

INFLUENCE OF LOW-ENERGY ION-BEAM TREATMENT BY HYDROGEN, HELIUM, ARGON ON THE PROPERTIES OF MONOCRYSTALLINE SILICON WAFERS

Keywords: silicon, ion-beam treatment, hydrogen, helium, argon, electrical properties, photo-emf, structural properties.

The goal of this work is to establish the peculiarities of the effects exerted by hydrogen, helium, argon ion-beam treatment on the electrical, photoelectrical properties of silicon wafers, and on the structure of their near-surface region as well as to reveal the regularities and mechanisms of the photo-emf signal formation in industrial Cz Si wafers.

The photo-emf spectral dependences, thermo-emf, sheet resistance, current-voltage, and capacitance-voltage characteristics were measured, the X-ray photoelectron spectroscopy, Auger-electron spectroscopy with layered etching, ellipsometry methods were also used.

It is established that: (i) in photo-emf spectra of industrial Cz Si wafers a component having a maximum at 1160-1170 nm and half-width of 41-45 nm is formed along with the known barrier photo-emf band, that is explained by the proposed model; (ii) there is a generality of the effects exerted by hydrogen, helium, argon ion-beam treatment on the Cz Si wafer properties related with the formation of intrinsic structural imperfections and consisting in the fact that the sheet resistance, thermo-emf sign, shape of capacitance-voltage characteristics remain unaltered, and the barrier photo-emf decreases for the n-type wafers, whereas for the p-type wafers on the treated surface the sheet resistance is increased, the thermo-emf sign is changed, the barrier photo-emf signal is originating; independent of the wafer conductivity type, an oxygen-enriched layer with a thickness up to 10 nm and refractive index of 1.7-2.6 arises on the surface as a result of the treatment, the layer thickness decreasing with a growth in temperature of hydrogen ion-beam treatment.

The presence of the discovered line in photo-emf spectra can be used for diagnostics of the surface quality of silicon wafers, for diagnostics of the surface electronic states in particular. The effect of the near-surface oxygen-enriched layer formation can serve as a basis for the development of a new technological approach aimed at the creation of dielectric layers on the surface of silicon wafers at low temperatures.