

Казанский Физико-Технический Институт им. Е.К. Завойского
Казанский Научный Центр Российской Академии Наук

На правах рукописи

ЗАХАРОВ

Максим Викторович

**ДИНАМИКА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА
ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ СВЕТОВОМ
ОБЛУЧЕНИИ**

Специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2007 г.

Работа выполнена в Лаборатории Методов Медицинской Физики
Казанского Физико-Технического Института Им. Е.К. Завойского
Казанского Научного Центра Российской Академии Наук

- Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией методов медицинской физики КФТИ КазНЦ РАН,
Фаттахов Яхья Валиевич.
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела КГУ,
Парфёнов Виктор Всеволодович;
доктор физико-математических наук, профессор,
Богданова Халида Галимзяновна.
- Ведущая организация:** Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород)»

Защита состоится « 4 » октября 2007 г. В 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.15 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский Государственный Университет» (420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского Государственного Университета

Автореферат разослан « » 2007 г.

Отзывы на диссертацию в одном экземпляре, заверенные учёным секретарём и скреплённые гербовой печатью учреждения, прошу направлять по адресу: 420029, г. Казань, ул. Сибирский Тракт, д. 10/7. Тел.: (843)2319090, факс (843)2725075.

Ученый секретарь

диссертационного совета _____ Ерёмин М.В.

Содержание

Основные сокращения и условные обозначения, использованные в работе....	4
Общая характеристика работы	5
Актуальность темы диссертации	5
Цель работы.....	6
Методы исследования и аппаратура.....	7
Научная новизна	8
Основные положения, выносимые на защиту	8
Практическая ценность работы.....	10
Личный вклад автора.....	10
Апробация работы	11
Публикации	12
Структура и объём диссертации	12
Основное содержание работы.....	12
Первая глава диссертации.....	13
Вторая глава диссертации.....	14
Третья глава диссертации	16
Четвертая глава диссертации.....	19
Пятая глава диссертации.....	20
Заключение диссертации	21
Основные результаты работы	21
Благодарности.....	23
Список опубликованных работ.....	23
Список цитированной литературы.....	25

Основные сокращения и условные обозначения, использованные в работе

АВ – атомарный водород;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БФП – быстрое Фурье преобразование;

ВП – вейвлет преобразование;

ДЭ – дифракционная эффективность;

ИИ – ионная имплантация;

ИЛС – ионно-легированный слой;

ИСО – импульсное световое облучение;

ЛОП – локальные области плавления;

ФД – фотодиод;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;

E , j , T , Φ – энергия, плотность тока ионного пучка, температура и доза ионной имплантации;

λ , w , I_0 , τ_n – длина волны, плотность энергии, плотность мощности излучения и длительность светового импульса;

N , L – плотность и размер локальных областей плавления;

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Кремний является основным материалом для современных микро- и нанотехнологий, но до настоящего времени не было достоверных данных о динамике протекания структурно-фазовых переходов на поверхности как монокристаллических так и имплантированных пластин кремния во время облучения световыми импульсами.

Нестационарные физические процессы плавления и кристаллизации материалов, наблюдающиеся при взаимодействии мощных импульсов оптического излучения с веществом, вызывают особый интерес. Один из эффектов, который наблюдается при однородном облучении полупроводников мощными импульсами лазеров и некогерентных источников света, это - эффект локального анизотропного плавления поверхности [1,2,3,4,5]. Изучение механизма этого эффекта в динамике позволяет получить дополнительную физическую информацию о закономерностях взаимодействия мощного оптического излучения с веществом, о природе центров зародышеобразования локальной жидкой фазы и др. Особую значимость этим исследованиям придает то обстоятельство, что они позволяют оптимизировать режимы импульсного светового отжига имплантированных полупроводников, импульсной кристаллизации структур «кремний на диэлектрике» и других важнейших технологий современной микроэлектроники.

Ещё одной интересной проблемой является формирование мелкозалегающих p-n-переходов, особую важность она приобретает при создании интегральных микросхем. Ионная имплантация, основанная на внедрении в твердое тело ускоренных в электростатическом поле ионизованных атомов и молекул, является одним из основных методов введения примеси в полупроводниковые материалы при изготовлении

приборов микроэлектроники. В процессе замедления имплантированных ионов в полупроводнике образуются радиационные дефекты, поэтому технологический цикл изготовления изделий полупроводниковой микроэлектроники включает в себя высокотемпературный отжиг, используемый для устранения радиационных дефектов и электрической активации примеси, введенной ионной имплантацией [6,7]. Диапазон длительностей термообработок, используемых в настоящее время, изменяется от наносекунд до десятков минут, а температуры - от сотен градусов Цельсия до температуры плавления полупроводника.

В современной промышленности вместо традиционного термического широко используется импульсный световой отжиг. Несмотря на то, что мы уже обладаем многочисленными публикациями по использованию для отжига ионнолегированных слоёв импульсного светового облучения в режиме теплового баланса [7,8,9,10,11], до сих пор нет достаточных данных о динамике протекания такого важного процесса, как твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация имплантированных слоев полупроводника во время светового облучения.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью получения новых знаний о физике образования локальной жидкой фазы на поверхности полупроводников и процессах рекристаллизации аморфных полупроводников при мощных импульсных световых воздействиях.

Цель работы

Основной целью диссертационной работы являлось исследование динамики структурных и фазовых переходов на поверхности монокристаллических и имплантированных полупроводников при воздействии мощных импульсов света различной длительности и плотности мощности излучения.

Для успешного достижения цели необходимо было выполнить следующие основные задачи:

- исследовать динамику образования локальных областей плавления на поверхности монокристаллического кремния под действием мощного импульсного светового облучения;
- изучить влияние обработки в интенсивном потоке атомарного водорода на степень дефектности приповерхностных слоев монокристаллического кремния;
- провести подробный анализ бесконтактной дифракционной методики для исследования динамики процессов рекристаллизации и локального плавления на поверхности имплантированных полупроводников;
- проанализировать экспериментальные результаты исследований динамики структурных и фазовых переходов на поверхности имплантированных полупроводников при воздействии мощных импульсов некогерентного света различной длительности и плотности мощности излучения.

Методы исследования и аппаратура

Исследования динамики структурных и фазовых переходов на поверхности полупроводников были выполнены с использованием разработанной нами оригинальной дифракционной методики, основанной на регистрации *in situ* сигнала дифракции зондирующего излучения на специальных периодических структурах.

Облучение имплантированных полупроводников мощными импульсами света проводилось на модернизированной и автоматизированной нами установке УОЛ.П-1. В настоящее время система регистрации позволяет фиксировать на компьютере параметры процессов отжига (динамику рекристаллизации, начало анизотропного локального плавления поверхности) и форму светового импульса.

Научная новизна

1. Проведены исследования появления локальных областей плавления во время импульсного светового облучения с большими пространственным и временным разрешениями.

2. Создана оригинальная установка для исследований динамики рекристаллизации и плавления имплантированных полупроводников во время ИСО.

3. Впервые получены результаты исследований динамики процессов твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации и локального плавления поверхности кремния имплантированного ионами фосфора и кремния с различными энергиями и дозами, при ИСО в диапазоне длительностей от 100 мс до 5 с.

4. Показано, что импульсный нагрев образцов кремния позволяет обнаружить и оценить количественно привнесенную дефектность. В частности, с помощью метода импульсного нагрева установлено, что существуют режимы обработки образцов кремния в атомарном водороде, которые практически не изменяют дефектность образцов, а также режимы, приводящие к существенному росту концентрации дефектов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведена скоростная микросъемка зарождения и роста локальных областей плавления (ЛОП) непосредственно в процессе облучения световыми импульсами с различными длительностями. На основе анализа экспериментальных данных получены *in situ* зависимости средних размеров и плотности (количества на единицу площади) локальных областей плавления от времени в течение светового импульса. Обнаружено, что зависимости

плотности и средних размеров ЛОП для всех длительностей импульса имеют одинаковый характер.

2. Метод импульсного нагрева образцов кремния и последующего анализа картины локального плавления может служить эффективным инструментом контроля количества дефектов, привносимых во время обработки в интенсивном потоке атомарного водорода (АВ).

3. Обнаружено, что режим обработки в АВ с малой экспозиционной дозой ($Q \leq 2.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) не приводит к изменению количества дефектов в кремнии, и наоборот, режим с большой экспозиционной дозой ($Q \geq 3.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) существенно увеличивает концентрацию дефектов. Возможной причиной роста количества дефектов может быть взаимодействие АВ с поверхностью кремния. Для полного понимания природы дефектов, которые образуются в результате обработки и обнаруживаются при импульсном нагреве образцов, необходимы дальнейшие исследования.

4. Подробно исследована бесконтактная дифракционная методика для исследования динамики процессов рекристаллизации и локального плавления на поверхности имплантированных полупроводников.

5. Изучена динамика процесса твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации ионно-имплантированных слоев кремния (до достижения температуры плавления), и определены важнейшие характеристики фазового перехода расплав – монокристалл такие как длительность периода существования расплава и стадии жидкофазной рекристаллизации. Показано, что оптимальные режимы отжига имплантированных полупроводников очень близки к режиму отжига во время которого могут образовываться локальные области плавления.

Практическая ценность работы

Разработанная нами методика позволяет создать технологию импульсного светового отжига имплантированных полупроводников с контролем не по температуре или длительности процесса, а по факту завершения требуемого процесса рекристаллизации.

Это позволит реализовать такие режимы импульсных термообработок, которые, с одной стороны, обеспечат полную электрическую активацию внедренной примеси, но, в то же время, не приведут к диффузионному уширению профиля внедренной примеси. Это становится особенно актуальным в настоящее время в связи с уменьшением размеров активных областей сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем.

Данная методика может оказаться полезной и при отжиге полупроводниковых структур с различными покрытиями и имплантированных полупроводников типа A_3B_5 . Уменьшение длительности отжига позволит предотвратить деградацию структур и нарушение стехиометрии поверхностных слоев сложных полупроводников.

Личный вклад автора

Диссертация является обобщением работ, выполненных в лаборатории методов медицинской физики казанского физико-технического института КазНЦ РАН. Ионная имплантация специальных измерительных структур проводилась на ускорителе ИЛУ-4 в ИАЭ, г. Москва. Обработка образцов в атомарном водороде проводилась во ФГУП «Научно-исследовательским институтом полупроводниковых приборов», Институтом сильноточной электроники СО РАН.

В работе, представленной на защиту, мною внесён определяющий вклад, выраженный в планировании и проведении экспериментальных

исследований, в анализе, интерпретации и формулировании выводов по результатам исследований.

Также мною была проведена автоматизация установки для исследования структурно-фазовых переходов имплантированных полупроводников во время импульсной световой обработки и была написана специальная программа для проведения экспериментов и обработки полученных результатов.

Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, мною получены лично.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на нескольких международных и российских конференциях и совещаниях: «Оптика, оптоэлектроника и технологии» (Ульяновск, Россия, 2000), «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Нижний Новгород, Россия, 2000, 2002, 2004, 2006), «Vacuum Electron Ion Technologies» (Варна, Болгария, 2001, 2003), «Photon Echo and Coherent Spectroscopy» (Великий Новгород, Россия, 2001), «24th International Congress on High-Speed Photography and Photonics» (Сендай, Япония, 2000), «25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics» (Бьён, Франция, 2002), «16th International Conference on Ion Beam Analysis» (Альбукерка, США, 2003), «International Conference «Micro- and nanoelectronics» (Звенигород, Россия, 2001, 2003), «Кремний-2003» (Москва, Россия, 2003), «Взаимодействие ионов с поверхностью - 2003» (Звенигород, Россия, 2003), «6th International Conference on Modification of Materials with particle beams and plasma flows» (Томск, Россия, 2003), «Кремний – 2004» (Иркутск, Россия, 2004), «15th International Conference on Ion Beam Modification of Materials» (Тёрмия, Италия, 2006).

При решении диссертационных задач часть исследований была выполнена в рамках проектов, финансируемых Министерством промышленности и науки (хоздоговор №292-02/К), Российским Фондом Фундаментальных Исследований (№03-02-96236), НИОКР Академии Наук Республики Татарстан (16-14/2000, №06-6.3-104, №06-6.4-240), Государственный контракт с Академией Наук Республики Татарстан № 06-6.4-59 и CRDF (BRHE REC – 007, гранты 2003, 2004 и 2005 годов), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ – 1904.2003.2.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано более 30 работ, включая 7 статей в реферируемых российских и иностранных журналах, сборники трудов и тезисы международных и российских конференций и совещаний. Кроме этого работы представлялись на итоговых конференциях КФТИ КНЦ РАН и КГУ, а также на молодежных конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертационной работы составляет 152 страницы, включая 111 (52) рисунков и 4 таблицы. Библиография включает 184 ссылки.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и основные задачи, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели, сформулированы научная

новизна и практическая значимость, вкратце представлены сведения об апробации работы и изложено краткое содержание каждой из глав.

Первая глава диссертации

В первой главе приведён аналитический литературный обзор по проблемам отжига полупроводников как до, так и после проведения ионной имплантации.

Как уже отмечалось выше, часть работы посвящена исследованию эффекта локального анизотропного плавления поверхности монокристаллических и имплантированных полупроводников, сопутствующего, при определённых режимах, процессу импульсного светового облучения. Суть этого явления заключается в следующем. При однородном облучении полупроводников мощными импульсами когерентного или некогерентного света с длительностями ~ 0.2 мс - 10 с на поверхности образца образуются локальные области плавления (ЛОП), разделённые участками не расплавившегося материала [1-6]. Форма ЛОП на поверхности монокристаллического кремния однозначно связана с кристаллографической ориентацией образца. В объёме указанные области представляют из себя углубления с бугорком в центре [5]. Внешний вид таких областей объясняется тем, что при локальном плавлении жидкий кремний, имеющий большую плотность в расплавленном состоянии, заполняет углубление из перевернутой пирамиды ограниченной плотноупакованными плоскостями (111) и при последующей рекристаллизации жидкий кремний оттесняется затвердевающим к центру основания пирамиды, образуя бугорок [5].

Основные закономерности эффекта не зависят от типа источника излучения: лазеры или некогерентные источники света [2,3,5]. Впервые эффект локального анизотропного плавления полупроводников наблюдался при облучении импульсами лазеров. С началом применения некогерентных источников света для отжига ионно-имплантированных слоев появились

работы, посвященные изучению механизма эффекта с применением различных ламп: галогенных ламп с длительностью импульса ~ 10 с [12], ламп-вспышек, используемых для накачки лазеров, и ламп-вспышек, работающих в стробоскопическом режиме.

Твердофазный эпитаксиальный (ТФЭ) рост кремния в последние годы также занимает все более важное место в ряде современных технологий, в том числе и микроэлектронике. В этой связи выполнено большое число экспериментальных работ по ТФЭ-росту. Получили развитие модификации ТФЭ-роста: ионно- и электронно-стимулированный ТФЭ-рост, ТФЭ-рост в условиях импульсного светового облучения. В литературе описано несколько моделей различных модификаций ТФЭ-роста. Однако природа процесса до сих пор не ясна, что и стимулировало написание данной диссертационной работы.

Вторая глава диссертации

Во второй главе диссертации описаны методики и техника экспериментов.

Исследование динамики зарождения и роста локальных областей плавления на поверхности монокристаллического кремния в процессе импульсного светового облучения проводилось на установке, принципиальная схема которой изображена на рис.1. В её состав входят: установка по импульсному отжигу УОЛ.П-1; система линз (6), включающая в себя длиннофокусный микроскоп и позволяющая получить увеличенное изображение поверхности образца; скоростная кинокамера СКС-1М (7), позволяющая проводить фотографическую регистрацию изображения частотой от 150 до 3000 кадров/с. Съёмка проводилась на 16 - миллиметровую негативную киноплёнку А-2 с чувствительностью 400 ед. при фотографическом разрешении 25 штрихов/мм.

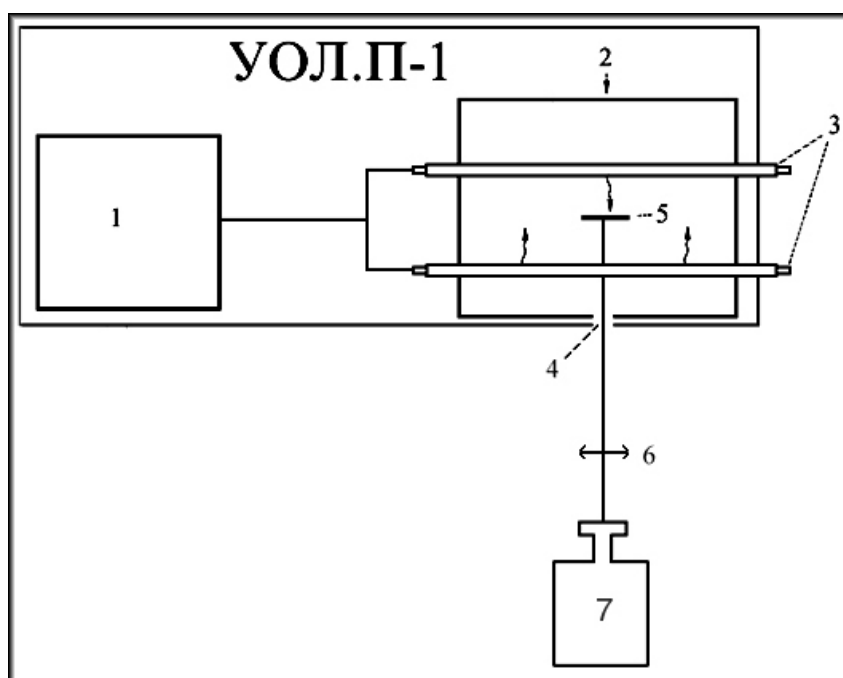


Рис. 1. Схема установки, используемой для исследования динамики процесса зародышеобразования и роста локальных областей плавления; 1 - блок питания установки УОЛ.П-1; 2 - реакционная камера; 3 - ксеноновые лампы-вспышки; 4 - окно; 5 - образец; 6 - система линз; 7 - скоростная кинокамера СКС-1М-16;

В этой же части работы представлено наиболее полное описание бесконтактной дифракционной методики для исследования динамики процессов рекристаллизации и локального плавления на поверхности имплантированных полупроводников.

На рис. 2 приведена блок-схема установки, используемой для исследования динамики структурно-фазовых переходов на поверхности ионно-имплантированного слоя кремния. Во время импульсного фотонного отжига на образец со специальной измерительной дифракционной решеткой (5), находящийся в реакционной камере (2), через окно (4) подается пучок излучения зондирующего лазера (12). Отраженный от поверхности образца (5) дифрагированный луч проходит через систему линз и светофильтров (6) и регистрируется скоростной кинокамерой и (или) фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-84) (7). Во избежание засветки ФЭУ излучением ламп вспышек используется экран с диафрагмой. Блок светофильтров включает в себя набор стеклянных светофильтров (СЗС-23, СЗС-25, КС-14), два

интерференционных светофильтра (для длины волны 633 нм), а также анализатор. Посредством фотодиода ФД-24К (11) осуществляется контроль реальной формы светового импульса. Сигнал с ФЭУ и фотодиода преобразуется АЦП (9) и записывается в компьютер (10).

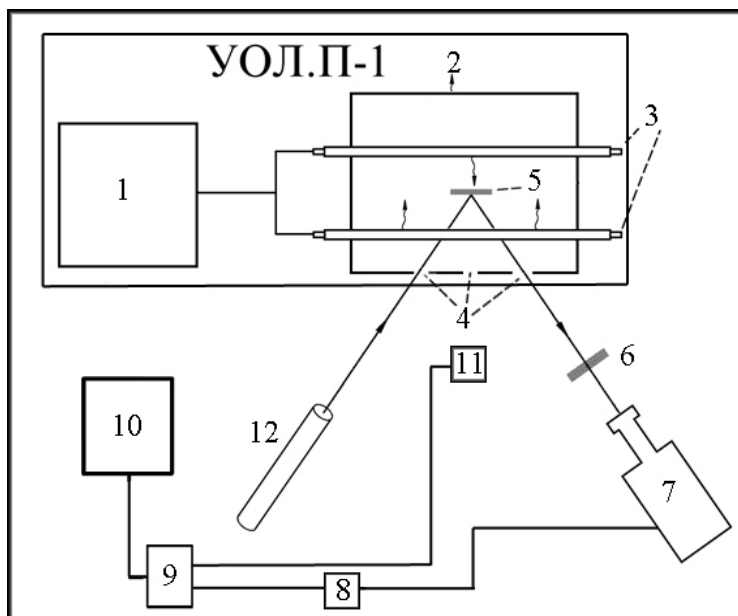


Рис. 2. Схема установки, используемой для исследования динамики структурно-фазовых переходов на поверхности ионно-имплантированного слоя кремния: 1 - блок питания установки УОЛ.П-1; 2 - реакционная камера; 3 - ксеноновые лампы-вспышки; 4 - окна; 5 - образец с дифракционной решеткой; 6 - блок светофильтров и линз; 7 - скоростная кинокамера СКС-1М-16 или (и) ФЭУ-84; 8 - устройство управления кинокамерой; 9 - плата L-154 (АЦП); 10 - компьютер; 11 - фотодиод; 12 - He-Ne лазер ЛГН-111.

Третья глава диссертации

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований динамики структурных и фазовых переходов на поверхности имплантированных полупроводников при воздействии мощных импульсов некогерентного света различной длительности и плотности мощности излучения.

Исследования были выполнены с использованием разработанной нашей группой оригинальной дифракционной методики, основанной на

регистрации *in situ* сигнала дифракции зондирующего излучения на специальных периодических структурах.

Ниже приведена таблица 1, в которой суммированы результаты исследований динамики процессов твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации и локального плавления поверхности монокристаллического кремния имплантированного ионами фосфора с различными энергиями и дозами.

Таблица 1.

Результаты исследований динамики рекристаллизации и плавления поверхности кремния, имплантированного ионами фосфора с энергией 50 кэВ и дозой 500 мкКл/см².

№	Мощность импульса $P_{и}, \text{Вт/см}^2$	Длительность импульса $\tau_{и}, \text{мс}$	Время рекристаллизации $t_p, \text{мс}$	Момент начала плавления $t_{пл}, \text{мс}$
1	1840	120	55	-
2	1840	130	55	60
3	1600	140	67	-
4	1600	190	70	105
5	1440	190	73	136
6	1200	300	95	190
7	1200	300	95	190
8	1200	260	70	130
9	1040	290	75	-
10	800	570	120	225
11	640	890	152	-
12	640	970	163	-
13	400	2090	295	-
14	240	5770	345	-

Из результатов, приведённых в данной таблице, отчётливо видно, что для длительностей светового импульса от 140 до 190 мс мы получаем значения времени рекристаллизации порядка 60-70 мс (с учётом погрешности измерения). Момент плавления при этом порядка 100 – 120 мс. Оптимальные режимы ИСО полупроводниковых структур располагаются между двумя этими граничными длительностями. Длительность ИСО выбирается, исходя из конкретной задачи и структуры образца. При необходимости получения более тонких активных слоев и уменьшения диффузии примеси, можно отключать световой импульс сразу после

завершения стадии рекристаллизации. Электрическая активация примеси будет происходить в течение заднего фронта теплового импульса – при остывании образца.

Видно, что для длительностей менее 140 мс момент плавления очень близок, к моменту полной рекристаллизации имплантированного кремния. Видимо, при дальнейшем уменьшении длительности облучения (а следовательно, увеличении мощности облучения) момент плавления будет происходить ещё до завершения процессов рекристаллизации. Таким образом, эти режимы ИСО будут более строгими к выбору режима и стабильности параметров установки отжига.

Нами также проведены эксперименты по исследованию длительности стадии рекристаллизации для различных режимов имплантации. Эксперименты проводились на образцах кремния, имплантированных ионами фосфорами с энергиями от 10 до 50 кэВ и дозой от 100 до 500 мкКл/см².

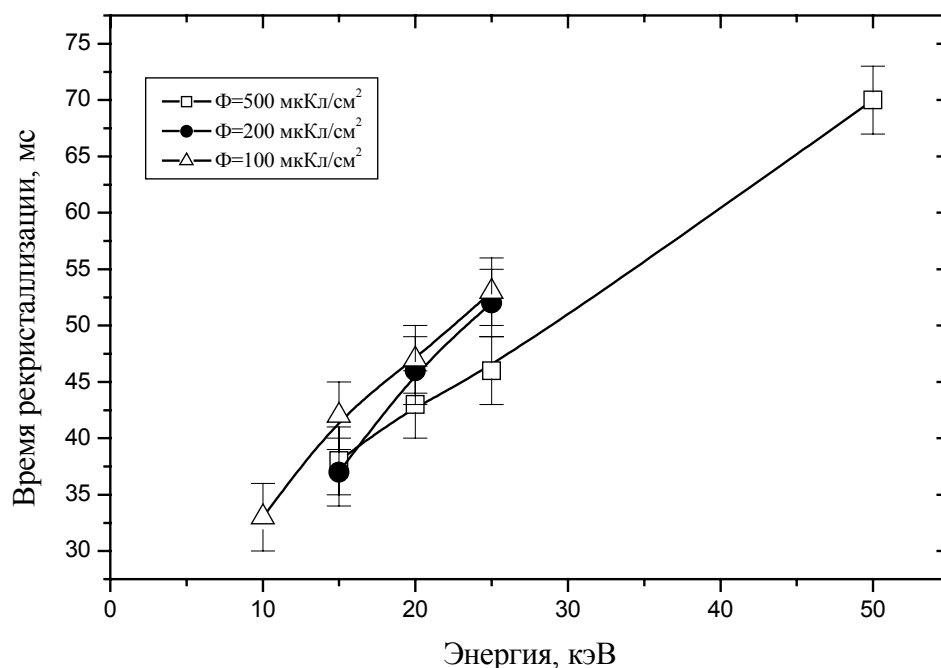


Рис. 3. Зависимость времени рекристаллизации от энергии имплантации.

Для всех полученных точек, представленных на графиках, использовались следующие режимы ИСО: мощность импульса – 1600 Вт/см^2 и средняя длительность импульса - 155 мс.

Четвертая глава диссертации

В соответствии с задачами данной диссертационной работы в четвертой главе представлены результаты исследований *in situ* особенностей зарождения и роста локальных областей плавления на поверхности монокристаллического кремния при воздействии мощных импульсов некогерентного света. Так как с точки зрения уточнения механизма эффекта локального анизотропного плавления наиболее важным и интересным является момент зарождения локальной жидкой фазы, основное внимание было уделено этой стадии процесса. Исследования были проведены для широкого диапазона длительностей световых импульсов от 0.26 с до 2.10 с.

Образцы монокристаллического кремния были подвержены облучению световыми импульсами длительностью: 0.26 с, 0.52 с, 0.92 с, 1.36 с и 2.10 с. Результаты экспериментов суммированы в таблице 2. Установлены времена появления первых ЛОП: 0.242 с, 0.415 с, 0.796 с, 1.002 с, 1.328 с для импульсов длительностью 0.26 с, 0.52 с, 0.92с, 1.36 с и 2.10 с, соответственно. На рис. 2 приведены: графики зависимости появления первых ЛОП (кривая 1) и длительности стадии быстрого роста ЛОП (кривая 2) от длительности импульса.

Таблица 2.

Результаты исследований динамики особенностей зарождения и роста ЛОП на поверхности монокристаллического кремния во время ИСО

Длительность светового импульса, с	0.26	0.52	0.92	1.36	2.10
Время появления первых ЛОП, с	0.242	0.415	0.796	1.0018	1.328
Длительность стадии быстрого роста ЛОП, с	0.004	0.012	-	-	0.084
Максимальное значение плотности ЛОП, см^{-2}	5500	3200	633	830	1300
Средняя скорость роста размеров ЛОП в течение импульса, $\mu\text{м/с}$	3080	2170	1650	1140	490

Подтверждено, что зарождение областей плавления происходит лишь в течение узкого интервала времени, например, для $\tau_{\text{и}}=0.26$ с - это 0.004 с, а для $\tau_{\text{и}}=2.10$ с - 0,084 с (см. табл. 2).

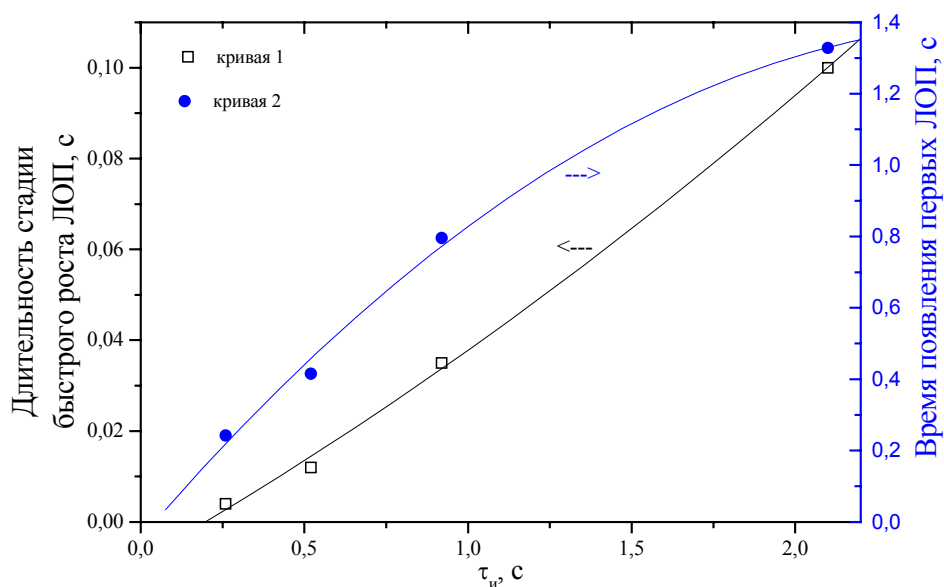


Рис. 3. Зависимости *in situ* времени появления первых локальных областей плавления (ЛОП) (кривая 1) и длительности стадии быстрого роста ЛОП (кривая 2) от времени в течение периода действия световых импульсов с длительностями 0.26 с, 0.52 с, 1.36 с, 2.10 с.

Пятая глава диссертации

Нами неоднократно уже упоминалось, что ЛОП на поверхности кремния при воздействии мощного импульсного светового излучения образуются в местах скопления дефектов, поэтому у нас возникло желание проверить, можно ли изучать степень дефектности кристалла после какого-либо физического воздействия на него. В качестве такого физического воздействия была выбрана обработка монокристалла в потоке атомарного водорода.

В данной части работы мною приводятся результаты исследований влияния обработки в интенсивном потоке атомарного водорода на степень дефектности приповерхностных слоев монокристаллического кремния.

Показано, что формирование локальных областей плавления импульсным световым воздействием образцов кремния и последующий анализ картины локального плавления может служить эффективным инструментом контроля количества дефектов привносимых обработкой в атомарном водороде. Установлено, что режим обработки в атомарном водороде с экспозиционной дозой менее $2.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ не приводит к изменению количества дефектов в кремнии, и наоборот, режим с экспозиционной дозой более $3.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ существенно увеличивает концентрацию дефектов. Экспериментальные данные, приведённые в данной главе, говорят о том, что возможной причиной роста количества дефектов может быть взаимодействие атомарного водорода с поверхностью кремния.

Заключение диссертации

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Проанализирована бесконтактная дифракционная методика для исследования динамики процессов рекристаллизации и локального плавления на поверхности имплантированных полупроводников.

2. Получены и проанализированы результаты экспериментальных исследований динамики структурных и фазовых переходов на поверхности имплантированных полупроводников при воздействии мощных импульсов некогерентного света различной длительности и плотности мощности излучения.

Исследования проведены методом лазерного зондирования сформированной на поверхности полупроводника периодической решетки и регистрации *in situ* ее дифракционной эффективности.

Изучена динамика процесса твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации ионно-имплантированных слоев кремния (до достижения температуры плавления), и определены важнейшие характеристики фазового перехода расплав – монокристалл такие как длительность периода существования расплава и стадии жидкофазной рекристаллизации.

3. Приведены результаты скоростной микросъемки зарождения и роста локальных областей плавления непосредственно в процессе облучения световыми импульсами с различными длительностями: 0.26 с, 0.52 с, 0.92 с, 1.36 с, 2.10 с.

4. На основе анализа экспериментальных данных получены *in situ* зависимости средних размеров и плотности (количества на единицу площади) локальных областей плавления от времени в течение светового импульса. Обнаружено, что для всех использованных длительностей импульса зависимости плотности и средних размеров ЛОП имеют одинаковый характер, т.е. наблюдаются три стадии динамики плотности ЛОП: быстрый рост от 0 (в момент зарождения) до максимальной величины, выход на плато, спад вследствие коалесценции ЛОП.

Полученные результаты, хорошо согласуются с предложенной ранее моделью эффекта локального анизотропного плавления, основанной на предположении о формировании перегрева полупроводника в твердой фазе относительно равновесной температуры плавления в процессе облучения световым импульсом.

5. Исследовано влияние обработки в интенсивном потоке атомарного водорода на степень дефектности приповерхностных слоев монокристаллического кремния. Показано, что формирование локальных областей плавления импульсным световым воздействием образцов кремния и последующий анализ картины локального плавления может служить

эффективным инструментом контроля количества дефектов привносимых обработкой в атомарном водороде. Установлено, что режим обработки в атомарном водороде с экспозиционной дозой менее $2.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ не приводит к изменению количества дефектов в кремнии, и наоборот, режим с экспозиционной дозой более $3.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ существенно увеличивает концентрацию дефектов. Возможной причиной роста количества дефектов может быть взаимодействие атомарного водорода с поверхностью кремния.

Благодарности

Считаю необходимым выразить искреннюю благодарность своему научному руководителю кандидату физико-математических наук, заведующему лаборатории Методы Медицинской Физики Я.В. Фаттахову за постановку задачи и внимательное руководство работой и большую помощь при ее выполнении. А также глубокую признательность кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику М.Ф. Галаяутдинову за помощь в осуществлении работы, ценные советы и замечания.

Список опубликованных работ

1. Захаров, М. В. Влияние обработки кремния в атомарном водороде на образование локальных областей плавления при импульсном световом облучении /М.В.Захаров, В.А.Кагадей, Т.Н.Львова и др. // Физика и техника полупроводников. – 2006. –Т.40. – вып. 1. – С. 61-67.
2. Investigation of structural-phase transitions dynamics on the surface of implanted silicon at rapid thermal processing /Ya.V.Fattakhov, M.F.Galyautdinov, T.N.L'vova, M.V.Zakharov, I.B.Khaibullin //Nuclear Instruments and Methods B. – 2007. –V. 257. – Issues 1-2. –P. 222-226.

3. Исследование динамики рекристаллизации и плавления имплантированного кремния при быстром термическом отжиге /Я.В.Фаттахов, М.Ф.Галютдинов, М.В.Захаров и др. //Вестник Нижегородского университета. Серия физика твердого тела. Нижний Новгород. – 2005. – Вып. 1(8). – С. 9-14.
4. Исследование in situ локального плавления поверхности монокристаллического и имплантированного кремния при облучении импульсами света различной длительности /Я.В.Фаттахов, М.Ф.Галютдинов, Т.Н.Львова, Захаров М.В. и др. //Вестник Нижегородского университета. Нижний Новгород. Серия физика твердого тела – 2003. – Вып. 1(6). – С. 35-46.
5. Investigation of dynamics of phase transitions on silicon surface at light pulse heating /Ya.V.Fattakhov, M.F.Galyautdinov, T.N.L'vova, M.V.Zakharov, I.B.Khaibullin //Novgorod, Editor by Vitaly V. Samartsev, Proceeding of PECS 2001: Photon Echo and Spectroscopy. Proceeding of SPIE. -2001. -Vol. 4605. -P 399.
6. Захаров, М. В. Модификация свойств кремния при обработке в атомарном водороде /М.В.Захаров, В.А.Кагадей, Т.Н.Львова и др. //Proceedings of 6th international conference on modification of materials with particle beams and plasma flows. –2002. – P. 439-442.
7. In situ investigation of local melting on the silicon surface under irradiation by incoherent light pulses with various durations /T.N.L'vova, Ya.V.Fattakhov, M.F.Galyautdinov, M.V.Zakharov, I.B.Khaibullin // 25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Proceedings of the SPIE. –2003. –V. 4948. -P. 769-775.
8. Investigation of the dynamics of recrystallization and melting of the surface of implanted silicon at rapid thermal processing /Ya.V.Fattakhov, M.F.Galyautdinov, T.N.L'vova, M.V.Zakharov, I.B.Khaibullin //Proceedings of the SPIE, Bellingham, USA. –2004. –V. 5401. – P. 104-109.

9. Исследование *in situ* зарождение и рост локальной жидкой фазы на поверхности кремния при облучении импульсами света различной длительности /Я.В.Фаттахов, М.Ф.Галяутдинов, Т.Н.Львова, Захаров М.В. и др. //Труды международной конференции «Оптика, оптоэлектроника и технологии», Ульяновск, 25-29 июня. – 2001. – С. 141.

Список цитированной литературы

1. Rapid thermal annealing of hot wire chemical-vapor-deposited a-Si:H films: The effect of the film hydrogen content on the crystallization kinetics, surface morphology, and grain growth /A.N.Mahan, B.Roy, R.C.Reedy, Jr., D.W.Readey, and D.S.Ginley // J. Appl. Phys. –2006. –V. 99. –P. 023507.

2. Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионнолегированных слоев, БТО в технологии СБИС /В.М.Анищик, В.А.Горушко, В.А.Пилипенко и др. Минске.: БГУ, 2000. – 150 с.

3. Анизотропное локальное плавление монокристаллического и имплантированного кремния импульсами некогерентного света /Я.В.Фаттахов, И.Б.Хайбуллин, Р.М.Баязитов и др. //Поверхность. Физика, химия, механика. - 1989. №11. С. 61 – 69.

4. Lo, K.Y. Study on the rapid thermal annealing process of low-energy arsenic and phosphorous ion-implanted silicon by reflective second harmonic generation /K.Y.Lo //J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2005. -V. 38. –P.3926-3933.

5. Верходанов, С.И. Анизотропное локальное плавление на дефектах структуры кремния /С.И.Верходанов, Н.Н.Герасименко, А.М.Мясников //Поверхность. Физика, химия, механика. - 1988. -№5. -С. 69-73.

6. Герасименко, Н.Н. Анизотропное локальное плавление на поверхности кремния /Н.Н.Герасименко, А.В.Двуреченский, С.И.Романов, Л.С.Смирнов //Физика полупроводников 1973. - Т.7. - С. 2195.

7. Плотников, А.И. Влияние механической обработки на анизотропное плавление пластин кремния, имплантированных ионами бора /А.И.Плотников, С.И.Рембеза, В.А.Логинов //Физика и химия обработки материалов. - 1991. - №2. - С.122-125.

8. Heinig, K.-H. Effects of local melting on semiconductor surfaces /К.-Н.Хейниг //Proc. 1st Internat. Conf. On Energy Pulse Modification of Semiconductors and Related Materials. Pt 1. Dresden: Zentralinstitut für Kernforschung. - 1985. - P. 265-279.

9. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов /А.В.Двуреченский, Г.А.Качурин, Е.В.Нидаев и др. М., Наука, 1982. – 13 с.

10.Meyer, J.R. Optical heating in semiconductors: Laser damage in Ge, Si, InSb, and GaAs /J.R.Meyer, M.R.Kruer, and F.J.Bartoli //J. Appl. Phys. – 1980. - V.51. -№10. –P.5513-5522.

11. Starkov, V.V. Amorphisation and solid phase epitaxial regrowth of the silicon overlayer in SIMOX structures /V.V.Starkov, P.L.F.Hemment, A.F.Vyatkin //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 1991. –V. 55. –P. 701-704.

12. Spatial melt instabilities in radiatively melted crystalline silicon /G.K.Celler, Mc.D.Robinson, L.E.Trimble, D.J.Lishner //Appl. Phys. Lett. - 1983. - V.43. - №9. - P.868-871.

Подписано в печать 27.08.07 г. Форм. Бум. 60x80 1/16 Печ. Л. 1.75 Тираж 100. Заказ 246

Отпечатано с готового оригинал – макета в ООО «Вестфалика»
Г. Казань, ул. Б. Красная, 67