

На правах рукописи

ФАДЕЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РОСТА
МОНОКРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ
НА ЗАТРАВКАХ РАЗЛИЧНЫХ
КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТАЦИЙ**

специальность 05.27.06 – технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра микро- и наноэлектроники.

Научный руководитель: **Кандидат технических наук
Лебедев Андрей Олегович,**
старший научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Официальные оппоненты: **Доктор технических наук
Карачинов Владимир Александрович,**
профессор кафедры проектирования и технологии радиоаппаратуры Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого.

**Кандидат технических наук
Афанасьев Алексей Валентинович,**
заместитель директора НОЦ «Нанотехнологии» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Ангстрем».

Защита состоится «10» октября 2013 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан «6» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н, профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа посвящена оптимизации дефектной структуры монокристаллов карбида кремния политипа 4Н, выращенных с помощью модифицированного метода Лели на затравках различных кристаллографических ориентаций.

Дефектная структура в слитках карбида кремния является следствием многих причин. Основные из них — наследование дефектов из затравки и релаксация упругих напряжений в растущем слитке. В качестве источников напряжения в растущем слитке обычно рассматривают осевой и радиальный градиенты температуры, поликристаллическое обрамление и высокие концентрации примесей, при этом креплению затравки к держателю уделяется достаточно мало внимания. В работе рассмотрено, как влияет несовпадение параметров решетки затравки и держателя на введение напряжений в растущий слиток и, следовательно, формирование дефектной структуры. Также было рассмотрено влияние осевого градиента температур на введение упругих напряжений в слиток.

Использование небазисных граней затравки (призматических, ромбоэдрических) привлекает большое количество исследователей возможностью создания на их основе приборов с улучшенными характеристиками. Широкое распространение приборов на подложках SiC нетрадиционных ориентаций требует налаживание монокристаллического роста на затравках нетрадиционных ориентаций. Первые попытки выращивания кристаллов SiC на призматических гранях выявили огромное количество дефектов упаковки, формирующихся в течение роста. При этом скрупулезного описания дефектной структуры выполнено не было. Также, неизвестны зависимости генерации дефектов упаковки от ориентации затравки и преобладающего типа примеси в атмосфере ростовой камеры.

Для оптимизации дефектной структуры монокристаллов SiC, выращенных на базисной грани затравки, недавно был предложен метод многостадийного роста с использованием призматических граней, т.н. RAF-процесс [1]. При этом рост проводился как на грани (11-20), так и на грани (10-10). Различий в дефектной структуре выявлено не было, что, однако, противоречит последующим исследованиям. Поэтому была изучена дефектная структура монокристаллов SiC, выращенных на призматических гранях

затравки, подобрана наилучшая с точки зрения дефектной структуры грань и проведен RAF-процесс.

Вышеупомянутые направления исследований представляют несомненный научный интерес и практическую значимость.

Цель работы заключалась в оптимизации дефектной структуры монокристаллов карбида кремния политипа 4H, выращенных на затравках различных кристаллографических ориентаций.

Для достижения данной цели решались следующие **задачи**:

1. Расчет упругих напряжений, вводимых в растущий кристалл в результате различия ТКР затравки и держателя. Подбор оптимального материала держателя.
2. Расчет упругих напряжений, вводимых в растущий кристалл под действием осевого температурного градиента.
3. Изучение особенностей дефектной структуры, как результата релаксации упругих напряжений, монокристаллов 4H-SiC, выращенных на призматических и ромбоэдрической гранях затравки.
4. Изучение особенностей дефектной структуры монокристаллов 4H-SiC в зависимости от типа легирующей примеси.
5. Проведение многостадийного процесса роста с использованием выбранной небазисной грани затравки (RAF-процесс).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые продемонстрирована возможность подбора оптимального материала затравкодержателя на основе расчета удельной упругой энергии монокристаллов SiC, образующейся в результате различия температурных коэффициентов линейного расширения затравки и держателя. Показано, что влияние осевого градиента температуры, как источника упругих напряжений, незначительно.
2. Впервые показано, что рост на призматических гранях 4H-SiC характеризуется генерацией высокой плотности дефектов упаковки типа (5,2) в нотации Жданова (внутренний по Франку). Для ромбоэдрических граней наряду с этим наблюдается наследование прорастающих дислокаций из затравки.
3. Впервые продемонстрирован успешный рост политипа 4H на кремниевой грани затравки с ориентацией (11-22).

4. В данной работе впервые установлена зависимость генерации дефектов упаковки от ориентации используемых затравок. Показано, что морфология дефектов упаковки в 4H-SiC n-типа изменяется при отклонении затравки от (11-20) к (10-10).
5. В данной работе впервые установлена зависимость генерации дефектов упаковки от типа нескомпенсированной примеси. Показано, что морфология дефектов упаковки в 4H-SiC, выращенном на грани (11-20) затравки, изменяется при переходе от области n-типа к области p-типа.

Научная и практическая значимость работы сводится к следующему:

1. Сформулирован метод выбора материала затравкодержателя таким образом, чтобы уменьшить упругие напряжения, вводимые в растущий слиток карбида кремния.
2. Показано, что осевые температурные градиенты менее 30 К/см являются приемлемыми и не являются причиной образования дефектной структуры в растущем слитке.
3. Определен тип дефектов упаковки, образующихся при росте на призматических гранях затравки — (5,2) в нотации Жданова, внутренний по Франку. Это значит, что такие дефекты упаковки не приводят к деградации характеристик биполярных приборов в результате механизма REDM (движение дислокаций, вызванное рекомбинацией) [2].
4. Продемонстрирована возможность значительного улучшения дефектной структуры слитков 4H-SiC n-типа в результате многостадийного процесса роста (RAF-процесса) с использованием промежуточной затравки ориентации (10-10).
5. Показано, что морфология образующихся дефектов упаковки зависит от типа нескомпенсированной примеси.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основным фактором, определяющим уровень напряжений в растущем слитке, является крепление затравки к держателю.
2. Рост на призматических гранях 4H-SiC характеризуется генерацией высокой плотности дефектов упаковки типа (5,2) в нотации Жданова (внутренний по Франку). Для ромбоэдрических граней наряду с этим наблюдается наследование прорастающих дислокаций из затравки.

3. Морфология дефектов упаковки в n-4H-SiC зависит от ориентации призматической затравки.
4. Морфология дефектов упаковки в 4H-SiC при росте на грани (11-20) зависит от типа некомпенсированной примеси.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнительным анализом экспериментальных данных и данных, полученных в результате моделирования, а также имеющимися литературными данными.

Результаты работы были использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

1. ОКР МЭ-289, «Разработка комплекса технологических базовых операций получения и обработки эпитаксиальных структур на основе карбида кремния», ОАО «Ангстрем», 2009-2012;
2. НИР ИДН/МЭ-113 «Полупроводниковый монокристаллический карбид кремния новый материал радиационно-стойкой электроники нового поколения для атомной техники», Рособразование, 2009-2011;
3. НИР ИКН/МЭ-121 «Политипизм и пути оптимизации дефектной структуры слитков карбида кремния» Минобрнауки, 2010-2012;
4. НИР ИКН/МЭ-124 «Разработки методов управления формированием политипов карбида кремния на основе наноструктурированных затравок различной ориентации» Минобрнауки, 2010-2012;
5. НИР НОЦ/МЭ-118 «Разработка методов получение пластин полупроводникового карбида кремния большого диаметра с целью применения групповых технологий микроэлектроники нового поколения» Минобрнауки, 2010-2012;
6. НИР ИКН/МЭ-120 «Получение подложек полупроводникового монокристаллического карбида кремния для экстремальной микроэлектроники» Минобрнауки, 2010-2012;
7. НИР ММУ/МЭ-119 «Поисковые научно-исследовательские работы по направлению «Естественные науки», Минобрнауки, 2010;
8. НИР ММУ/МНЭ-136/ГР «Физические экспериментальные и теоретические основы формирования и развитие современных методик диагностики структуры, электрофизических свойств полупроводниковых материалов и структур на их основе» Минобрнауки, 2012;

9. МНЭ-296 «Консалтинговые услуги с учетом оборудования Заказчика для производства полупроводниковых слитков карбида кремния диаметром 3 и 4 дюйма» Гермес Эпитек Корпорейшн, 2012;
10. НИР ИКН/МНЭ-138/ГР «Получение и исследование детектора ядерных излучений нового поколения на основе полупроводникового радиационностойкого монокристаллического карбида кремния - нового материала атомной техники» Минобрнауки, 2012-2013.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались диссертантом на следующих конференциях и семинарах:

- *На международных конференциях:* 6-ой Международный семинар «Карбид кремния и родственные материалы» (ISSCRM-2009), 27-30.05.2009, Великий Новгород, Россия; 16-я международная конференция по росту кристаллов (ICCG-16), 8-13.08.2010, Пекин, КНР; 9-я Европейская конференция по карбиду кремния и родственными материалам (ECSCRM 2012), 2-6.09.2012, Санкт-Петербург, Россия; 17-я международная конференция по росту кристаллов и эпитаксии (ICCGE-17), 11-16.08.2013, Варшава, Польша.
- *На региональных конференциях:* 7-ая, 14-ая, конференции по твердотельной электронике, Санкт-Петербург, Россия (2006, 2013) и на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (2008-2013).

Публикации

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, опубликованы в 12 работах, из них 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 2 патента на изобретение, 5 публикаций в трудах научно-технических конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 162 страницах машинописного текста. Диссертация включает 82 рисунка, 8 таблиц и список литературы из 177 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается актуальность темы диссертации, определяется основная цель работы и ее задачи. Проанализированы проблемы в области выращивания бездефектных кристаллов карбида кремния модифицированным методом Лели на затравках различных кристаллографических ориентаций. Представлены основные результаты работы, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость. На их основе сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературных данных об основных методах выращивания монокристаллов карбида кремния, основных дефектах в растущих слитках и их источниках. Проведен анализ современного состояния исследований, направленных на установление связи дефектной структуры с выбором исходной ориентации затравки.

В первом разделе приведены основные методы выращивания монокристаллов карбида кремния. Описаны ключевые особенности методов сублимационного роста и химического осаждения из газовой фазы. Данные два метода являются на сегодняшний день основными промышленными методами. В лабораторных условиях также используют методы сублимационной и жидкофазной эпитаксии.

Во втором – пятом разделах описаны основные дефекты, встречающиеся в монокристаллах карбида кремния. Показано, что при температурах роста монокристалл карбида кремния насыщен углеродными вакансиями (до 10^{17} см^{-3}), что теоретически может приводить к образованию вакансионных дисков и их последующему схлопыванию с образованием дефектов упаковки. Подробно описана дислокационная структура, характерная для слитков карбида кремния, и возможные варианты взаимодействия между дислокациями. Также рассмотрены планарные дефекты — малоугловые доменные границы, дефекты упаковки и причины их образования. Описаны возможные причины появления включений графита и кремния, а также включений политипов.

В шестом разделе описаны обычно рассматриваемые источники упругих напряжений, вводимых в растущий слиток, а также основные механизмы релаксации упругих напряжений.

В седьмом, восьмом разделах рассмотрены литературные данные, посвященные дефектной структуре монокристаллов SiC, выращенных на

призматических и ромбоэдрических гранях затравки, соответственно. Также приведены возможности использования многостадийного метода роста с использованием призматических граней затравки, т.н. RAF-процесса для улучшения дефектной структуры кристаллов SiC.

Вторая глава посвящена оптимизации методики процесса роста.

В первом разделе подробно описана установка для выращивания SiC и все ее составные части:

- 1) камера роста с водоохлаждаемым жакетом, присоединительными крышками, смотровыми окнами, системой ввода газов (Ar, N₂) и откачки, вакуумплотного ввода электродов, вакуумных регистрирующих ламп и датчиков давления;
- 2) резистивная система нагрева постоянного тока, включающая подводящие силовые кабели, трехфазный трансформатор, силовой выпрямительный блок, медные водоохлаждаемые токоподводы и шины, графитовый нагреватель оригинальной конструкции;
- 3) вакуумная система, включающая вакуумный пост двухступенчатой безмасляной откачки, высоковакуумный затвор, систему вакуумпроводов и вентилях, присоединительных фланцев с уплотнительными прокладками;
- 4) газовая система, включающая баллоны с высокочистыми газами, редукторы, буферные емкости, газовые магистрали и вентили;
- 5) система водяного охлаждения, состоящая из регулирующих напор вентилях и водоводов, резервных резервуаров с водой, водяного насоса, градирни-теплообменника, аварийной системы оповещения об отключении воды;
- 6) автоматизированная система управления и регистрации характеристик процесса, включающая: (а) по мощности — измерительные шунты постоянного тока, блок автоматического управления мощностью (БАУ), управляющий компьютер, соответствующее программное обеспечение; (б) по температуре — пирометр, регистрирующий температуру процесса в автоматическом режиме, с выходом на БАУ; (в) по давлению — соответствующие вакуумные лампы и датчики, с выходом на БАУ;
- 7) внутренняя арматура камеры роста, включающая (а) теплоизолирующую систему тепловых экранов; (б) ростовой тигель;

8) система внешнего крепления и расстановки составных частей установки (каркас).

Во втором разделе подробно рассмотрен процесс подготовки затравки SiC к процессу роста. Он состоит из кругления выращенных слитков, разрезания слитков, шлифования, полирования полученных пластин и их травления. Таким образом, из выращенного слитка получают затравку, обладающую атомно-шероховатой ростовой поверхностью, и задней поверхностью, подходящей для качественного крепления к крышке ростовой ячейки.

В третьем разделе описаны подготовка ростовой ячейки к процессу роста, процесс крепления затравки к держателю и параметры ростового процесса. Для крепления затравки использовали клеящие смеси оригинального состава. Параметры ростового процесса изменялись в зависимости от ориентации затравки.

Третья глава посвящена расчету упругих напряжений, возникающих в растущем слитке в результате различия температурных коэффициентов линейного расширения держателя и затравки, а также из-за наличия осевого температурного градиента.

Расчеты основываются на линейной анизотропной теории упругости. Для нахождения упругих напряжений и их минимизации вводится модель многослойной структуры. Минимизация введенных напряжений обеспечивается возможностью изгиба структуры. Расчеты выполняются при следующих допущениях:

- упругие свойства и равновесные параметры решетки не изменяются внутри отдельного слоя;
- исходное состояние слоев – плоское;
- структура находится в псевдоморфном состоянии или напряжения имеют «температурное» происхождение.

Расчет ведется в кристаллографических координатах, так как это позволяет получить более компактный вид формул. Деформации описываются тензором деформации, ковариантные компоненты которого одинаковы в обеих координатных системах — до и после деформации:

$$\varepsilon_{ij} = (G_{ij} - G^{(0)}_{ij})/2, \quad (1)$$

где ε_{ij} – тензор деформации, G – метрический тензор слоя после деформации, $G^{(0)}$ – метрический тензор до деформации (соответствует равновесному метрическому тензору $G^{(eq)}$).

Соотношение между деформациями и напряжениями (Закон Гука) формально аналогично соотношению, записанному в кристаллофизических координатах:

$$\sigma^{pq} = C^{pqij} \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

Инвариантное значение плотности упругой энергии может быть записано в виде:

$$E = \sigma^{pq} \varepsilon_{pq} / 2.$$

Предполагается, что изначально плоская поверхность многослойной структуры изгибается вследствие упругих напряжений, возникающих в момент послеростового охлаждения. Эта поверхность должна соответствовать Эвклидовой плоскости (т.н. развитой поверхности), которая характеризуется нулевой Гауссовой кривизной:

$$\eta^{(G)} = \eta^{(1)} \eta^{(0)} = 0, \quad (3)$$

где $\eta^{(G)}$ – Гауссова кривизна поверхности, $\eta^{(1)}$ и $\eta^{(0)}$ – главные кривизны поверхности, соответствующие двум взаимно ортогональным направлениям на поверхности, для которых кривизна достигает максимальных значений. Для ясности предположим:

$$\eta^{(1)} \neq 0, \eta^{(0)} = 0.$$

Используя эти допущения, двухслойная структура может рассматриваться как цилиндрически искривленная система, ограниченная двумя бесконечными параллельными поверхностями постоянной кривизны.

Деформация слоя может быть описана с помощью линейного преобразования T , преобразующего линейный вектор пространства в самого себя:

$$T_j^i = \delta_j^i + z M_j^i, \quad (4)$$

где δ_j^i – дельта-символ Кронекера, M – некоторое аффинное преобразование.

Матричное уравнение для преобразования метрического тензора:

$$G(z) = T^{(tr)}(z) G(z=0) T(z), \quad (5)$$

где $G(z=0)$ – матрица метрического тензора для начальной точки с координатой $z = 0$, T – линейное преобразование, $G(z)$ – матрица метрического тензора в заданной точке z , tr – обозначение транспонированной матрицы.

Ориентационное взаимодействие для границы раздела «слой 1 – слой 2» обычно записывается в виде

$$H_{i(1)} // H_{i(2)}, K^i_{(1)} // K^i_{(2)}, L^i_{(1)} // L^i_{(2)}, \quad (6)$$

где $H_i \equiv (H_1 \ H_2 \ H_3)$, $H_{i(1)}$, $H_{i(2)}$ – индексы Миллера параллельных плоскостей слоев 1 и 2, соответственно, $K^i \equiv (K^1 \ K^2 \ K^3)$, $L^i \equiv (L^1 \ L^2 \ L^3)$, $K^i_{(1)}$, $L^i_{(1)}$, $K^i_{(2)}$, $L^i_{(2)}$ – индексы Миллера направлений, лежащих в плоскости интерфейса, в системе координат слоев 1 и 2, соответственно. Для описания ориентационного взаимодействия используем линейный оператор R :

$$h_{i(1)} R^i_j = h_{j(2)}, \\ R^i_j k^j_{(2)} = k^i_{(1)} \text{ и } R^i_j l^j_{(2)} = l^i_{(1)}.$$

Матрица R связывает компоненты метрического тензора контактирующих слоев на интерфейсе:

$$G_{(2)} = R^{(tr)} G_{(1)} R, \quad (7)$$

где $G_{(1)}$, $G_{(2)}$ – метрические тензоры контактирующих слоев.

Таким образом, нахождение удельной упругой энергии системы «держатель – затравка» сводится к нахождению метрических тензоров на границе раздела рассматриваемых слоев (Рисунок 1). Для минимизации удельной упругой энергии реализована процедура Монте-Карло, в которой в заданном диапазоне случайным образом генерируется значение главной кривизны.

В качестве материала затравки использовали 4Н-SiC, материала держателя — экструзионный отечественный графит марки МГ-1 и изостатический японский графит марки EGS-743. Была показано, что использование изотропной модели при составлении тензора модулей упругости экструзионных марок графита недопустимо, так как приводит к большим погрешностям при расчете упругих напряжений в системе (Рисунок 2).

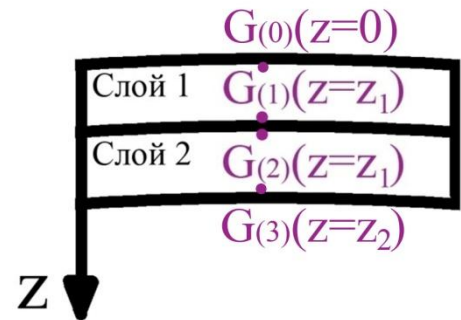


Рисунок 1 — Схема нахождения метрических тензоров на границе слоев

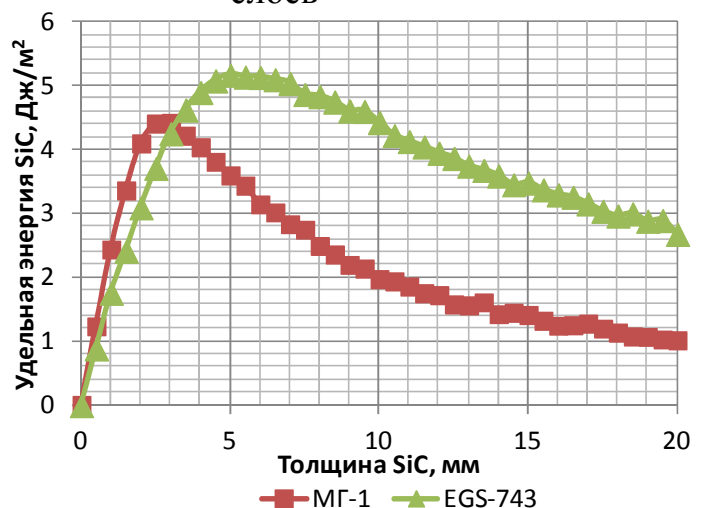


Рисунок 2 — Зависимость удельной упругой энергии SiC затравки толщиной 1 мм от толщины держателя.

Были продемонстрированы зависимости удельной упругой энергии системы от толщины держателя и растущего слитка (Рисунок 2, 3). При увеличении толщины держателя и постоянной толщине затравки удельная упругая энергия SiC растет. При увеличении толщины растущего слитка при постоянной толщине держателя удельная упругая энергия SiC уменьшается. При этом для характерного кристалла толщиной 20 мм, выращенного на держателе толщиной 5 мм, соответствующие упругие напряжения составляют $\sim 10^7$ Па, что на порядок превышает критические напряжения, выше которых начинается генерация дислокаций.

Была рассмотрена модель «свободной» затравки, в которой затравка не

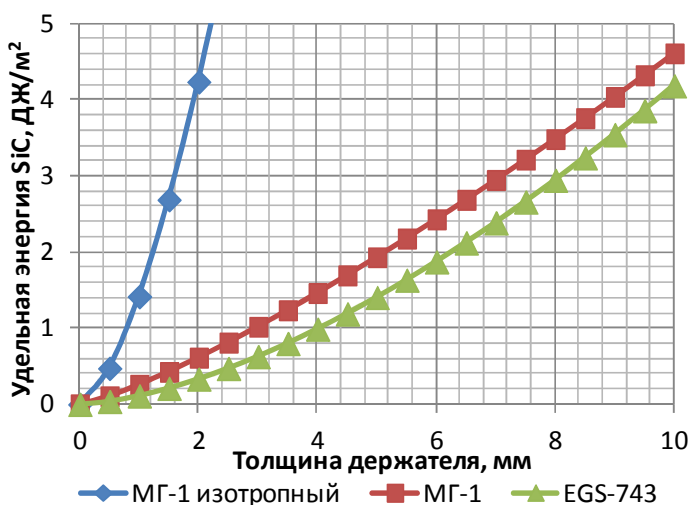


Рисунок 3 — Зависимость удельной упругой энергии SiC от толщины слитка при толщине держателя 5 мм.

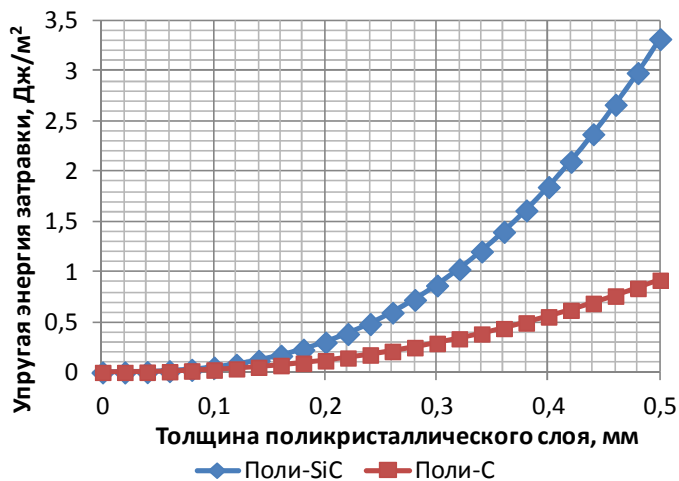


Рисунок 4 — Зависимость удельной упругой энергии «свободной» затравки толщиной 1 мм от толщины нанесенного на нее поликристаллического слоя.

крепится жестко, а свободно располагается в ростовом канале. Во избежание сублимации материала с задней стороны затравки на нее наносят поликристаллический слой SiC или C. Показано, что при толщине слоя ~ 500 мкм, удельная упругая энергия затравки достигает таких же величин, что и при жестком креплении (Рисунок 4). Поэтому использование «свободной» затравки является бесперспективным.

Рассчитанная удельная упругая энергия затравки, находящейся в температурном градиенте 20 К/см, составляет $3 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², что соответствует напряжению $\sim 8 \cdot 10^5$ Па, т.е. ниже критического значения. Таким образом, главной причиной введения упругих напряжений в растущий слиток, длина которого обычно не превышает 30 мм,

является крепление затравки к держателю.

Экспериментально продемонстрированы зависимости упругих напряжений в растущем слитке от толщины держателя, и толщины растущего кристалла на графите марки EGS-743. Показано, что высокие напряжения в слитке могут приводить к растрескиванию кристалла и скалыванию растущего слитка с затравки.

Четвертая глава посвящена исследованию дефектной структуры монокристаллов 4H-SiC, выращенных на призматических и ромбоэдрической гранях затравки.

В первом разделе проанализирована дефектная структура монокристаллов 4H-SiC, выращенных на затравках с ориентацией (11-20) и (10-10) с 5° отклонением в направлении [0001]. Показано, что дефектная структура характеризуется, главным образом, дефектами упаковки. Микропоры в кристаллах полностью отсутствовали. Для кристалла (10-10) также отсутствовали и прорастающие дислокации, которые, однако, были характерны для кристалла (11-20). Они наследуются из затравки ввиду наличия 5° разориентации. Плотность дефектов упаковки в исследованных кристаллах увеличивается по мере роста кристалла и, по данным оптической микроскопии, достигает значения 10^3 см^{-1} . Показано что увеличение скорости роста ведет к увеличению плотности дефектов упаковки. Характер дефектов упаковки (внутренний по Франку (5,2)) и их плотность ($\sim 4.5 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$) анализировали методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Характер дефектов упаковки, говорит о том, что они не могут образоваться в результате скольжения плоскостей под действием внутренних напряжений, а образуются непосредственно в процессе роста.

Во втором разделе исследована зависимость образования дефектов упаковки от ориентации призматической затравки. Показано, что характер дефектов упаковки изменяется с отклонением от грани (11-20) к (10-10) (Рисунок 5). Рост на затравке с плоскостью (11-20) характеризуется накоплением «нераскрытых» дефектов

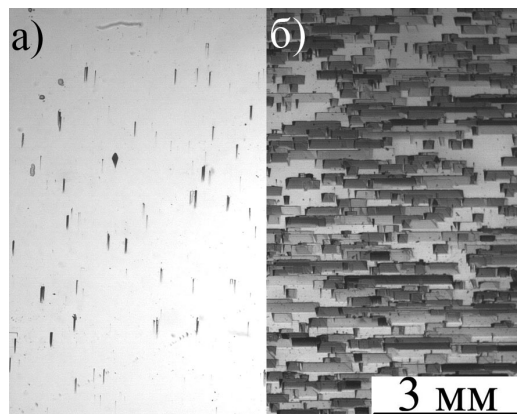


Рисунок 5 — «Закрытые» (а) и «раскрытые» (б) дефекты упаковки. (а) пластина (11-20), рост [11-20]. (б) пластина (10-10), рост [10-10].

упаковки, типичные размеры которых после травления составляют $\sim 20 \text{ мкм} \times 2 \text{ мкм}$. Рост на (10-10) выявляет после травления большое количество линейных картин травления — «раскрытых» дефектов упаковки с типичными размерами $\sim 20 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм}$. Дислокационная структура слитков выращенных на призматической грани затравки характеризуется наличием только базисных дислокаций. Причем объединение базисных дислокаций в малоугловые границы (МУГ) зависит от ориентации призматической затравки: вероятность образования МУГ увеличивается в направлении от (11-20) к (10-10). Установлено, что малоугловые границы образуются из-за наличия касательных напряжений в растущем слитке, образующихся в результате крепления затравки к держателю. Причем величина касательных напряжений для кристалла растущего на грани (10-10) максимальна

В третьем разделе исследована зависимость образования дефектов упаковки на затравке с ориентацией (11-20) от типа легирующей примеси. Показано, что «нераскрытые» дефекты упаковки, характерные для n-4H-SiC, раскрываются с увеличением концентрации р-типа примеси.

В четвертом разделе изучена дефектная структура слитков, выращенных на грани (11-22). Она характеризуется полным отсутствием микропор, а также снижением плотности дислокаций (на порядок величины), по сравнению с затравкой. В то же время для роста на плоскости затравки (11-22) характерно накопление дефектов упаковки и наследованием дислокаций из затравки.

В пятом разделе был реализован многостадийный процесс выращивания с последовательной сменой ориентаций используемых затравок (по аналогии с представленным ранее в литературе RAF-процессом) для улучшения структурного совершенства слитков карбида кремния политипа 4H. В качестве промежуточной стадии был выбран рост на гранях {10-10}. Дефектная структура выращенных слитков характеризовалась практически полным отсутствием периферических малоугловых границ, а также значительным (3 порядка величины) снижением, по сравнению с исходным материалом, плотности микропор. Вместе с тем, дефекты упаковки воспроизводились в том же количестве, что для исходного кристалла. Нежелательным промежуточным результатом реализованного многоступенчатого процесса роста явилось значительное (до 70%) уменьшение площади используемых затравок. Повторное разращивание полученных затравок до коммерчески приемлемых размеров (до 50-55 мм в диаметре) привело лишь к незначительному ухудшению дефектной структуры во вновь генерируемых периферических

областях слитка. Получены качественные образцы пластин карбида кремния политипа 4Н свыше 2 дюймов в диаметре, характеризующиеся плотностью микропор $5-40 \text{ см}^{-2}$ и базисных дислокаций $10^3-10^4 \text{ см}^{-2}$.

В Заключение изложены основные итоги выполненного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Основным фактором, определяющим уровень напряжений в растущем слитке, является крепление затравки к держателю. Напряжения, возникающие в типичном кристалле толщиной ~ 20 мм, прикрепленном к графитовому держателю толщиной 5 мм, на порядок превышают критические значения напряжений, что приводит к генерации развитой дислокационной структуры.
2. Определен метод выбора материала затравкодержателя для уменьшения упругих напряжений, вводимых в слиток. Необходимо выбирать материал, прежде всего, с наименьшими модулями упругости и малым различием температурных коэффициентов линейного расширения держателя и затравки.
3. Типичные осевые градиенты температуры ($< 30 \text{ К/см}$) вносят незначительный вклад в упругие напряжения в растущем слитке. Значения упругих напряжений, возникающих вследствие осевого температурного градиента, меньше критических.
4. Рост на призматических гранях 4Н-SiC характеризуется генерацией высокой плотности дефектов упаковки. Для ромбоэдрических граней наряду с этим наблюдается наследование прорастающих дислокаций из затравки.
5. Тип дефекта упаковки, образующегося при росте на призматических гранях — (5,2) в нотации Жданова (внутренний по Франку). Характер дефектов упаковки свидетельствует в пользу ростового механизма его возникновения.
6. Морфология дефектов упаковки в монокристаллах карбида кремния политипа 4Н n-типа зависит от ориентации призматической затравки.
7. Морфология дефектов упаковки в монокристаллах карбида кремния политипа 4Н при росте на грани (11-20) зависит от типа нескомпенсированной примеси.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. О включениях углерода при выращивании слитков карбида кремния модифицированным методом Лэли / Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Таиров Ю.М., Лебедев А.О., Фадеев А.Ю. // Известия вузов. Электроника. – 2008. – №2, с. 23-31.
2. Об оптимизации структурного совершенства слитков карбида кремния политипа 4H / Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Таиров Ю.М., Трегубова А.С., Фадеев А.Ю. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – том 43, вып. 9, с. 1288-1294.
3. О механизмах образования дефектов в слитках карбида кремния политипа 4H / Авров Д.Д., Булатов А.В., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – том 45, вып. 3, с. 289-294.
4. Defect structure of 4H silicon carbide ingots (Дефектная структура слитков карбида кремния политипа 4H) / Lebedev A.O., Avrov D.D., Bulatov A.V., Dorozhkin S.I., Tairov Yu.M., Fadeev A.Yu. // Journal of Crystal Growth. — 2011. — V. 318. — P. 394–396.
5. О росте монокристаллов карбида кремния политипа 4H на затравках с плоскостью (11-22) / Фадеев А.Ю., Лебедев А.О., Таиров Ю.М. // Физика и техника полупроводников. – 2012. – том 46, вып. 10, с. 1368-1373.

Патенты

1. Способ получения монокристаллического SiC: пат. 2 405 071 Российская Федерация: МПК С30В 23/00, С30В 29/36 / Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Лучинин В.В., Посредник О.В., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ. — № 2009115347/15 от 22.04.2009.
2. Способ получения монокристаллического SiC: пат. 2 454 491 Российская Федерация: МПК С30В 23/00, С30В 29/36, H01L 21/461 / Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Лучинин В.В., Посредник О.В., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю.; заявитель и патентообладатель ООО «ЛАДЛТИ-рост». — № 2010126019/05 от 25.06.2010.

Материалы конференций

1. О включениях графита при выращивании слитков карбида кремния модифицированным методом Лэли / Лебедев А.О., Фадеев А.Ю. // 11-я

научная молодежная школа по твердотельной электронике «Нанотехнологии, наноматериалы, нанодиагностика», Санкт-Петербург, 23-25 мая 2008 г. — 2008. — С. 39.

2. Структурная деградация слитков карбида кремния в процессе их выращивания модифицированным методом Лэли / Авров Д.Д., Булатов А.В., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю. // VI международный семинар «Карбид кремния и родственные материалы», Великий Новгород, 27-29 мая 2009 г. — 2009. — С. 12-13.
3. Рост монокристаллов карбида кремния на неполярных гранях затравки / Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю. // 64-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, СПбГЭТУ, Санкт-Петербург, 25 января – 5 февраля 2011 г. — 2011. — С. 58-61.
4. Growth of 4H-SiC single crystals on the non-basal planes (Рост монокристаллов 4H-SiC на небазисных гранях)/ Fadeev A.Yu., Lebedev A.O., Avrov D.D., Dorozhkin S.I., Tairov Yu.M., Tregubova A.S. // 15th Scientific Youth School “Physics and technology of micro- and nanosystems. Silicon carbide and related materials”, St. Petersburg, October 08-09, 2012 — 2012. — P. 63-64.
5. Growth of 4H-SiC single crystals on the prismatic seeds (Рост монокристаллов 4H-SiC на призматических затравках)/ Fadeev A., Lebedev A., Avrov D., Dorozhkin S., Tairov Yu. // 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Warsaw, Poland, 11-16 August 2013 — 2013. — P. 94.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals (Монокристаллы карбида кремния сверхвысокого качества) / Nakamura D., Gunjishima I., Yamaguchi S., Ito T., Okamoto A., Kondo H., Onda S., Takatori K. // Nature. — 2004. — V. 430. — P. 1009-1012.
2. Recombination-enhanced defect motion in forward-biased 4H-SiC *p-n* diodes (Движение дефектов, вызванное рекомбинацией, в прямосмещенных 4H-SiC *p-n* диодах) / Skowronski M., Liu J.Q., Vetter W.M., Dudley M., Hallin C., Lendenmann H. // Journal of Applied Physics. — 2002. — V. 92. — P. 4699-4704.