

*На правах рукописи*



**Корячко Марина Валерьевна**

**Фазовые превращения и дефектообразование в кремнии  
при локальном поверхностном нагреве**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Рязань 2017 г.

Работа выполнена на кафедре «Физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: **Скворцов Аркадий Алексеевич**  
доктор физико-математических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва,  
заведующий кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов»

Официальные оппоненты: **Моргунов Роман Борисович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская область,  
ведущий научный сотрудник лаборатории Магнетохимии и спиновой динамики

**Харламов Владимир Федорович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»,  
г. Орел, профессор кафедры «Общая физика»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА)

Защита диссертации состоится «27» июня 2017 года в 11<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Д 212.211.03, д.ф.-м.н., профессор



Чиркин Михаил Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Одним из важнейших направлений исследований в физике полупроводников является изучение структурных и морфологических свойств материалов и приборов, в том числе при фазообразовании, как в самом полупроводнике, так и на межфазных границах полупроводниковых структур. Используемые в полупроводниковой технологии материалы (монокристаллы, системы металлизации, контакты, пассивирующие пленки) являются термодинамически неравновесными, способными вступать между собой в различные реакции на границе раздела фаз. К примеру, в системе металл–полупроводник протекают гетерофазные процессы, движущей силой которых являются градиенты химических потенциалов в контактирующих фазах. Взаимодействие между компонентами может осуществляться как на стадии изготовления структур, последующих технологических операциях, так и в процессе эксплуатации полупроводникового прибора.

Кроме того, рассматриваемые вопросы весьма актуальны при реализации процессов программирования постоянных запоминающих устройств (ПЗУ), в которых используются переключки между шинами в виде пленочных проводников. Процесс программирования таких ПЗУ заключается в пережигании определенных переключек. Электрическое пережигание переключек не всегда обеспечивает надежное программирование, поскольку в процессе эксплуатации микросхемы может происходить восстановление проводимости переключки (канала), приводящее к искажению записанной информации.

### **Степень разработанности темы**

Фазовые превращения в полупроводниках и полупроводниковых приборах при их эксплуатации активно развиваются сегодня в связи с уменьшением размеров активных областей, изменением геометрии систем металлизации и поиском новых материалов. При изучении механизмов фазообразования и сопутствующей деградации наиболее подробно теоретически и экспериментально исследованы процессы контактного плавления, включая начальные этапы развития деградационных процессов, механизмы формирования и миграции оплавленных зон. Подобные процессы (включая нестационарные режимы) были зарегистрированы в течение последних 10 лет в связи с появлением соответствующей аппаратуры. Однако в литературе отсутствует детальный анализ фазовых превращений и дефектообразования в кремнии, последовательность развития процессов деградации в полупроводнике, распространения оплавленных зон как по поверхности, так и в объеме кристалла кремния при нестационарных воздействиях.

**Цель диссертационной работы** заключается в установлении закономерностей протекания фазовых переходов и образования структурных дефектов в кремнии в условиях теплового удара на его поверхности.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. разработка измерительного комплекса для регистрации фазовых превращений в кремнии при локальном поверхностном нагреве;

2. исследование фазовых превращений в объеме и на поверхности полупроводниковых материалов, а также структурных и морфологических особенностей разрушения систем металлизации на кремнии при воздействии импульсов тока различной формы;

3. изучение особенностей образования дислокационных сегментов в полупроводнике в условиях тепловых ударов, а также их последующей динамики путем воздействия механических и магнитных полей.

**Объекты исследования.** Для изучения фазовых превращений использовались ориентированные в направлении [111] эпитаксиальные  $n-n^+$ -структуры, где в качестве  $n^+$  подложки использовались легированные фосфором кремниевые пластины толщиной 400 мкм с удельным сопротивлением 0.01 Ом·см, а в качестве  $n$ -эпитаксиального слоя использовался легированный фосфором кремний толщиной 30...50 мкм с  $\rho=30...40$  Ом·см. На поверхности пластин методом оптической фотолитографии формировались системы металлизации на основе пленок алюминия (толщиной 1...3 мкм), нанесенных методом электронно-лучевого испарения в вакууме при остаточном давлении  $2 \cdot 10^{-4}$  Па. На ряде пластин перед напылением металла выращивались пиролитические пленки оксида или нитрида кремния толщиной 0,1...0,3 мкм.

Для изучения образования структурных дефектов использовались пластины монокристаллического кремния, легированные бором или фосфором, ориентированные в направлении [111] и [100] с удельным сопротивлением  $\rho=0.01...40$  Ом·см.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Выявлены основные конкурирующие механизмы, связанные с контактным плавлением в системе кремний-алюминий и процессами оплавления металла, в условиях прохождения токовых импульсов через дорожку металлизации: при прохождении одиночного прямоугольного импульса тока длительностью не более 60 мкс и энергией 90 мДж наблюдается преобладание процессов оплавления металлической пленки над контактным плавлением на межфазной границе. При воздействии импульсов тока непрямоугольной формы длительностью от 80 мкс и выше с энергией до 250 мДж (скорость нарастания тока не более 50 мА/мкс) основным механизмом разрушения структур становится контактное плавление.

2. Установлен механизм перемещения межфазной границы при прохождении импульса тока произвольной формы через напыленную на кремний металлическую дорожку, связанный с тепловыделением на границе твердой и жидкой фазы в процессе прохождения импульса. Экспериментально определены скорости распространения жидкой фазы по поверхности кремния (5...30 м/с) в рассматриваемых условиях.

3. Обнаружено образование приповерхностных дислокаций после прохождения через дорожку металлизации одиночного импульса тока энергией свыше 120 мДж и длительностью более 100 мкс. Впервые экспериментально зафиксировано влияние предварительной экспозиции кристаллов в постоянном магнитном поле ( $B=0.7$  Тл,  $t=30$  мин) на увеличение плотности дислокаций в кремнии вблизи источника термоудара.

4. Впервые проведено исследование влияния постоянных магнитных полей на дислокационный ангармонизм монокристаллов кремния  $p$ -типа проводимости. Выявлено, что предварительная выдержка дислокационного кремния в постоянном

магнитном поле приводит к изменению нелинейного модуля упругости четвертого порядка  $\beta_4$ . По изменению  $\beta_4$  экспериментально зафиксировано увеличение средней длины колеблющегося дислокационного сегмента в кремнии  $L_d$  после экспозиции кристаллов в постоянном магнитном поле.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Выявлены и экспериментально подтверждены основные механизмы образования расплавленных зон на кремнии при воздействии импульсов тока различной формы.

2. Получены математические соотношения, позволяющие определить длину оплавленной зоны дорожки металлизации после прохождения одиночного импульса тока произвольной формы.

3. Обнаружено образование дислокационных полупетель в приповерхностных слоях кремния (глубиной до 30 мкм) после теплового удара, созданного импульсом тока прямоугольной и треугольной формы.

4. Установлено влияние предварительной экспозиции кристаллов в постоянном магнитном поле на величину нелинейного модуля упругости четвертого порядка, а также на длину колеблющихся дислокационных сегментов в кремнии.

5. Разработан измерительный комплекс, позволяющий исследовать полупроводниковые структуры при импульсном токовом воздействии (диапазон регулировки силы тока до 80 А; длительность переднего и заднего фронтов от 15 мкс; максимальная длительность импульса до 1,5 мс; частота повторения импульсов до 0.2 Гц).

6. На основании проведенных исследований разработана методика диагностики тонкопленочных систем на кремнии, которая успешно используется на предприятии для диагностики полупроводниковых датчиков.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Осциллографический метод применялся для регистрации тепловых процессов в системах металлизации (цифровой запоминающий осциллограф ЛА-НР9100), металлографические исследования результатов деградационных процессов осуществлялись при помощи оптической микроскопии (микроскоп МЕТАМ Р1, МИИ-4), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рентгеновский дифрактометр D8 DISCOVER Bruker AXS и электронный микроскоп JSM-5910LV JEOL), при подготовке образцов применялись электрохимические методы. Изображение поверхности образцов было получено с помощью сканирующего электронного двухлучевого микроскопа Helios NanoLab 660. Для моделирования и проведения расчетов на ЭВМ использовались численные методы.

#### **Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Скорость распространения жидкой фазы вдоль металлизированной поверхности полупроводника при прохождении импульса тока произвольной формы (длительностью от 50...250 мкс и энергией от 150 мДж) составляет 5...30 м/с.

2. Образование отдельных дислокационных сегментов вблизи источника термоудара в кремнии начинается при прохождении одиночных импульсов тока прямоугольной и треугольной формы длительностью 100 мкс и энергией 120 мДж.

3. Предварительная выдержка дислокационного кремния р-типа (бор) с удельным сопротивлением 1...0,05 Ом·см и плотностью дислокаций  $10^4$ - $10^6$  см<sup>-2</sup> в

постоянном магнитном поле ( $B=0.7$  Тл,  $t=30$  мин) при комнатной температуре приводит к изменению длины колеблющегося дислокационного сегмента  $L_d$  на 30%.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается использованием независимых экспериментальных методов для исследования фазовых превращений и дефектообразования в кремнии, в том числе растровой электронной и оптической микроскопии, магнитометрическими методами. Эксперименты проводились в лабораториях на кафедрах «Физика» и «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов», в ЦКП «Наукоемкие технологии в машиностроении» Московского политехнического университета, в аналитической лаборатории мультимасштабной микроскопии Технопарка «Сколково» (г. Москва), в научном центре волоконной оптики РАН (г. Москва) на калиброванном оборудовании.

Обработка результатов измерений производилась с использованием лицензионных пакетов программ MS Office, Mathcad Professional, программной системы конечно-элементного анализа ANSYS.

**Личный вклад автора.** Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при определяющем его участии. Автором разработан измерительный комплекс, необходимый для проведения эксперимента и обработки его результатов, проведено численное моделирование тепловых процессов в полупроводниковых структурах, выполнен комплекс микроскопических исследований, в результате которых определены особенности фазовых переходов в кремнии. Автором получены математические соотношения для определения длины оплавленной зоны дорожки металлизации на кремнии после прохождения одиночного импульса тока произвольной формы. На основе результатов экспериментального и аналитического исследований автор определила особенности дефектообразования в кремнии при импульсном воздействии и определила влияние экспозиции образцов в постоянном магнитном поле на дислокационный ангармонизм в кремнии, включая процессы релаксации.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012» (ФГУП «ВИАМ», Москва, 2012); Международный симпозиум «Физика кристаллов 2013», посвященный 100-летию со дня рождения профессора М. П. Шаскольской. (НИТУ «МИСИС», Москва, 2013); IV Международная научно-техническая конференция «Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике» (ИНМЭ РАН, Москва, 2014); 85-ая Международная конференция ААИ «Будущее автомобилестроения в России» (Университет машиностроения, Москва, 2014); V Международная конференция «Современные концепции научных исследований» (ЕСУ, Москва, 2014); Международная научно-практическая конференция «Естественные и математические науки в современном мире» (ИЦРОН, Уфа, 2014); 11-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014) (СГТУ имени Ю. А. Гагарина, Саратов, 2014); XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии» (МиС, Новосибирск, 2014); XII Международная научно-практическая конференция «Научное обозрение физико-математических наук и технических наук в XXI веке» (Prospero,

Москва, 2014); IX Международная конференция «Современные концепции научных исследований» (ЕСУ, Москва, 2014); VI Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», посвященная 90-летию со дня рождения профессора Ю.А. Скакова (НИТУ МИСИС, Москва, 2015); XXVIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (РГРТУ, Рязань, 2015).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражают 6 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 15 докладов, представленных на международных конференциях.

**Внедрение результатов.** Полученные экспериментальные результаты использованы на предприятии ООО «ОНПЦ «ИТ-Керамика»»; при подготовке отчетов по НИР (ГК №16.740.11.0514; проект 7.5397.2011; проект 9.8392.2017/БЧ; гранта РФФИ №15-07-02788 и №13-07-00514 и внедрены в учебный процесс в Московском политехническом университете.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация содержит 112 страниц основного текста, иллюстрированных 63 рисунками, список литературы, включающий 146 источников на 12 страницах, 4 приложения на 8 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы основные задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** представлен обзор научных публикаций, посвященных особенностям фазовых превращений полупроводниковых материалов и процессам дефектообразования в кремнии, разрушению систем металлизации на кремнии при работе в режимах высоких плотностей тока.

**Вторая глава** посвящена методическому обеспечению экспериментальных исследований, связанных с подготовкой образцов, созданием тестовых структур, формированием импульсов тока различной формы и методов регистрации откликов. Исследование осуществлялось на полученных тестовых структурах (рисунок 1) по электрическому отклику, снятому с различных ее участков при прохождении одиночных импульсов тока различной формы, полученных с помощью разработанного измерительного комплекса.

Комплекс состоит из задающего генератора, формирователя импульсов тока различной формы, цифрового запоминающего осциллографа. Параметры формирователя импульсов: диапазон регулировки силы тока до 80 А, длительность переднего и заднего фронтов от 15 мкс, максимальная длительность импульса до 1,5 мс; частота повторения импульсов до 0.2 Гц.

Осциллограммы  $U(t)$  в процессе прохождения импульса тока снимались соответствующими зондами с потенциальных площадок «1-12» (рисунок 1) и фиксировались цифровым запоминающим осциллографом.

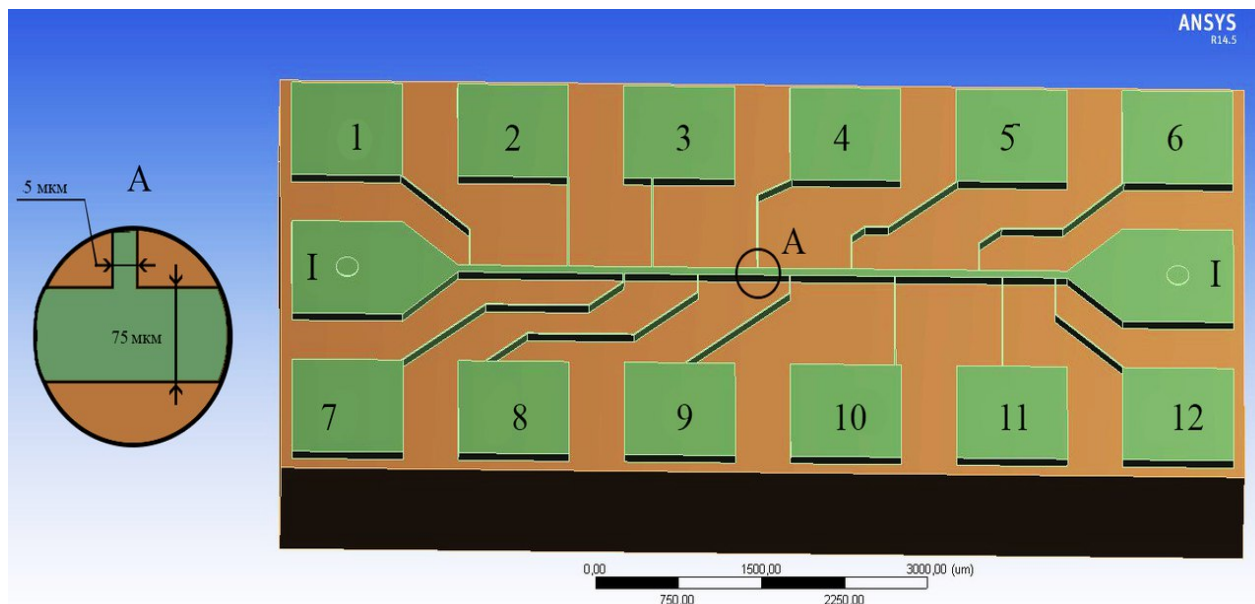


Рисунок 1. Тестовая структура «металлическая пленка-полупроводниковая пластина». Здесь I – токовые, 1-12 – контактные площадки для регистрации осциллограмм

Динамика температуры дорожки металлизации  $T(t)$  рассчитывалась по осциллограммам включения  $U(t)$  с учетом температурного коэффициента сопротивления алюминия ( $\alpha = 0,0043 \text{ K}^{-1}$ ).

**В третьей главе** представлен анализ фазовых превращений в кремнии, исследованы тепловые режимы работы полупроводниковой структуры, рассмотрены механизмы тепловой деградации, исследованы процессы «теплого» разрушения структуры при воздействии импульсов тока различной формы.

Динамика температуры системы Al-Si при пропускании одиночного импульса тока с линейно нарастающим фронтом различной амплитуды и длительностью 400 мкс представлена на рисунке 2.

При рассматриваемых тепловых нагрузках наблюдается лишь нагрев структур. Подобная ситуация (при аналогичных электрических мощностях), наблюдается и для прямоугольных импульсов.

Динамика нагрева дорожки металлизации детально представлена на рисунке 3. По результатам эксперимента можно условно разбить полученные кривые на три области: OA, AB и BC. Участок OA (аналогично O'A' и O''A'') характеризуется монотонным ростом  $U(t)$  при относительно малых временах  $t$  после включения импульса, связан с нагревом структуры (тонкой пленки металла) и определяется режимом отвода тепла в пластину полупроводника.

На участках AB, A'B', A''B'' на исследуемых структурах было зафиксировано начало фазообразования, проявляющееся на осциллограммах резким отклонением от монотонного роста, т.е. формированием расплавленной зоны и распространением ее вдоль дорожки металлизации. Участок BC, B'C', B''C'' характеризуется процессом контактного плавления на межфазной границе алюминий-кремний.



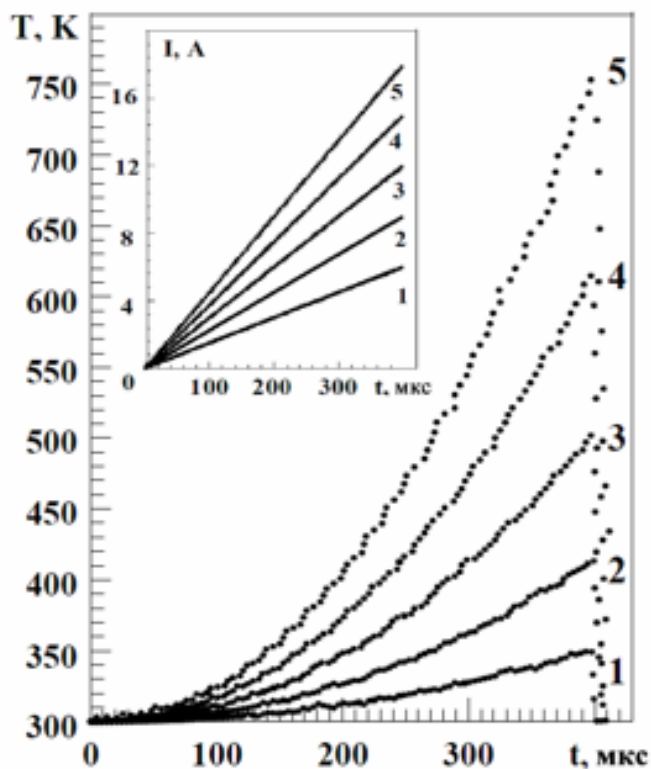


Рисунок 2. Динамика температуры  $T(t)$  Al-Si при пропускании одиночного импульса тока амплитудой длительностью 400 мкс и максимальным значением  $j_{\max}$  и энергией  $W$ :

- 1— $4 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> и 2.7 мДж;
- 2— $6 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> и 7.0 мДж;
- 3— $6 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> и 15 мДж;
- 4— $1 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> и 27 мДж;
- 5— $12 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> и 47 мДж.

Толщина пленки  $h_1=2$  мкм. На вставке: форма импульсов тока

$U(t), B$

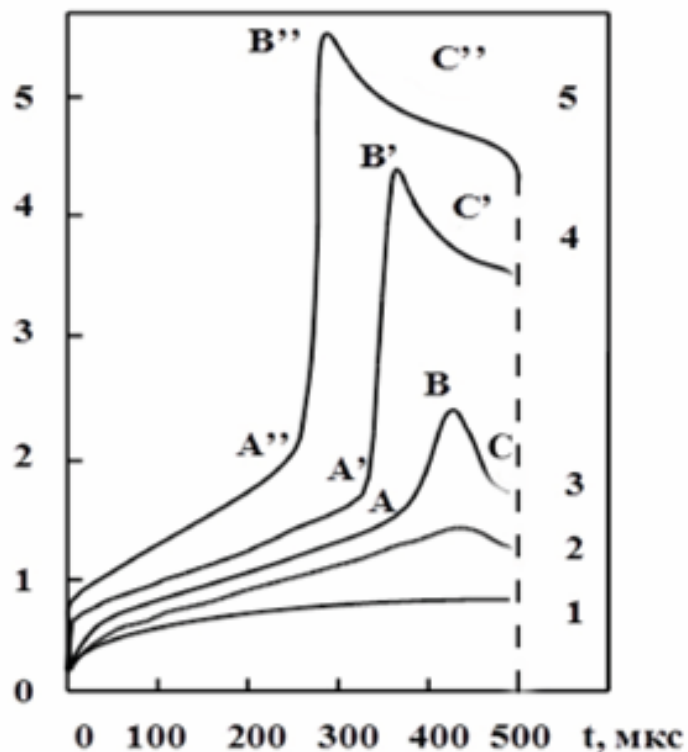
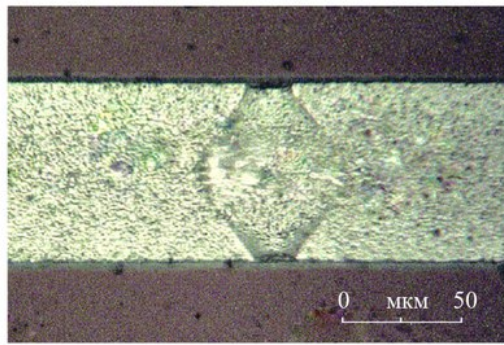


Рисунок 3. Вид осциллограмм  $U(t)$  при прохождении одиночного импульса тока через алюминиевую дорожку металлизации, лежащую на кремнии. Длительность импульса  $\tau_i=500$  мкс, амплитуда  $j$  (А/м<sup>2</sup>):

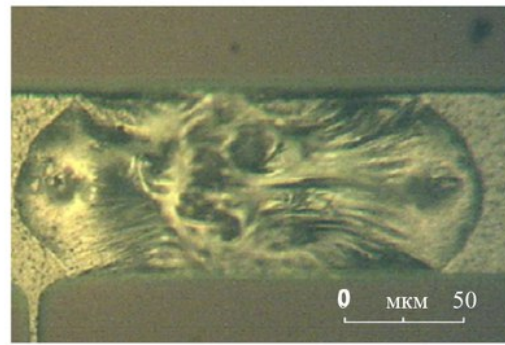
- 1— $4.5 \cdot 10^{10}$ ;
- 2— $5.0 \cdot 10^{10}$  (контактное плавление, без оплавления Al);
- 3— $5.2 \cdot 10^{10}$  (контактное плавление, с частичным оплавлением Al);
- 4— $5.6 \cdot 10^{10}$  и 5— $5.8 \cdot 10^{10}$  (полное оплавление Al)

Фотографии разрушения при прохождении одиночного импульса тока прямоугольной формы через алюминиевую дорожку металлизации, лежащую на кремнии, представлены на рисунке 4.

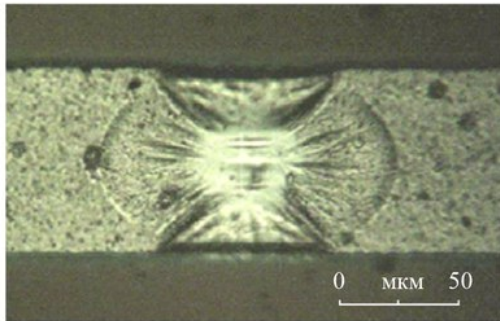
Увеличение токовых нагрузок вплоть до  $j_{\max}=1,2 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> приводит первоначально к формированию оплавленных зон (а, б, рисунок 4), а затем и к оплавлению участков (в, г, рисунок 4), а впоследствии их смыканию (д, рисунок 4) и полному оплавлению всего металлизированного участка полупроводника (е, рисунок 4).



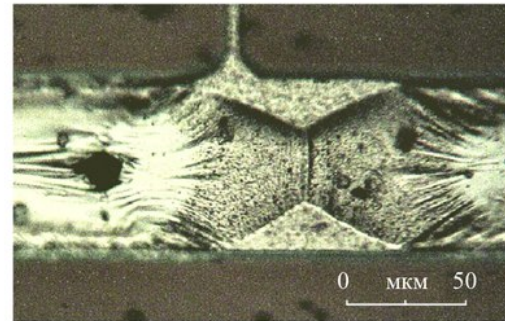
а



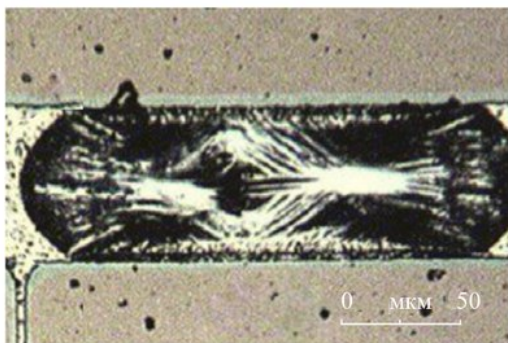
Г



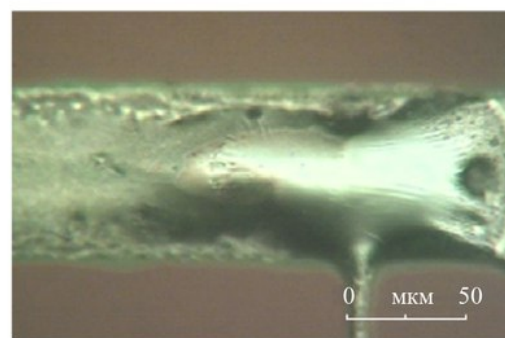
б



Д



в



е

Рисунок 4. Фотографии фрагментов тестовой структуры после прохождения прямоугольного токового импульса длительностью 500 мкс и амплитудой:  
 а– $j=5.0 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> (начальный этап формирования оплавленной зоны, соответствует кривой 2, рисунка 3); б–  $j=5.1 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> (развитие оплавленной зоны);  
 в, г– $j=5.2 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> (формирование оплавленной зоны и начало перемещения зоны, соответствует кривой 3, рисунка 3);  
 д– $j=5.6 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> (динамика оплавленной зоны, включая процессы «встречи» соседних оплавленных участков, соответствует кривой 3, рисунка 3);  
 е– $j=5.8 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> (оплавление всей структуры, соответствует кривой 4, рисунка 3).  
 Ширина дорожки 75 мкм

Направленность и средняя скорость перемещения  $V$  оплавленной зоны системы металлизации в процессе прохождения импульса тока оценивалась по динамике осциллограмм  $U(t)$  (рисунок 5). Зная расстояние между участками, с которых снимались осциллограммы и время  $\Delta t$ , можно оценить величину  $V$ . Для использованных в работе импульсов её значение составляло 5...30 м/с.

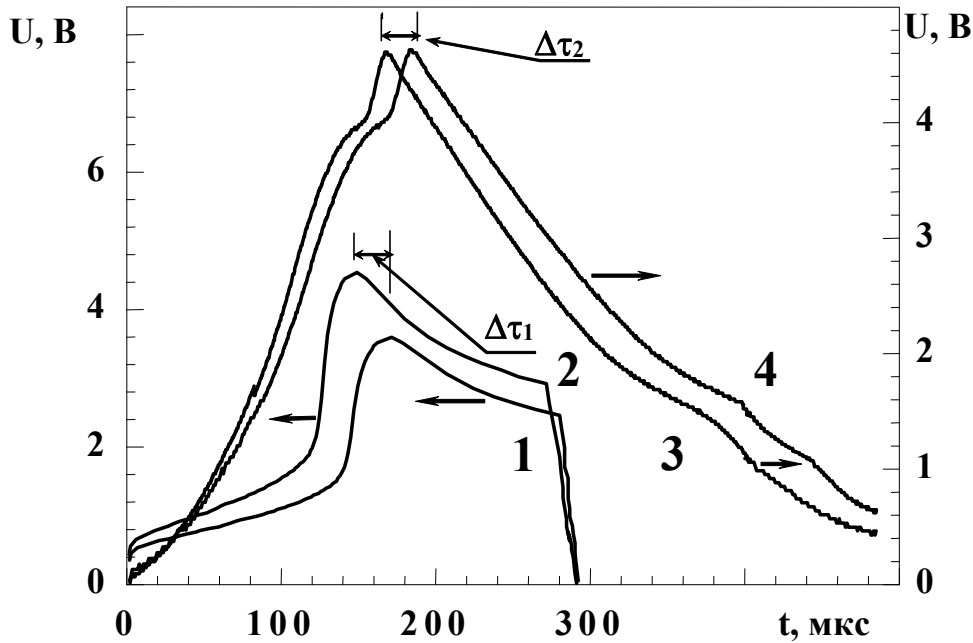


Рисунок 5. Осциллограммы  $U(t)$ , снятые с двух участков тестовой структуры системы Si-Al при прохождении одиночного прямоугольного импульса тока амплитудой  $6.1 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>, длительностью 280 мкс (1,2) и линейно нарастающего импульса тока при: 3-  $j_{\max} = 4,8 \cdot 10^{10}$  и 4-  $j_{\max} = 4,9 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>. Толщина пленки алюминия 5 мкм. Сигнал снимался с участков, длиной 660 мкм и находившихся на 1.5 мм (зонды 2-3, кривые 1,3) и на 1.8 мм (зонды 8-4, кривые 2,4) от отрицательного электрода;  $\Delta\tau_1 = 25$  мкс,  $\Delta\tau_2 = 23$  мкс

Детально процесс распространения расплавленной зоны, связанный с тепловыделением на ее границе, представлен на рисунке 6. Длина оплавленного участка дорожки металлизации, лежащей на кремнии может быть рассчитана по формуле (1):

$$x = \frac{(\rho_{ol} - \rho_{os})\sqrt{a_1}}{S^2 H} \int_0^{\tau} I^2(\tau) \sqrt{\tau} d\tau. \quad (1)$$

Тогда интегрирование уравнения (1) позволяет получить зависимость длины оплавленной части дорожки металлизации  $x_l$  от времени  $\tau$  для импульсного тока с линейно нарастающим фронтом:

$$x(\tau) = \frac{(\rho_{ol} - \rho_{os})\sqrt{a_1}}{S^2 H} k^2 \frac{2}{7} \tau^{\frac{7}{2}}. \quad (2)$$

В случае прямоугольного импульса тока:

$$x(\tau) = \frac{(\rho_{ol} - \rho_{os})\sqrt{a_1} I_0^2}{S^2 H} \tau^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{ol} = 2.4 \cdot 10^{-7}$  Ом·м,  $\rho_{os} = 0.98 \cdot 10^{-7}$  Ом·м – удельное сопротивление жидкого и твердого алюминия,  $b = 75$  мкм,  $h = 5$  мкм – ширина и толщина дорожки, соответственно,  $S = b \cdot h$  – площадь поперечного сечения проводника,  $H = 10.2 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> – удельная теплота плавления алюминия,  $a_1 = 1.6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с – температуропроводность алюминия,  $\tau$  – время оплавления фрагмента  $[0 \dots x]$  дорожки металлизации (отсчитываемое от момента А – или А', А'' – на осциллограммах рисунка 3).

Проверка уравнения (3) производилась на структурах Al-SiO<sub>2</sub>-Si и Al-Si. При достижении «критических» плотностей тока на поверхности алюминиевой пленки наблюдалось появление расплавленных зон (рисунок 7).

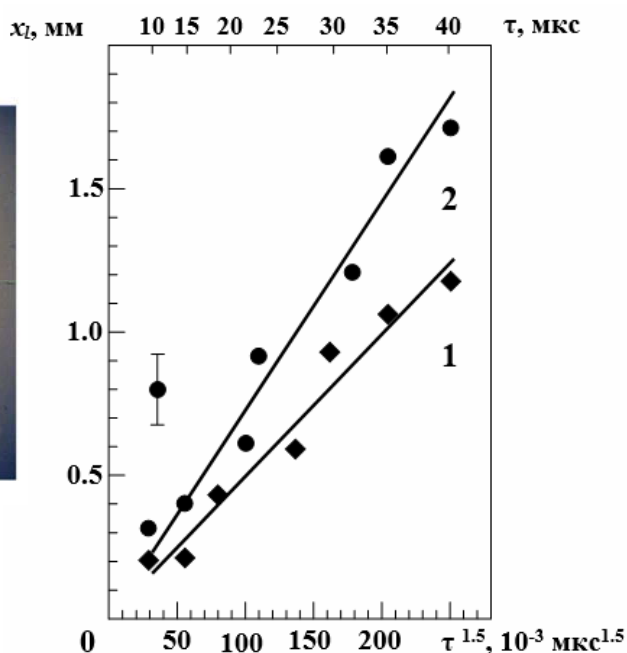
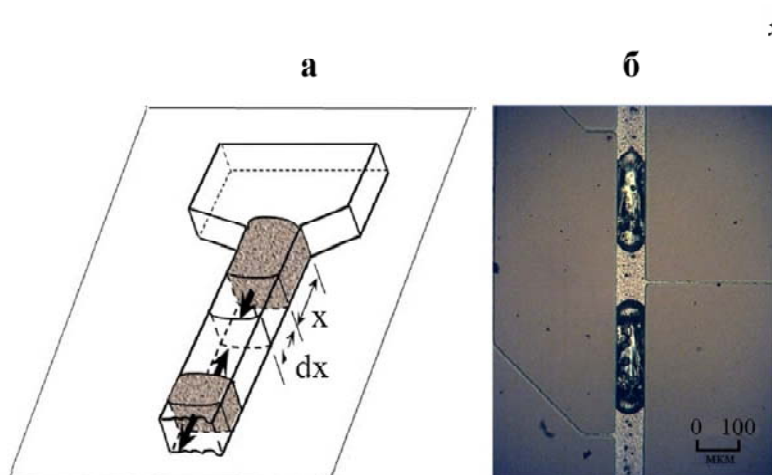


Рисунок 6. Схема распространения оплавленных зон в алюминиевой металлической дорожке (а), экспериментальный образец (б). На фотографии - участки оплавления структуры после прохождения одиночного импульса тока амплитудой  $7 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> и длительностью 400 мкс, энергия импульса 64 мДж

Рисунок 7. Зависимость длины оплавленной зоны от времени оплавления  $\tau$  для систем:

1- Al-Si, 2- Al-SiO<sub>2</sub>-Si. Амплитуда импульса тока  $j=6.0 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>, а длительность  $\tau_1$  варьировалась от 300 до 500 мкс

Нетрудно видеть, что с учетом используемых числовых значений параметров, величина  $x_l$  согласуется с экспериментом как для бинарной системы Al-Si, так и для многослойной структуры Al-SiO<sub>2</sub>-Si.

В работе были проведены электронно-микроскопические исследования (рисунок 8) на сканирующем электронном микроскопе Helios NanoLab 660.

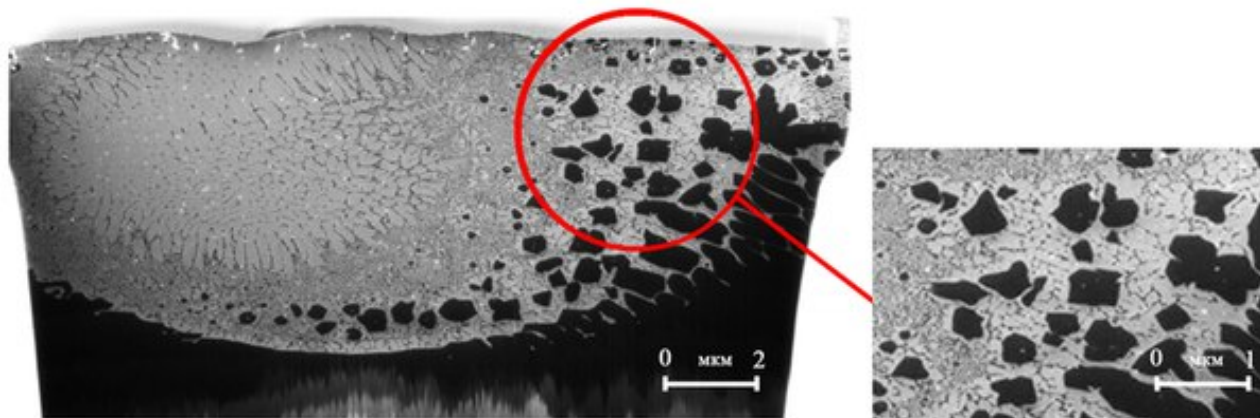


Рисунок 8. РЭМ-изображение участка тестовой структуры Al-Si после прохождения прямоугольного импульса тока

Электронная микроскопия подтвердила наличие контактного плавления на межфазной границе Al-Si. Возникновение градиентов температур на межфазной границе приводит к возникновению механических напряжений, что способствует образованию структурных дефектов вблизи источника термоудара (рисунок 9).

В четвертой главе проведен анализ дефектообразования в исследуемых полупроводниковых структурах при деградации системы металлизации в нестационарных условиях. Детально рассмотрен процесс образования дислокаций вблизи источника термоудара на поверхности кремния; экспериментально выявлено влияние постоянных магнитных полей на дефектообразование дислокационных сегментов исследуемых структур.

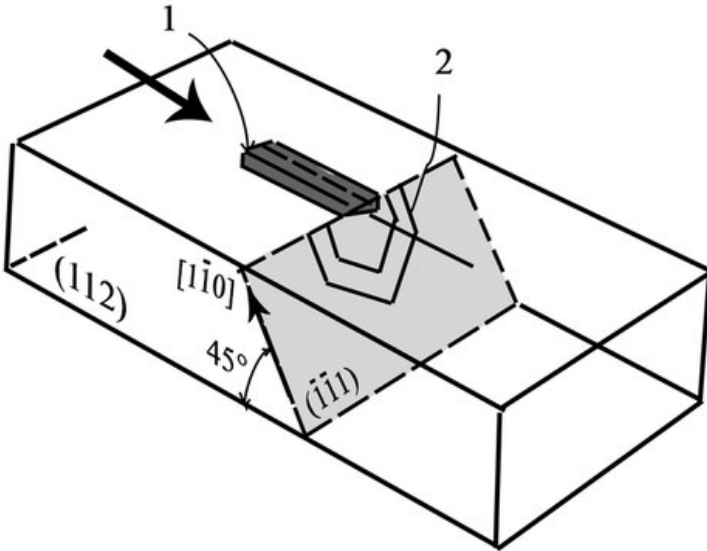


Рисунок 9. Фрагмент напыленной алюминиевой пленки (1) толщиной 1 мкм и шириной 75 мкм и конфигурация возникающих дислокационных полупетель в монокристаллах кремния (2) после теплового удара, вызванного прохождением одиночного прямоугольного токового импульса длительностью 500 мкм и амплитудой  $6 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>

Тепловые нагрузки, приводящие к процессам плавления в системах металлизации способствуют возникновению больших механических напряжений вблизи источника термоудара, что может приводить к формированию дислокационных полупетель вблизи таких областей.

Возможность пластической деформации поверхности пластины определяется величиной и направлением градиента температуры  $\nabla T$ , возникающего при распространении тепла от локального источника нагрева, и задающего направление действия пропорциональных ему термических напряжений. Для расчета температурного поля, создаваемого прямоугольным фрагментом металлизации длиной  $\ell$  и шириной  $b$ , использовались полученные уравнения, описывающие динамику  $T(y,t)$  на поверхности полупроводника после включения импульса тока. Так как температура поверхности пластины зависит только от координаты  $y$ , которая отсчитывается вдоль дорожки,  $\nabla T$  также будет направлен по  $y$  и равен:

$$\frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y} = \frac{I^2 R}{2\pi\lambda lb} \left[ E_1\left(\frac{(b/2 - y)^2}{4a\tau}\right) - E_1\left(\frac{(b/2 + y)^2}{4a\tau}\right) \right]. \quad (4)$$

Здесь  $\tau$  – время с момента включения импульса тока; координата  $y$  описывает точку измерения температуры на поверхности полупроводника;  $I$  – амплитуда прямоугольного импульса;  $E_1(z) = \int_z^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$  – интегральная экспонента,  $R$ ,  $a$ ,  $\lambda$  – среднеинтегральные (по температуре) значения сопротивления дорожки металлиза-

ции, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности кремния соответственно. Результаты численных расчетов температурного профиля и градиента температуры по ширине дорожки приведены на рисунках 10,11.

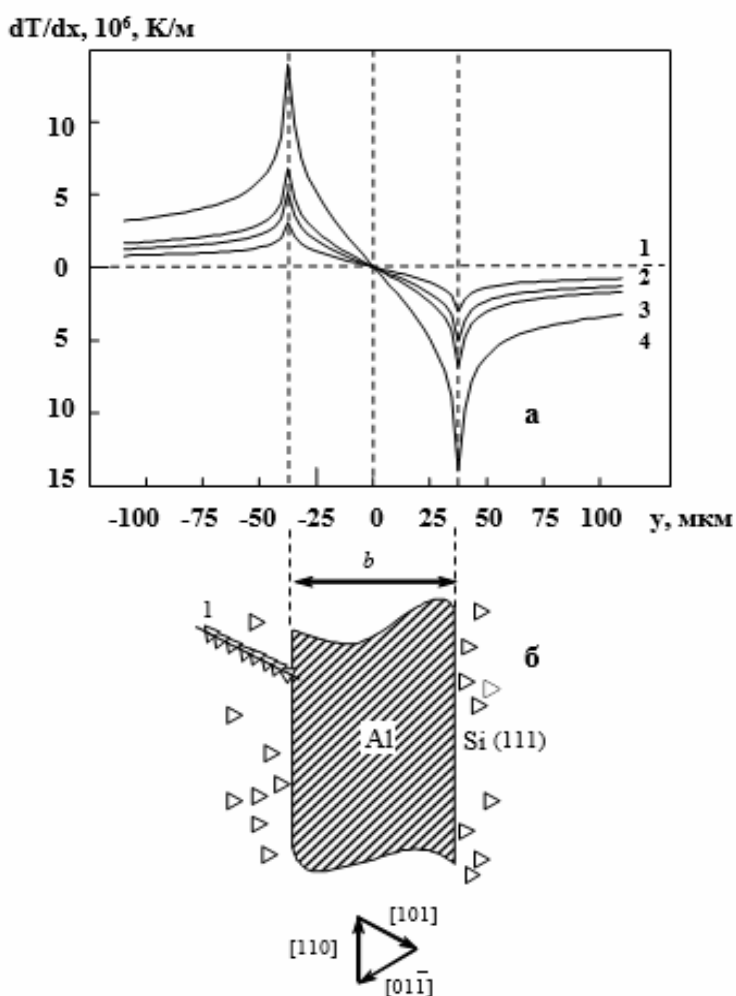
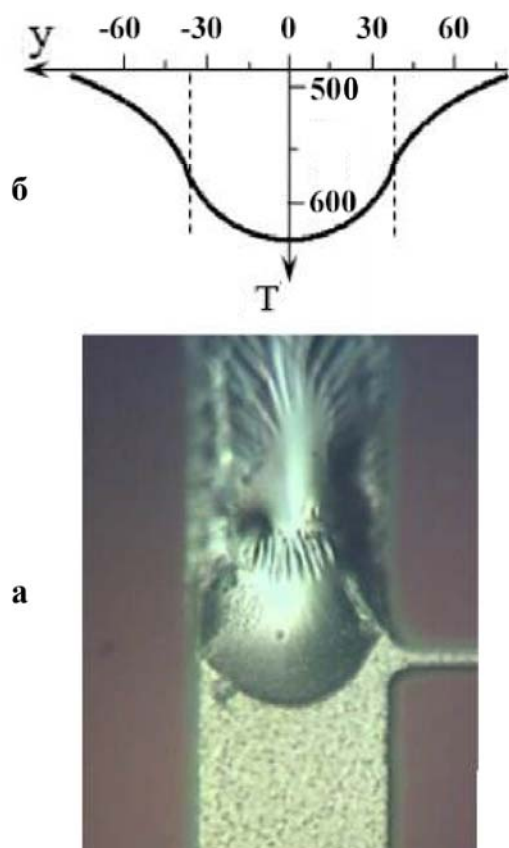


Рисунок 10. Фотография фрагмента оплавления тестовой структуры (а) и расчетная зависимость температуры на поверхности кремниевой пластины (б) после прохождения прямоугольного импульса тока  $j=7 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  и  $\tau=500 \text{ мкс}$ . Ширина дорожки 75 мкм

Рисунок 11. Расчетная зависимость градиента температуры (а) на поверхности кремниевой пластины (в направлении поперечном дорожке металлизации) после пропускания импульса тока длительностью 130 мкс и амплитудой: 1– $4.9 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  ( $I=11 \text{ A}$ ); 2– $6.2 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  ( $I=14 \text{ A}$ ); 3– $7.1 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  ( $I=16 \text{ A}$ ); 3– $9.8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  ( $I=22 \text{ A}$ ). Пунктирные линии ( $y = \pm \frac{b}{2}$ ) – границы дорожки металлизации

Вычисления проводились с учетом температурной зависимости параметров теплопереноса  $\lambda$  и  $a$ . На рисунке 11 схематично изображены ямки травления (б) после прохождения импульса тока и кристаллографические направления, вдоль которых нанесена дорожка металлизации и реализуется движение дислокационных сегментов.

Высокие значения  $\frac{\partial T}{\partial y} > 10^7 \text{ K/m}$ , возникающие при прохождении импульсов тока ниже  $j < j_{\text{кр}}$  означают, что даже при штатных режимах работы систем металлизации

мощных полупроводниковых приборов возможно появление дислокационных сегментов вблизи локальных тепловых источников (средняя плотность дислокаций  $N_d$  не превышала  $10^7 \text{ 1/м}^2$ ).

Действительно, травление поверхности кремния после прохождения импульсов показала наличие ямок травления поверхностных дислокационных полупетель вблизи дорожки металлизации (рисунок 11) в области максимальных градиентов температуры.

Для исследования дислокационной структуры использовался акустический метод составного осциллятора. Измеряя величину модулей упругости четвертого порядка

$$\beta_d = -\frac{(1 + 3\nu - 7\nu \sin^2 \theta) N_d L_d^4 \Omega^4 E_0^4}{160(1 + \nu - 3\nu \sin^2 \theta)^4 b^2 g^3 \mu^3} \quad (5)$$

в полупроводнике, можно проследить влияние параметров дислокационной структуры ( $N_d, L_d^2, \Theta$ ) на величину нелинейного модуля упругости. Здесь  $\Omega$ - ориентационный фактор,  $\mu$ -модуль сдвига;  $g$ -безразмерный коэффициент, характеризующий размеры упругого поля дислокации;  $N_d, L_d$  - средняя плотность дислокаций и средняя длина колеблющегося дислокационного сегмента соответственно;  $\nu = 0.27$ - коэффициент Пуассона кремния;  $\theta$ - угол между вектором Бюргерса  $b$  и осью дислокации.

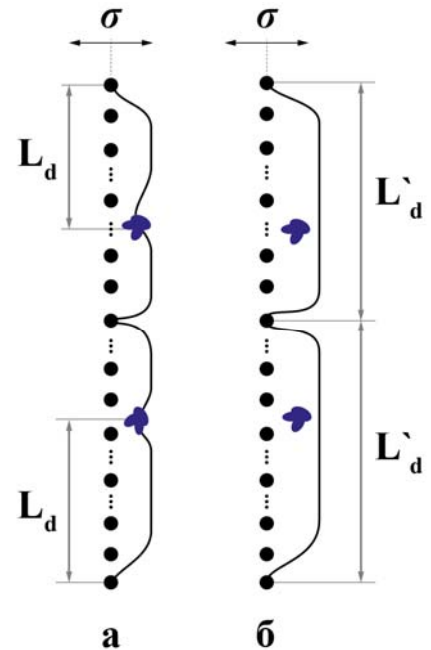
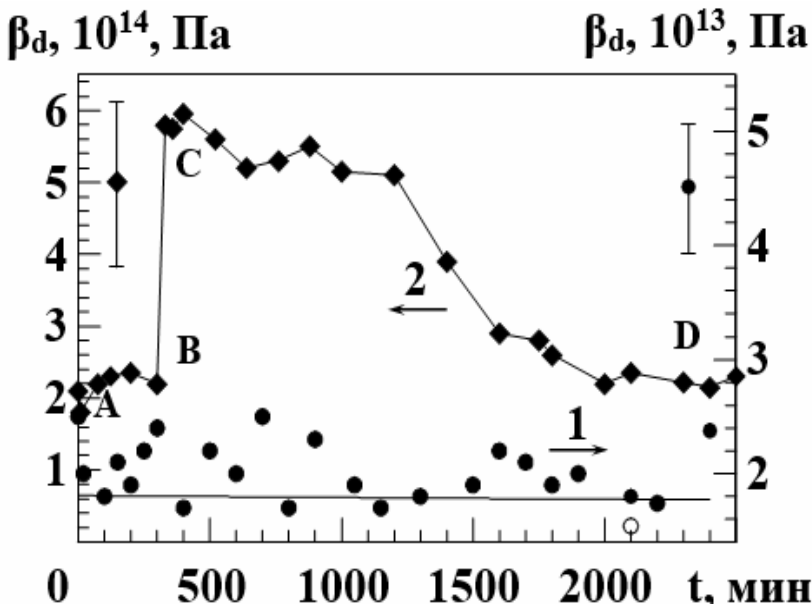


Рисунок 12. Эволюция нелинейного модуля  $\beta_d(t)$  в процессе выдержки монокристаллического кремния (р-тип,  $\rho=5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) в естественных условиях: АВ- до обработки в МП; CD - после 30 минутной обработки в магнитном поле  $B=0.7 \text{ Тл}$  при комнатной температуре: 1- бездислокационный образец; 2- образец со средней плотностью дислокаций  $N_{ds}=2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$

Рисунок 13. Динамика дислокаций в легированных кристаллах кремния р-типа до (а) и после экспозиции (б) в постоянном МП,  $\sigma$  – действующее напряжение

Из (5) следует, что  $\beta_d \sim N_d L_d^4$ , поэтому, если в условиях эксперимента  $N_d$  остается постоянной, то изменение нелинейного модуля  $\beta_d$  можно однозначно связать с изменением средней длины колеблющегося дислокационного сегмента. Кроме определения характера дислокационной структуры (по углу  $\Theta$ ), данная методика использовалась для экспериментального доказательства влияния постоянного магнитного поля на состояние примеси в кремнии.

Из рисунка 12 видно, что предварительная экспозиция дислокационного кремния в постоянном МП в течении 30 минут ( $B=0.7$  Тл) при комнатной температуре приводит к 3-х кратному увеличению (участок ВС) значения  $\beta_d$ . Поскольку выдержка дислокационного кремния в МП при комнатной температуре не меняет величину  $N_d$ , то наблюдаемая на рисунке 12 зависимость  $\beta_d(t)$  связана с изменением длины колеблющегося дислокационного сегмента (рисунок 13) и, следовательно, изменением состояния стопоров после выдержки образцов в постоянном магнитном поле. Бездислокационная пластина кремния (свидетель) не проявляет чувствительности к выдержке в постоянном МП. Следует подчеркнуть, что средняя длина колеблющегося дислокационного сегмента  $L_d$  определяется взаимодействием дислокационной линии с различными стопорами в полупроводнике. От атомарной структуры образовавшихся в результате релаксации комплексов сильно зависит эффективность их взаимодействия с колеблющимся дислокационным сегментом.

В нашем случае наблюдается увеличение средней длины колеблющегося дислокационного сегмента  $L_d$  на  $\sim 30\%$  (ВС, рисунок 12). Обращает также на себя внимание и время релаксации наблюдаемых эффектов, которое составляет  $\sim 60$  часов. Это согласуется с полученными ранее данными о разупрочняющем действии постоянных магнитных полей на монокристаллы кремния с дислокациями.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан измерительный комплекс для регистрации фазовых превращений в кремнии при локальном поверхностном нагреве, позволяющий пропускать через тестовые структуры импульсы тока (прямоугольной, треугольной и синусоидальной форм с энергией до 500 мДж и длительностью 50...1500 мкс) и регистрировать осциллограммы напряжения с различных участков тестовой структуры.

2. Установлена взаимосвязь процессов контактного плавления на межфазной границе полупроводник-металл и оплавления пленки металла: при прохождении одиночного прямоугольного импульса тока длительностью не более 60 мкс и энергией 90 мДж наблюдается преобладание процессов оплавления металлической пленки над контактным плавлением на межфазной границе. Импульсы тока прямоугольной формы длительностью от 80 мкс и выше с энергией до 250 мДж (скорость нарастания тока не более 50 мА/мкс) меняют приоритет, и начальным механизмом разрушения структур становится контактное плавление.

3. Установлен механизм перемещения расплавленной зоны алюминиевой металлизации по поверхности кремния при прохождении токового импульса (прямоугольной и треугольной форм длительностью от 50...1000 мкс и энергией более 150 мДж). При этом скорости распространения жидкой фазы вдоль дорожки металлизации составляют 5...30 м/с, что может быть использовано для оптимизации параметров токовых импульсов при программировании ПЗУ.



4. Выявлены особенности образования приповерхностных дислокаций после прохождения через дорожку металлизации одиночного токового импульса (треугольной и прямоугольной форм) энергией выше 120 мДж и длительностью более 100 мкс. Увеличение мощности токовых импульсов приводит к активизации процессов дефектообразования, носящих пороговый характер: наиболее активно дислокационные петли появляются при прохождении импульсов тока мощностью свыше 90 мДж и длительностью 400 мкс. Это соответствует достижению температуры пластического течения кремния и активному развитию фазовых превращений в системе полупроводник-металл.

5. Впервые обнаружено, что предварительная экспозиция дислокационного кремния в постоянном магнитном поле приводит к изменению нелинейного модуля упругости четвертого порядка  $\beta_d$ . По динамике  $\beta_d(t)$  сделан вывод об увеличении длины колеблющегося дислокационного сегмента  $L_d$  на 30 % после экспозиции образцов в постоянном магнитном поле ( $B=0.7$  Тл,  $t=30$  мин). Впервые зафиксировано время релаксации наблюдаемых эффектов, которое составило 60 часов.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:**

1. Thermal shock and degradation of metallization systems on silicon//A.A. Skvortsov, S.M. Zuev, M.V. Koryachko, V. Glinskiy//Microelectronics International/ - 2016.- 33(2) - P. 102-106.

2. Effect of a constant magnetic field on dislocation anharmonicity in silicon/A.A. Skvortsov, A.V. Karizin, L.V. Volkova, M.V. Koryachko//Physics of the Solid State.- 2015. – Vol. 57. - P. 914-918.

3. Phase transformations in metallization systems under conditions of nonstationary thermal action/A.A. Skvortsov, S.G. Kalenkov, M.V. Koryachko//Technical Physics Letters.-2014. – Vol. 40. - P. 787-790.

4. Metallization systems at pulse current influence. Phase transitions in the conditions of thermal shock/A.A. Skvortsov, S.M. Zuev, M.V. Koryachko// APEDE 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering.-2014. – Vol. 2. - P. 333-340.

5. Electrothermal degradation of systems of metallization at non-stationary current influences /A.A. Skvortsov, S.M. Zuev, M.V. Koryachko// APEDE 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering.-2014. – Vol. 2. - P. 340-343.

**Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Тепловые удары как источники структурных дефектов в монокристаллах кремния/ А. А. Скворцов, М.В. Корячко, В. В. Глинский// Вестник Тамбовского университета. Научно-теоретический и практический журнал. – 2013. - №4, т.18. - с. 1729-1730.

2. О формировании и миграции расплавленных зон в поле градиента концентрации дислокаций в кремнии/ А. А. Скворцов, М.В. Корячко// Вестник Тамбовского университета. Научно-теоретический и практический журнал. – 2013. - №4, т.18. - с.1767-1768.

3. К вопросу изучения макроскопических включений в полупроводниковых кристаллах/А.А. Скворцов, С.М. Зуев, М.В. Корячко, И.Е. Чернецкая// Вестник Тамбовского университета. Серия естественные и технические науки. – 2016. - №3, т.21. – с.1311-1313.

**Прочие публикации:**

1. Миграция расплавленных включений Al-Si в поле структурной неоднородности кремния/А.А. Скворцов, М.В. Корячко// Материалы Международного симпозиума «Физика кристаллов 2013», посвященный 100-летию со дня рождения профессора М. П. Шаскольской. – Москва, 2013. - с. 207-209.

2. Тепловые процессы в паяных соединениях: диагностика и прогнозирование деградационных процессов при повышенных тепловых нагрузках/ А. А. Скворцов, С. М. Зуев, М.В. Корячко// Материалы V Международной конференции «Современные концепции научных исследований». – Москва, 2014. - №5. - с.33-38.

3. Фазовые превращения в системах металлизации объемных проводников при воздействии электрических импульсов/ А. А. Скворцов, С. М. Зуев, М.В. Корячко// Материалы Международной научно-практической конференции «Естественные и математические науки в современном мире». – Уфа, 2014. - с.10-13.

4. Особенности образования и распространения трещин вблизи локального теплового источника на поверхности керамик и полупроводников/А.А. Скворцов, С.М. Зуев, М.В. Корячко// Материалы XI Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии» - Новосибирск, 2014. - с.48-51.

5. Магнитопластичность кремния: экспериментальные результаты и физические механизмы/А.А. Скворцов, А.В. Каризин, М.В. Корячко// Материалы XI Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии» - Новосибирск, 2014. - с.57-62.

6. Физико-механические свойства высокопористой керамики на основе диатомита/ А.А. Скворцов, В.П. Хортов, М.В. Корячко// Материалы XII Международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических наук и технических наук в XXI веке» - Москва, 2014. - с.45-49.

7. Магнитостимулирование дефектообразования в кремнии вблизи источника термоудара / А.А. Скворцов, М.В. Корячко// Материалы XII Международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических наук и технических наук в XXI веке» - Москва, 2014. - с.52-55.

8. Тепловая деградация систем металлизации полупроводниковых структур и керамик/ А. А. Скворцов, С. М. Зуев, М.В. Корячко// Материалы IX Международной конференции «Современные концепции научных исследований». – Москва, 2014. - №9. -с.13-15.

9. Экспериментальное изучение магниторезонансного упрочнения монокристаллов кремния/ А.А. Скворцов, Л.В. Волкова, М.В. Корячко// Материалы IX Международной конференции «Современные концепции научных исследований». – Москва, 2014. - №9. - с.15-18.

10. Влияние постоянных магнитных полей на дефектообразование в кремнии вблизи локальных тепловых источников/ А.А. Скворцов, С.М. Зуев, Е.Б. Волошинов, М.В. Корячко// Материалы VI Международной конференции «Кристаллофизи-

ка и деформационное поведение перспективных материалов», посвященная 90-летию со дня рождения профессора Ю.А. Скакова. – Москва, 2015. – с.127-130.

11. Моделирование фазовых превращений в системах металлизации в условиях теплового удара/А.А. Скворцов, М.В. Корячко, В.П. Хортов, С.М. Зуев, С.Г. Каленков// Материалы XXVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Рязань, РГРТУ, 2015. – №8. - с. 148-153.

12. Моделирование дефектообразования в полупроводнике, содержащем включения вторых фаз/А.А. Скворцов, М.В. Корячко, С.М. Зуев, И.Е. Чернецкая, И.В. Холщева// Материалы XXVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Рязань, РГРТУ, 2015. – №8. - с. 185-190.

13. Исследование фазовых превращений систем металлизации и контактах полупроводниковых структур при воздействии электрических импульсов//А.А. Скворцов, М.В. Корячко// Материалы XXVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Рязань, РГРТУ, 2015. – №7 - с. 335-341.

Корячко Марина Валерьевна

## **ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ НАГРЕВЕ**

### **Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Московский политехнический университет  
107023, г. Москва, ул. Б.Семеновская, 38.