

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.315.592 (043)

МАЗАНИК

Александр Васильевич

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ
В ПОЛИ- И БИКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Минск, 2004

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель — доктор физико-математических наук
профессор
ФЕДОТОВ Александр Кириллович,
Белорусский государственный университет, кафедра энергофизики

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор
КВАСОВ Николай Трофимович,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра физики

кандидат технических наук
ЗАЛЕССКИЙ Валерий Борисович,
Институт электроники НАН Беларуси, лаборатория твердотельных фотопреобразователей

Оппонирующая организация — Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси

Защита состоится 26 ноября 2004 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 в Белорусском государственном университете (220050 Минск, пр. Ф. Скорины, 4, аудитория 206, тел. ученого секретаря 2-09-55-58).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан “___” октября 2004 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

доцент

В.Ф.Стельмах

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Функциональные возможности многих типов приборов твердотельной электроники базируются на использовании сложных многослойных и неоднородных систем, в которых используются не только монокристаллические, но и поликристаллические слои. На работу таких систем существенное влияние оказывают специфические электронные и диффузионные процессы, протекающие на внутренних границах раздела (межкристаллитных, межфазных, межслойных). Указанные процессы, как правило, обусловлены рассогласованием кристаллических решеток на внутренних границах раздела (интерфейсе), таких как границы наклона в поликристаллических полупроводниках, границы наклона и кручения в бикристаллах полупроводников, а также на интерфейсе кремний-оксид кремния в структурах кремний-на-изоляторе, в эпитаксиальных гетероструктурах, барьерах Шоттки и др. Последствия рассогласования кристаллических решеток в окрестности интерфейса характеризуются двумя основными аспектами, влияющими на функционирование материалов и приборов: а) образование глубоких центров захвата и рекомбинация носителей заряда, как на самой внутренней границе (ее «ядре»), так и в ее окрестности; б) формирование сложных полей внутренних упругих напряжений и «встроенных» электрических полей, вызывающих перераспределение примесей и дефектов, а, следовательно, реконструкцию дефектно-примесных атмосфер в окрестности «ядра» границ. В результате этого происходит локальное изменение энергетического спектра носителей заряда, приводящее к радикальным отличиям электропереноса и рекомбинационных процессов (то есть электрической активности интерфейса) не только в области границ раздела, но также в материале и приборе в целом.

В этой связи, для повышения функциональных возможностей полупроводниковых материалов и твердотельных электронных устройств на их основе весьма актуальной является задача исследования причин, механизмов и последствий формирования электрической активности внутренних границ раздела, а также способов управления ею как в смысле подавления (когда роль границ отрицательна и ведет к ухудшению параметров), так и ее усиления (если границы придают новые функциональные свойства материалу либо прибору).

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа проводилась в рамках выполнения следующих программ и отдельных проектов:

- Государственная программа фундаментальных исследований “Разработка и исследование новых принципов создания перспективных опто- и микроэлектронных систем хранения, передачи и обработки информации” (Программа ЭЛЕКТРОНИКА), утвержденной постановлением Президиума НАН Беларуси 23 ноября 1995 года, № 88.

- Задание № 8 «Разработка образцов нового поколения солнечных батарей, фотопреобразователей для КА связи и ретрансляции» договора № ВС-394 от 8 июня 1999г. в рамках совместной программы "Разработка и использование

космических средств и технологий получения, обработки и отображения космической информации" (Космос-РБ), утвержденной постановлением Исполнительного Комитета Союза Беларуси и России от 9 декабря 1998 г. № 11.

- Межвузовская программа фундаментальных исследований «Низкоразмерные системы», 1996-2000 г.г.

- Межвузовская программа фундаментальных исследований «Низкоразмерные системы-2», 2001-2003 г.г.

- Проект № Т99-114 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «Экспериментальное изучение влияния различных режимов гидрогенизации на свойства монокристаллических и поликристаллических кремниевых подложек и сформированных на них СЭ», 2000-2002 г.г.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлось установление особенностей формирования и проявления электрической активности внутренних границ раздела (границы наклона, границы кручения, интерфейс сращивания, граница кремний-оксид кремния) в кремниевых материалах разных типов, а также нахождение способов управления ею.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование влияния типа и кристаллографической структуры границ зерен в кремниевых материалах разного типа на их электрическую активность.

2. Изучение рекомбинационных характеристик и транспорта носителей заряда в окрестности границ зерен в поли- и бикристаллах кремния, а также границы раздела кремний-оксид кремния.

3. Исследование влияния тепловой и химической предыстории внутренних границ раздела на их электрическую активность.

4. Исследование влияния низкоэнергетичной ионно-лучевой обработки водородом на электрическую активность внутренних границ раздела в кремнии.

5. Выявление влияния технологии формирования внутренних границ раздела в кристаллах кремния на их электрическую активность.

Объектом исследования являлись моно- и поликристаллический кремний с электрически активными внутренними границами раздела (границы наклона, границы кручения, интерфейс сращивания, граница кремний-оксид кремния).

Предметом исследования являлись электрическая активность внутренних границ раздела (интерфейса) в кремнии и методы управления ею.

Методология и методы проведенного исследования. Для получения информации о структурных свойствах границ зерен разного типа в поликристаллическом кремнии использовалась электронная и оптическая микроскопия, а также рентгенографический анализ. С целью изучения электрических свойств внутренних границ раздела проводились измерения их проводимости на постоянном и переменном токе в интервале температур от 77 до 300 К, а также измерения тока, индуцированного электронным или световым лучом. Электрические свойства интерфейса в бикристаллах кремния и структурах Si/SiO₂/Si, полученных способом твердофазного сращивания, были исследованы посредст-

вом измерения поперечных вольт-амперных и высокочастотных вольт-фарадных характеристик.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработана методика оценки профиля распределения электрически активных примесей в окрестности границ зерен в полупроводниках, что позволило экспериментально и модельными расчетами доказать обогащение неспециальных границ зерен в поликремнии примесями.

2. Впервые предложена теоретическая модель, объясняющая обнаруженный эффект долговременной релаксации заряда, его зависимость от температуры и типа границ зерен наличием на них индуцированных островками фазы SiO_x заряженных глубоких ловушек вследствие их обогащения кислородом.

3. Впервые показано проявление туннельного механизма электропереноса через пограничный барьер при пониженных температурах за счет обнаруженного обогащения окрестности границ легирующими примесями.

4. Впервые показана важная роль обогащения интерфейса окисления акцепторной примесью в увеличении радиационной стойкости кремниевых МОП-структур с толстым захороненным оксидным слоем.

5. Разработана новая методика расчета энергетического распределения плотности пограничных состояний $N_T(E)$ из высокочастотных вольт-фарадных характеристик полупроводниковых бикристаллов.

6. Впервые обнаружено повышение электрической активности границ зерен в профилированном поликремнии при низкотемпературной ионно-лучевой обработке большими дозами атомарного водорода. Данный эффект объяснен в рамках разработанной модели, предполагающей конкуренцию между пассивацией зернограницных дефектов и нейтрализацией мелких акцепторов водородом в окрестности границ в процессе низкотемпературной гидрогенизации.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Полученные экспериментально результаты исследования влияния гидрогенизации на электрическую активность границ зерен в поликристаллическом кремнии, полученном методом Степанова, могут найти применения в технологии создания солнечных элементов на основе этого материала.

2. Результаты исследования влияния тепловой и химической предыстории интерфейса в кремнии на его электрическую активность закладывают основу для разработки технологии управления электрической активностью внутренних границ раздела и выходными параметрами кремниевых приборов и структур.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Совокупность результатов экспериментальных исследований температурных и полевых зависимостей проводимости на постоянном и переменном токе внутренних границ раздела разного типа, доказывающая, что электрическая активность границ зерен в профилированном кремнии, а также кремниевых бикристаллах, полученных методом твердофазного сращивания, индуциру-

ется, главным образом, фоновыми (кислород, углерод, алюминий) и легирующими (бор) примесями, а не оборванными связями, формирующимися вследствие рассогласования кристаллических решеток соседствующих зерен.

2. Комплекс моделей и методов, позволяющих характеризовать и описывать особенности формирования и проявления электрической активности внутренних границ раздела разного типа в кремнии:

- модель обогащения границ зерен примесями, учитывающая влияние внутренних напряжений, плотности пограничных состояний и соотношение размеров ионов примеси и кремния на диффузию примесей в окрестности «ядра» границы;
- модель, описывающая кинетику релаксации заряда на обогащенных кислородом границах зерен в кремнии на основе стимулированного электрическим полем ОПЗ туннелирования носителей заряда через преципитаты оксида кремния;
- метод определения профилей распределения примесей в окрестности границ из результатов измерения их поперечной емкости и проводимости в процессе долговременных релаксаций заряда;
- метод расчета плотности пограничных зарядовых состояний на внутренней границе раздела в полупроводнике, основанный на измерении высокочастотных вольт-фарадных характеристик.

3. Установленная совокупность особенностей проявления электрической активности межзеренных границ при ионно-лучевой обработке поликристаллического кремния водородом: уменьшение высоты потенциального барьера на границах зерен с ростом дозы водорода на начальных стадиях обработки; последующее увеличение высоты барьера в предварительно неотожженных образцах и выход на насыщение в отожженных; модель гидрогенизации, учитывающая конкуренцию между пассивацией водородом дефектов на границе и мелких акцепторов в окрестности границы в зависимости от тепловой предыстории поликристаллов.

Личный вклад соискателя. Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены лично соискателем. Работа выполнялась под руководством доктора физико-математических наук, профессора Федотова А.К., которым были сформулированы научная идея и основные задачи исследования. Соавторы приведенных публикаций участвовали в получении и проведении технологических обработок исследованных кристаллов и структур.

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

5th International Conference “Polycrystalline Semiconductors” (Швабиш Гмюнд, Германия, 13-18 сентября 1998), 2-я Всероссийская конференция по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния “Кремний-2000” (Москва, Россия, 9-11 февраля 2000), семинар АРАМ по силовой электронике (Москва, Россия, 2001), European Material Research Society Spring Meeting “E-MRS 2001” (Страсбург, Фран-

ция, 5-8 июня 2001), 4-я международная конференция “Взаимодействия излучений с твердым телом” – ВИТТ-2001 (Минск, 3-5 октября 2001), 9th International Conference on Defects – Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors “DRIP IX” (Римини, Италия, 24-28 сентября 2001), 10th International Conference on Intergrain and Interphase Boundaries (IIB-2001, Хайфа, Израиль, 22-26 июля 2001), 10th Sede Boqer Symposium on Solar Cell Electricity Production (Седэ-Бокер, Израиль, 4-5 февраля 2001), 9th International Conference on Extended Defects in Semiconductors – EDS-2002 (Болонья, Италия, 1-6 июня 2002), The 8th International Conference on Electronic Materials IUMRS-ICEM 2002 (10-14 июня 2002, Сиань, Китай), 5th International Conference “Ion implantation and other applications of ions and electrons” (14-17 June 2004, Kazimierz Dolny, Poland) а также на научных семинарах кафедры физики полупроводников и наноэлектроники БГУ, кафедры энергофизики БГУ.

Опубликованность результатов. По результатам исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 13 научных работ, в том числе 10 статей в научных журналах, 2 статьи в сборниках материалов конференций и 1 тезисы. Общее число страниц опубликованных материалов - 79.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 123 страницы. В работе приведено 53 рисунка, занимающих 24 страницы, одна таблица на 2,5 страницах. Использовано 123 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснованы необходимость исследований, актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследований, указаны объект и предмет исследований, перечислены методы, использованные при проведении исследований, излагается научная новизна и значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации. В первом разделе рассматриваются современные представления об атомной структуре границ зерен (ГЗ), основанные на представлении ГЗ как совокупности периодически повторяющихся структурных элементов. Второй раздел главы посвящен моделям электрической активности ГЗ, описывающим проявляемые границами зерен барьерные и рекомбинационные свойства. Излагаются представления о транспорте носителей поперек ГЗ, а также методики, позволяющие определять параметры, характеризующие электрическую активность границ: метод определения энергетической плотности зарядовых состояний на ГЗ (метод Зигера-Пайка), метод тока, наведенного электронным либо световым лучом, метод поверхностного электронноиндуцированного потенциала. В третьем разделе описывается метод твердофазного срачивания пластин кремния, применяемого при получении бикристаллов и МОП-структур. Четвертый раздел

посвящен вопросу управления электрической активностью границ зерен. Особое внимание уделено проблеме гидрогенизации поликристаллического кремния, в частности, описанию процессов, сопровождающих пассивацию зерно-граничных дефектов. В конце главы обосновывается выбор направления исследований.

Во **второй главе** излагаются методики получения исследованных поликристаллических материалов. Приводятся результаты структурных исследований лент профилированного кремния и кристаллографической аттестации присутствующих в них границ зерен. Описываются использованные методы исследования ГЗ. Дается описание установок, применявшихся для проведения гидрогенизации поликристаллических лент.

В работе изучались многогранные полые тонкостенные профилированные кристаллы кремния, выращенные в вакууме способом Степанова через графитовые формообразователи со скоростью 10-15 мм/мин. Полученные профили в процессе роста были легированы бором до удельного сопротивления 1-3 Ом·см. Сформированные шестигранники разрезались по ребрам на ленты, из которых затем вырезались исследуемые образцы с одиночными или множественными границами зерен, ориентированными как вдоль, так и поперек длинного ребра образцов.

Содержание кислорода и углерода внутри зерен в образцах, измеренное методами ИК спектроскопии, составляло $N_O \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $N_C \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Высокая по сравнению с другими традиционными кремниевыми материалами концентрация углерода обусловлена использованием графитовых формообразователей.

Зеренная структура полученных профилей представлена зернами трех типов. В первом типу относятся крупные одиночные зерна размерами около нескольких миллиметров, вытянутые преимущественно вдоль оси выращивания профиля. Второй тип зерен представлен группирующимися узкими ламеллярными кристаллитами, также вытянутыми параллельно оси роста многогранника. Наконец, к третьему типу относятся пластинчатые группы зерен, несколько отклоненные от оси роста и примыкающие к ГЗ общего типа между зернами первого типа. Зерна первого и второго типов (и, соответственно, границы между ними) образуются непосредственно на фронте кристаллизации, в то время как зерна третьего типа возникают уже после кристаллизации в процессе охлаждения профилей. Такие зерна возникают вследствие релаксации существующих термических напряжений, приводящих, как правило, к отщеплению двойниковых или слабоотклоненных границ от сильноотклоненных границ или ГЗ общего типа, зародившихся непосредственно на фронте кристаллизации между зернами первого или второго типов.

Присутствующие в профилированном кремнии ГЗ могут быть разделены на три группы:

1. Специальные ГЗ типа $\Sigma = 3^n$, $n = 1, 2, 3$.

2. ГЗ, слабо отклоненные от специальных ориентаций θ_T (с углами отклонения $\Delta\theta_T$ менее 2°)

3. ГЗ общего типа (со случайными углами разориентации θ_T соседствующих зерен)

При этом зерна первого типа разделены, как правило, границами общего типа либо сильно отклоненными от специальных ориентаций ($\Delta\theta_T > 2^\circ$). Практически все зерна третьего типа разделены специальными границами типа $\Sigma = 3^n$, $n = 1, 2$ (двойники). Наконец, зерна второго типа разделены либо специальными границами типа $\Sigma = 3^n$, $n=1,2$, либо границами, слабо отклоненными от них ($\Delta\theta_T < 2^\circ$).

Большинство присутствовавших в поликристаллах ГЗ представляли собой электрически неактивные специальные границы типа $\Sigma 3$ и $\Sigma 9$. В результате плотность электрически активных ГЗ общего типа либо слабоотклоненных от специальных разориентаций была столь низка, что среднее расстояние между ними составляло, как правило, единицы миллиметров и более. Это позволяло вырезать из профилей бикристаллические образцы с одиночными электрически активными ГЗ, что, в свою очередь, давало возможность исследовать свойства индивидуальных границ зерен. Образцы представляли собой параллелепипеды длиной 10 – 12 мм и шириной 1 – 2 мм. Толщина образцов определялась толщиной стенок исходных многогранников и, как правило, составляла 0,35 – 0,4 мм.

Для проведения твердофазного сращивания (ТФС) использовались стандартные промышленные полированные пластины п- и р-типа проводимости, имеющие диаметр 60-100 мм, ориентацию поверхностей сращивания (100) и удельное сопротивление в пределах от 1 до 40 Ом·см. Перед сращиванием пластины подвергались стандартным методам очистки и химической обработки в перекисно-аммиачном растворе, в результате чего на их поверхности формировался гидрофильный слой. После этого пластины промывались в деионизованной воде. Было получено 4 группы ТФС-структур с близкими параметрами процесса сращивания по температуре и длительности, но с разной предысторией обработки поверхности сращиваемых пластин и разной средой соединения перед сращиванием:

(I) высушенные после промывки в деионизованной воде пластины соединялись на воздухе при комнатной температуре и отжигались на воздухе при 1150°C ;

(II) пластины соединялись в деионизованной воде, высушивались и отжигались на воздухе при 1150°C ;

(III) высушенные пластины подвергались ионному травлению, соединялись при комнатной температуре в вакууме и отжигались в вакууме при 1200°C при сжатии с давлением $3 \cdot 10^6$ Па;

(IV) одна из высушенных пластин подвергалась термическому окислению, затем пластины соединялись на воздухе при комнатной температуре и отжигались на воздухе при 1150 °С.

Указанные группы отличались в основном состоянием поверхности срастиваемых пластин (в частности, степенью их обогащения кислородом) перед срастиванием. Некоторые пластины, принадлежащие к группам I, II и III, при соединении были специально разориентированы, образуя границы кручения. Последние были либо близки к ориентации когерентного двойника типа $\Sigma 3$ (с отклонением $\Delta\Theta_T \approx 3^\circ$), либо имели угол разориентации $\Theta_T \approx 20^\circ$, образуя, тем самым, границу общего типа.

Для проведения гидрогенизации исследованных объектов применялась установка низкоэнергетичной ионно-лучевой обработки с трехэлектродным источником ионов. Это позволяло независимым образом изменять плотность пучка ионов и их энергию, что делало возможным использовать низкие энергии ионов водорода, избегая, тем самым, радиационных повреждений материала.

В третьей главе излагаются результаты исследований электрических свойств границ зерен различного типа (слабо отклоненных от специальных ориентаций и общего типа) в поликристаллическом профилированном кремнии, выращенном способом Степанова. Рассчитанные спектры пограничных состояний на этих границах показывают присутствие широких пиков [1], положение которых не соответствует уровням, наблюдавшимся для “чистых” границ, например, формирующихся при выращивании бикристаллов методом Чохральского из двойной затравки. Обнаруженные экспериментально долговременные (до нескольких часов) релаксации проводимости после снятия внешнего напряжения смещения идентичны наблюдающимся в бикристаллах кремния с обогащенными кислородом границами кручения [1,7]. Наличие такого рода релаксаций позволило разработать метод, позволяющий рассчитывать профиль распределения легирующей примеси в окрестности ГЗ из результатов измерения емкости и проводимости ГЗ в ходе релаксации заряда на них [1]. Данный метод основан на определении ширины области пространственного заряда x_0 и высоты потенциального барьера φ_0 на ГЗ из величин емкости c_0 и проводимости σ_0 , экспериментально измеряемых в разные моменты релаксации заряда границы после выключения приложенного к ней напряжения, в соответствии с формулами

$$c_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{2x_0}, \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \frac{4\pi e^2 m k T}{h^3} \exp\left(-\frac{e\varphi_0}{kT}\right), \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость кремния, S – площадь границы, e – элементарный заряд, m – эффективная масса носителей, k – постоянная Больцмана, T – температура, h – постоянная Планка. Знание набора величин x_0 и φ_0 для различных моментов времени позволяет,

применяя уравнение Пуассона, определить концентрацию примеси на расстоянии x_0 от границы по формуле

$$N(x_0) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{ex_0} \frac{d\varphi_0}{dx_0}. \quad (3)$$

Выполненные согласно данному методу расчеты профилей распределения ионизованных легирующих примесей в окрестности границ показывают их обогащение атомами бора (рис. 1), различное для ГЗ с разной кристаллографической структурой (степень обогащения примесными атомами больше для границ общего типа по сравнению со слабоотклоненными границами) [1]. Проведенные расчеты качественно коррелируют с предложенной теоретической моделью [3] накопления бора в окрестности границ зерен за счет действия внут-

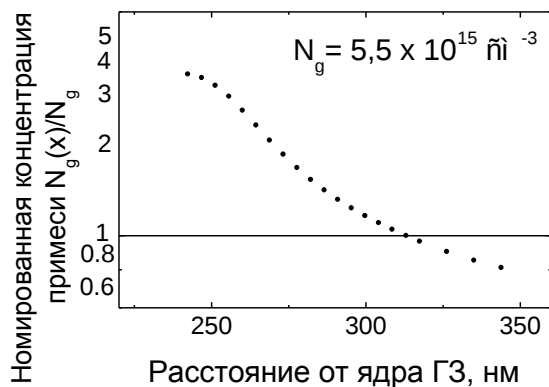


Рис. 1. Профиль распределения примесей в окрестности слабоотклоненной границы наклоне в профилированном кремнии (горизонтальной линии соответствует уровень легирования зерен)

ренних зернограницных напряжений. Кроме того, факт обогащения окрестности ГЗ в профилированном кремнии бором также согласуется с температурными зависимостями зернограницной проводимости, характеризующимися выходом на насыщение при температурах менее 150 К и свидетельствующими о преобладании туннельного механизма проводимости при этих температурах, что возможно лишь при высокой концентрации примеси в области пространственного заряда (ОПЗ) границ [1].

Проведенное сопоставление электрофизических свойств ГЗ разного типа показало, что слабоотклоненные ГЗ в профилированном кремнии менее дефектны по сравнению с границами общего типа. Это проявляется в меньшей плотности поверхностных состояний, меньшем обогащении окрестности ГЗ, слабоотклоненных от специальных ориентаций, примесями, меньших характерных временах процесса релаксации заряда в них по сравнению с границами общего типа [1]. Обнаруженные различия в электрической активности ГЗ разного типа коррелируют с тем фактом, что в профилированном кремнии границы общего типа всегда зарождаются на фронте кристаллизации (и потому более дефектны), в то время как слабоотклоненные ГЗ — как правило, «отщепляются» от них уже после кристаллизации вследствие релаксации термоупругих напряжений. Именно поэтому степень обогащения ГЗ общего типа дефектами и примесями заметно выше по сравнению со слабоотклоненными границами.

Совокупность описанных результатов указывает на то, что в поликристаллическом кремнии, выращенном методом Степанова, доминирует индуциро-

ванная электрическая активность ГЗ (наведенная как легирующими, так и фоновыми примесями), а не собственная активность, обусловленная присутствием оборванных связей на атомах кремния вследствие рассогласования кристаллических решеток соседствующих зерен [1].

Четвертая глава посвящена исследованию электрической активности границ кручения в бикристаллах кремния, а также интерфейса Si/SiO₂ в кремниевых МОП-структурах, полученных методом твердофазного срачивания при различном состоянии поверхностей срачиваемых пластин. Показано, что границы срачивания в ТФС-бикристаллах обладают электрической активностью (в частности, потенциальным барьером) только в случае их обогащения кислородом вне зависимости от взаимной кристаллографической ориентации сращенных пластин [6]. На интерфейсах, обогащенных кислородом, как и в случае границ зерен в профилированном кремнии, обнаружены долговременные релаксации заряда (поперечной проводимости), кинетика которых объяснена в рамках предложенной модели [5]. Данная модель предполагает, что уменьшение заряда, присутствующего на интерфейсе, обусловлено туннелированием носителей через обусловленный оксидом потенциальный барьер, форма которого зависит от величины захваченного границей заряда и созданного им электрического поля.

Результаты исследования электрической активности бикристаллов различных типов обобщены в таблице.

Наличие барьерных эффектов на границе раздела
в кремниевых бикристаллах различного типа

Группа	Серия	Характеристика срачиваемых пластин	Среды соединения	Режимы химической обработки и срачивания	Наличие барьерных эффектов (+/-) ¹
I	1	n-тип, $\rho = 4,5$ Ом·см, (100), толщина окисла ~ 2 нм, угол рассогласования $\theta_T = 0^\circ$	Воздух	1) NH ₄ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O=1:8:1 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150 °C, 1 ч	+
	2	n-тип, $\rho = 4,5$ Ом·см, (100), толщина окисла ~ 1 нм, $\theta_T = 0^\circ$	Воздух	1) NH ₄ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O=1:8:1 2) промывка в деионизованной воде 3) раствор HF для снятия окисла 4) промывка в деионизованной воде 5) отжиг на воздухе при 1150 °C, 1 ч	-

¹ "+" – наличие, "-" – отсутствие барьерного эффекта

Продолжение таблицы

Группа	Серия	Характеристика срачиваемых пластин	Среды соединения	Режимы химической обработки и срачивания	Наличие барьерных эффектов (+/-) ²
I	3	p-тип, $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta_T = 0^\circ$	Воздух	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150°C , 1 ч	-
	4	p-тип, $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta_T = 0^\circ$	Воздух	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150°C , 1 ч	-
	5	p-тип, $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta_T = 20^\circ$	Воздух	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150°C , 1 ч	-
II	1	p-тип, $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta_T = 20^\circ$, периферия образца	Деионизованная вода	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150°C , 1 ч	+
	2	p-тип, $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta_T = 20^\circ$, центр образца	Деионизованная вода	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150°C , 1 час	-
	3	p-тип, $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta_T = 20^\circ$, промежуточная часть образца	Деионизованная вода	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при 1150°C , 1 ч	+
III	1	p-тип, $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $< 1 \text{ нм}$, $\Sigma 3$, $\Delta\theta_T = 3^\circ$	Вакуум	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) ионное травление 4) отжиг в вакууме 10^{-7} Па при 1200°C под давлением $3\cdot 10^6 \text{ Па}$, 10 ч	-
	2	p-тип, $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, (100), толщина окисла $< 1 \text{ нм}$, $\theta_T = 20^\circ$	Вакуум	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) ионное травление 4) отжиг в вакууме 10^{-7} Па при 1200°C под давлением $3\cdot 10^6 \text{ Па}$, 10 ч	-

² “+” – наличие, “-” – отсутствие барьерного эффекта

Предложен метод определения энергетической плотности зарядовых состояний на границе раздела в бикристаллическом образце, основанный на измерении высокочастотных вольт-фарадных характеристик. Поверхностная плотность заряда на границе N_s в зависимости от приложенного напряжения V может быть записана как

$$N_s(V) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S N_g}{C(V)}, \quad (4)$$

где $C(V)$ – емкость границы при напряжении V . Для расчета энергетического распределения пограничных зарядовых состояний $N_T(E)$ функция $N_s(V)$ должна быть продифференцирована по высоте прямосмещенного барьера ϕ_1 :

$$N_T(E) = \frac{dN_s}{d\phi_1} = \frac{dN_s}{dV} \frac{dV}{d\phi_1}. \quad (5)$$

При этом величина ϕ_1 связана с приложенным напряжением соотношением:

$$\phi_1(V) = \frac{(4\phi_0\nu - V)^2}{16\phi_0\nu}, \quad (6)$$

где $\nu = (N_s(V)/N_s(0))^2$.

Применение данного метода для границ зерен в поликристаллах кремния

позволило получить энергетические спектры зарядовых состояний, аналогичные полученным из вольт-амперных характеристик с помощью методики Зигера-Пайка.

Показано, что при определенных технологических режимах подготовки срачиваемых пластин перед их срачиванием и/или окислением (обработка в перекисно-аммиачном растворе, группа I, серия 1 в таблице 1) возможно обогащение их поверхностей акцепторными центрами, предположительно алюминием, что приводит к возникновению потенциального барьера в случае срачивания пластин n-типа [6].

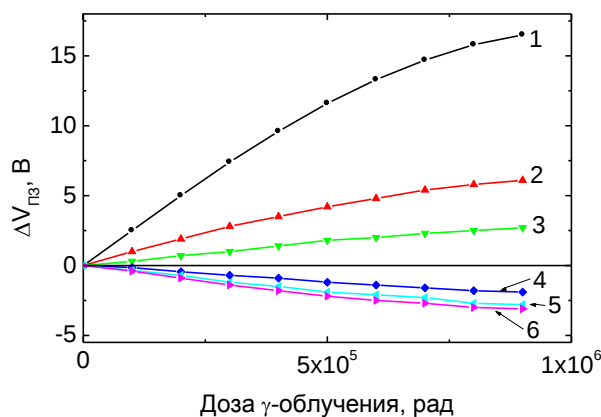


Рис. 2. Зависимость изменения напряжения плоских зон $\Delta V_{ПЗ} = V_{ПЗ}(0) - V_{ПЗ}(D)$ от дозы γ -облучения для МОП-структур группы а (4,5,6) и группы б (1,2,3) при различных напряжениях на затворе: $V_з = +5$ В - кривые 1 и 6; $V_з = -5$ В - кривые 2 и 5; $V_з = 0$ - кривые 3 и 4;

Установлено также, что радиационная стойкость МОП-структур, где граница между кремнием и оксидом формировалась посредством срачивания окисленной и неокисленной пластин с последующим удалением кремния окисленной пластины (обозначенных как группа а на рис. 2) оказывается выше по

сравнению с контрольными образцами, где граница “кремний-оксид” формировалась термическим окислением (группа б рис. 2).

В **пятой главе** содержатся результаты исследований влияния водородно-плазменной обработки на электрическую активность границ зерен в поликристаллическом кремнии. Воздействие гидрогенизации на свойства поликристаллических лент оценивалась посредством измерения поперечной проводимости ГЗ и величины тока, индуцированного световым лучом (ТИСЛ) при сканировании образцов. Экспериментально обнаружено, что эффективность гидрогенизации

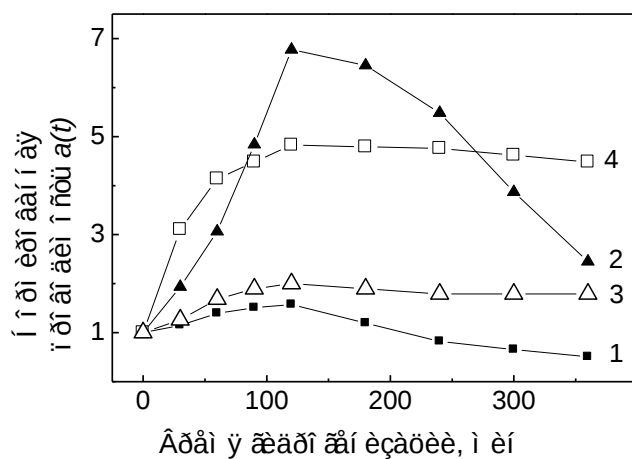


Рис. 3. Зависимость нормированной поперечной равновесной проводимости $a(t)$, измеренной при 77 К от длительности обработки в водородной плазме для слабоотклоненной ГЗ (1,3) и границы общего типа (2,4) в исходном (1,2) и отожженном (3,4) образцах

ГЗ в профилированных поликристаллах определяется как типом границ (специальные или неспециальные), так и тепловой предысторией кристаллов в целом (отожженные или неотожженные) [2,5,9]. Так, при временах гидрогенизации менее 120 мин при температурах выше комнатной происходит монотонное снижение электрической активности границ зерен во всех исследованных образцах. Это проявляется как в увеличении их поперечной проводимости (рис. 3), так и в уменьшении величины тока, индуцированного световым лучом [13]. Гидрогенизация,

проведенная при комнатной температуре, не приводит к изменению электрической активности границ зерен, в то время как повышение ее температуры до 200 °С вызывает уменьшение величины ТИСЛ на два порядка величины. Однако дальнейший (свыше 120 мин) рост длительности гидрогенизации вызывает увеличение электрической активности ГЗ в неотожженных лентах и ее выход на насыщение в лентах, отжигавшихся перед гидрогенизацией в вакууме при 1100 °С в течение 2 ч (рис. 3).

Описанная зависимость электрической активности ГЗ от времени гидрогенизации находит объяснение в рамках предложенной модели (рис. 4) [5,9,11], учитывающей взаимодействие вводимого в материал атомарного водорода как с зернограницными дефектами (преимущественно на начальных стадиях гидрогенизации), так и с атомами акцепторной примеси в зернах (на более поздних стадиях). В результате этого взаимодействия происходит пассивация примесей и уменьшение плотности экранирующего заряда в окрестности ГЗ. Последнее

находится в согласии с результатами дополнительно выполненных люминесцентных исследований [12].

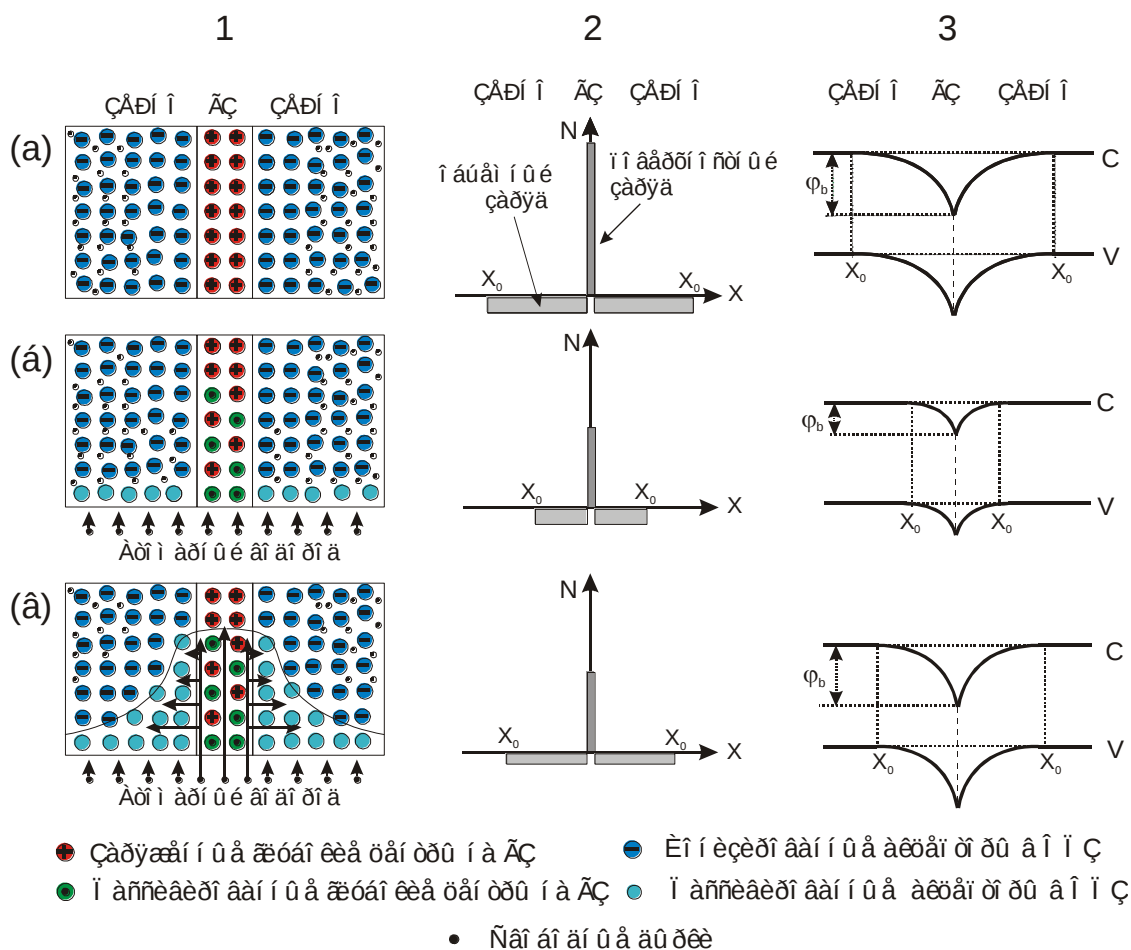


Рис. 4. Модель пассивации и депассивации активности границ зерен в ленточном поликремнии под влиянием облучения водородом для разных промежутков времени t :
 а – распределения заряженных и пассивированных глубоких центров на ГЗ, ионизованных и пассивированных акцепторов, свободных дырок (1), плотности поверхностного и объемного зарядов (2), зонная структура, ширина области пространственного заряда и высота потенциального барьера (3) до гидрогенизации;
 б – то же после гидрогенизации в течение времени $t < 100$ мин (стадия пассивации электрической активности ГЗ);
 с – то же после гидрогенизации в течение времени $t > 100$ мин (стадия депассивации электрической активности ГЗ);

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем:

1. Разработан метод расчета энергетической плотности пограничных зарядовых состояний на границах раздела в поли- и бикристаллах кремния из высокочастотных вольт-фарадных характеристик, основанный на определении величины пограничного заряда в зависимости от приложенного напряжения [8].

Определенные с его помощью энергетические распределения плотности пограничных состояний для границ зерен в профилированном кремнии характеризуются широким максимумом вблизи потолка валентной зоны, что подтверждает доминирующую роль эффекта геттерирования атомов фоновых примесей в формировании пограничного потенциального барьера. Аналогичные распределения плотности зарядовых состояний следуют из результатов измерений вольт-амперных характеристик границ зерен посредством применения метода Зигера-Пайка, основанного на сравнении экспериментальной вольт-амперной характеристики границы с модельной [1].

2. Разработан метод расчета профилей распределения легирующей примеси в окрестности границ зерен в поли- и бикристаллах кремния. В основе метода лежит извлечение значений высоты потенциального барьера и ширины области пространственного заряда на границе из результатов измерений ее поперечной проводимости и емкости в различные моменты времени в процессе релаксации пограничного заряда после выключения приложенного напряжения. Эксперименты показывают, что в профилированном кремнии неспециальные границы зерен обогащены акцепторной примесью (бором), причем границы общего типа обогащены бором в большей степени по сравнению со слабоотклоненными границами. Это находится в качественном согласии с результатами численного моделирования диффузии примеси в окрестности границ зерен с учетом действующих упругих напряжений, плотности пограничных состояний и соотношения размеров ионов примеси и кремния [3].

3. Обнаружено, что изотипные бикристаллы кремния, полученные методом твердофазного сращивания пластин при различных углах их разориентации, обладают существенно меньшей по сравнению с исходными пластинами поперечной проводимостью, а также нелинейностью вольт-амперных характеристик только в условиях дополнительного обогащения границ раздела примесями (кислород, алюминий). В отсутствие обогащения угол разориентации пластин практически не влияет на проявляемые бикристаллами свойства. Это свидетельствует о том, что электрическая активность границ раздела в бикристаллах, полученных методом твердофазного сращивания, обусловлена в первую очередь присутствием указанных примесей, а не дефектами рассогласования кристаллических решеток [6,10].

4. Обнаружено, что в поликристаллических лентах и твердофазносращенных бикристаллах кремния обогащение границ зерен фоновыми примесями (главным образом, кислородом) приводит к существованию долговременных релаксаций заряда, возникающих после выключения внешнего напряжения смещения, что экспериментально проявляется в увеличении поперечной емкости и проводимости границ. Характерные времена релаксаций растут по мере уменьшения температуры и увеличения концентрации зернограницных дефектов. Кинетика релаксации подчиняется закону, соответствующему стимулированному электрическим полем области пространственного заряда

туннелированию носителей через преципитаты оксида кремния на обогащенных кислородом границах зерен в кремнии [7].

5. Обнаружено, что в процессе низкотемпературной (в интервале температур от 30 до 200 °С) ионно-лучевой обработки профилированного кремния р-типа проводимости водородом дозами менее $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ с ростом дозы водорода наблюдается монотонное увеличение поперечной статической проводимости границ зерен неспециального типа, а также уменьшение величины тока, индуцированного световым лучом, что свидетельствуют об уменьшении электрической активности границ (снижении пограничного барьера) в процессе ионно-лучевой обработки водородом вследствие пассивации присутствующих на них дефектов [2,13]. Для данного диапазона доз величина тока, индуцированного световым лучом, уменьшается на два порядка при увеличении температуры от 30 до 200 °С, что свидетельствует о повышении эффективности ионно-лучевой обработки водородом с ростом температуры [13].

6. При низкотемпературной ионно-лучевой обработке водородом дозами более $2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ зафиксировано уменьшение поперечной проводимости границ зерен неспециального типа в неотожженных и ее выход на насыщение в предварительно отожженных кристаллах профилированного кремния р-типа проводимости [2], что соответствует модели гидрогенизации, учитывающей существование, наряду с процессом пассивации зернограницных ловушек, процесса пассивации акцепторной примеси (бора) в области пространственного заряда в условиях ускоренной диффузии атомарного водорода вдоль границ зерен [9,11].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Основные результаты диссертации изложены в 13 работах.

Статьи в научных журналах:

1. Fedotov A., Mazanik A., Katz E., Ilyashuk Yu., Drozdovski A., Polyak L. Electrical activity of tilt and twist grain boundaries in silicon // Solid State Phenomena. – 1999. - Vols. 67-68. - P. 15-20.
2. Fedotov A., Drozdov N., Katz E., Ilyashuk Yu., Mazanik A., Ulyashin A. Transformation of electrical activity of extended defects in silicon polycrystals under annealing and hydrogen plasma treatment // Physica status solidi (a). – 1999. – Vol. 171. – P. 353-363.
3. Fedotov A., Chuiko M., Mazanik A. Computer simulation of impurity diffusion in the vicinity of grain boundaries // Solid State Phenomena. – 1999. – Vols. 67-68. – P. 21-26.
4. Ульяшин А.Г., Федотов А.К., Джоб Р., Фарнер В.Р., Мазаник А.В. Применение водородноплазменной технологии для модификации свойств кремния и создания структур на его основе // Физико-химия обработки материалов. – 2000. - №5. - С. 22-27.

5. Fedotov A., Mazanik A., Katz E. Modification of electrical activity of grain boundaries in EFG silicon under influence of hydrogen plasma // Interface science. – 2001. – Vol. 9. – P. 169-173.
6. Fedotov A., Saad Anis M.H., Enisherlova K., Mazanik A. Electrical characterization of interfaces in unitype directly bonded silicon wafers. // Materials science and engineering. – 2002. – Vols. B91-92. – P. 384-388.
7. Fedotov A., Mazanik A., Ulyashin A. Charge Relaxation at Oxygen-Enriched Silicon Grain Boundaries // Solid State Phenomena. – 2002. – Vols. 82-84. – P. 515-520.
8. Kamaev G.N., Golod S.V., Skok E.M., Fedotov A., Mazanik A. Characterization of interfacial states in silicon bicrystals // Solid State Phenomena. – 2002. – Vols. 82-84. – P. 801-806.
9. Fedotov A., Mazanik A., Ulyashin A. Electrical activity of grain boundaries in silicon bicrystals and its modification by hydrogen plasma treatment // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2002. – Vol. 72. – P. 589-595.
10. Fedotov A.K., Saad Anis M.H., Enisherlova K.L., Mazanik A.V., Gorachev B.G., Temper E.M. Electrical properties of Si/SiO₂/Si structures produced by direct-bonding of pre-oxidized silicon wafers // Microelectronic engineering. – 2003. – Vol. 66. – P. 522-529.

Статьи в сборниках трудов конференций:

11. Fedotov A., Mazanik A., Saad Anis M.H., Ulyashin A. Diffusion of hydrogen from plasma source by grain boundaries in EFG silicon // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 4-ой международной конференции / Министерство образования Республики Беларусь. НАН Беларуси. Белорусский государственный университет. Белорусский межвузовский центр научных исследований. - Минск, 2001. - P. 99-101.
12. Fedotov A., Drozdov N., Katz E., Ilyashuk Yu., Mazanik A., Mudry A., Ulyashin A. Electrical activity of extended defects in as-grown, annealed and hydrogenated polycrystalline silicon for solar cells. // Solar Electricity Production: Proc. of 19th Sede Boqer Symposium / The Center for energy and Environmental Physics. The Jacob Blaustein institute for desert research. Ben Gurion University of the Negev. - Sede Boqer, Israel, 2002. - P. 147-154.

Тезисы докладов конференций:

13. Saad A., Mazanik A., Fedotov A., Partyka J., Wegierek P., Zukowski P. Influence of Low-Energy Ion-Beam Treatment by Hydrogen on Electrical Activity of Grain Boundaries in Polycrystalline Silicon // Ion implantation and other applications of ions and electrons: Book of Abstracts of the 5th International Conference, Kazimierz Dolny, Poland, 14-17 June 2004 / Maria Curie-Sklodowska university, Lublin. Lublin university of technology. Wroclaw university of technology. Association of polish electrical engineers, Lublin. – Lublin, 2004. - P. 44.

РЕЗЮМЕ

Мазаник Александр Васильевич
Электрическая активность межзеренных
границ в поли- и бикристаллах кремния

Ключевые слова: поликристаллический кремний, бикристаллы кремния, внутренние границы раздела, электрическая активность, гидрогенизация.

В работе изучались поликристаллические кремниевые ленты, полученные методом профилирования, и кремниевые бикристаллы, полученные методом твердофазного сращивания. Предметом исследования являлись электрическая активность внутренних границ раздела (интерфейса) в кремнии и методы управления ей. Использовались электронная и оптическая микроскопия, рентгенографический анализ, измерения проводимости на постоянном и переменном токе в интервале температур от 77 до 300 К, а также измерения тока, индуцированного электронным или световым лучом.

Установлено, что электрическая активность внутренних границ раздела в профилированном кремнии, а также кремниевых бикристаллах, полученных методом твердофазного сращивания, индуцируется фоновыми (кислород, углерод, алюминий) и легирующими (бор) примесями, а не является результатом формирования оборванных связей вследствие рассогласования кристаллических решеток соседствующих зерен.

Разработан комплекс методов и моделей, позволяющих характеризовать и описывать особенности формирования и проявления электрической активности внутренних границ раздела разного типа в кремнии, в том числе индуцированной фоновыми и легирующими примесями.

Впервые показано, что в процессе гидрогенизации поликристаллического кремния, полученного методом Степанова, происходит немонотонный характер изменения высоты барьера на границах зерен разного типа (уменьшение на начальной стадии облучения водородом и последующее насыщение для границ в предварительно отожженных либо рост для границ в неотожженных кристаллах), что является следствием конкуренции между пассивацией зернограницных дефектов и мелких акцепторов атомарным водородом в окрестности границы.

Результаты данной работы могут быть использованы в технологии создания солнечных элементов на основе поликристаллического кремния, полученного методом Степанова, а также в технологии твердофазного сращивания.

SUMMARY

Mazanik Alexander Vasilevitch
Electrical activity of intergrain boundaries
in poly- and bicrystalline silicon

Keywords: polycrystalline silicon, silicon bicrystals, internal boundaries, electrical activity, hydrogenation.

In this work polycrystalline silicon ribbons produced with the Edge-defined Film-fed Growth (EFG) technique and silicon bicrystals produced by direct bonding method were studied. The subject of the investigation was the electrical activity of internal boundaries (interface) in silicon and the methods of its control. Electron and optical microscopy, X-Ray Diffraction analysis, DC and AC conductance in the temperature range over 77 to 300 K, light or electron beam induced current techniques were used.

It was established that the electrical activity of internal boundaries in EFG silicon, as well as in silicon bicrystals produced by solid state (direct) bonding method is induced by background (oxygen, carbon, aluminium) and dopant (boron) impurities and is not result of dangling bonds formation in consequence of lattices mismatch of neighbouring grains.

The complex of methods and models allowing to characterize and describe the peculiarities of formation and displaying of electrical activity of internal boundaries of different types in silicon, including induced by background and dopant impurities, is proposed.

It was shown for the first time that non-monotonic change of potential barrier height at grain boundaries of different types (decrease at initial stages of hydrogen introduction and following saturation for grain boundaries in previously annealed crystals or growth for boundaries in non-annealed ones) during hydrogenation of EFG polycrystalline silicon takes place. It is determined by the concurrence between the passivation of grain boundary defects and neutralization of shallow acceptors in vicinity of grain boundary by atomic hydrogen.

The results of this work can be used in technology of production of solar cells based on the EFG polycrystalline silicon, as well as in technology of direct solid state bonding.

РЭЗЮМЕ

Мазанік Аляксандр Васільевіч

Электрычная актыўнасць межзерневых межаў
у полі- і бікрышталях крэмнію

Ключавыя словы: полікрышталічны крэмній, бікрышталі крэмнію, унутраныя межы раздзелу, электрычная актыўнасць, гідрагенізацыя.

У рабоце вывучаліся полікрышталічныя крэмніевыя стужкі, атрыманыя метадам прафіліравання, а таксама крэмніявыя бікрышталі, атрыманыя метадам цвердафазнага зрошчвання. Прадметам даследвання з'яўляліся электрычная актыўнасць унутраных межаў раздзелу (інтэрфейсу) ў крэмніі і метады кіравання ёю. Выкарыстоўваліся электронная і аптычная мікраскапія, рэнтгенаграфічны аналіз, вымярэнні правадзімасці на пастаянным і пераменным току ў інтэрвале тэмператур ад 77 да 300 К, а таксама вымярэнні току, індукцыраванага электронным ці светавым промнем.

Устаноўлена, што электрычная актыўнасць унутраных межаў раздзелу ў прафіліраваным крэмніі, а таксама крэмніевых бікрышталях, атрыманых метадам цвердафазнага зрошчвання, індукцыруецца фонавымі (кісларод, вуглярод, алюміній) і легіруючымі (бор) прымесямі, а не з'яўляецца вынікам фарміравання абарваных сувязей у выніку несупадзення крышталічных рашотак суседніх зерняў.

Прапанаваны комплекс метадаў і мадэлей, якія дазваляюць характарызаваць і апісваць асаблівасці фарміравання і праяўлення электрычнай актыўнасці ўнутраных межаў раздзелу рознага тыпу ў крэмніі, у тым ліку індукцыраванай фонавымі і легіруючымі прымесямі.

Упершыню паказана, што ў працэсе гідрагенізацыі полікрышталічнага крэмнію, атрыманага метадам Сцяпанава, адбываецца неманатонны характар змянення вышыні бар'еру на межах зерняў рознага тыпу (змяншэнне на пачатковай стадыі абпраменьвання вадародам і паследуючае насычэнне для межаў у папярэдне адпаленых або рост для межаў у неадпаленых крышталях), што з'яўляецца вынікам канкурэнцыі паміж пасівацыйнай зернепамежных дефектаў і нейтралізацыяй плыткіх акцэптараў атамарным вадародам у наваколлі мяжы.

Вынікі дадзенай работы могуць быць выкарыстаны ў тэхналогіі стварэння сонечных элементаў на аснове полікрышталічнага крэмнію, які атрымліваюць метадам Сцяпанава, а таксама ў тэхналогіі цвердафазнага зрошчвання.