

на правах рукописи

Майдыковский Антон Игоревич

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР И ГРАНИЦ  
РАЗДЕЛА МЕТОДОМ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ  
ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ

Специальность **01.04.05** - оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор **Акципетров Олег Андреевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
**Головань Леонид Анатольевич**,  
(кафедра общей физики и молекулярной  
электроники Физического факультета МГУ  
имени М.В. Ломоносова)

кандидат физико-математических наук  
**Мерзликин Александр Михайлович**,  
(Институт теоретической и прикладной  
электродинамики РАН г. Москва)

Ведущая организация: Институт прикладной физики  
РАН (г. Нижний Новгород)

Защита состоится 05 октября 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова) в ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан "01" сентября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций Д 501.001.45,  
кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

## Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию основных особенностей квадратичного нелинейно-оптического отклика полупроводниковых микроструктур, границы раздела кремний - оксид кремния в присутствии упругой деформации и пленок на основе галлий гадолиниевого граната с остаточными механическими напряжениями. Для выполнения таких исследований в работе, во-первых, развит метод конфокальной микроскопии второй оптической гармоники, предоставляющий уникальные возможности как по исследованию отдельных микроструктур, так и по демонстрации основных закономерностей формирования нелинейного отклика модельных микрообъектов. Во-вторых, экспериментально продемонстрировано, что в центросимметричных структурах с внутренним механическим напряжением искажение кристаллической структуры может приводить к появлению дополнительных нелинейных источников и модификации нелинейно-оптического отклика.

Среди нелинейно-оптических методов исследования свойств поверхностных структур и границ раздела особое место принадлежит эффекту генерации второй оптической гармоники (ВГ). Наибольшую известность он приобрел благодаря своей уникально высокой чувствительности к свойствам поверхностей и границ раздела центросимметричных сред. Такое свойство, присущее нелинейно-оптическому отклику четных порядков, связано с существованием фундаментального правила запрета на генерацию ВГ в объеме сред с центросимметричной структурой в электродипольном приближении.

Поэтому основные источники излучения на удвоенной частоте оказываются пространственно локализованными в областях, в которых центр инверсии нарушен, и в первую очередь - на поверхности и границах раздела. Данная особенность приводит к выделенности эффекта генерации ВГ и обуславливает его возможности по диагностике поверхностей, скрытых границ раздела центросимметричных сред, нано- и микроструктур, свойства которых во многом определяются именно характеристиками поверхности или приповерхностных слоев. Под поверхностью в данном случае понимают приповерхностные слои объемно центросимметричных материалов, толщина которых в случае металлов составляет единицы нанометров, а для диэлектриков - до сотен нанометров для видимого диапазона спектра.

Мотивация исследования свойств поверхности связана в первую очередь с новыми разработками в области оптоэлектроники. В то же время, генерация второй гармоники является высокочувствительным методом исследования структурных, морфологических, электронных и других свойств металлов, тонких

пленок, микро и наноструктур, полупроводников. Генерация ВГ в оптическом диапазоне для большинства материалов является неразрушающей методикой и позволяет охарактеризовать усредненные статистические параметры образца, такие как дипольная восприимчивость, анизотропия, корреляционная функция нелинейной поляризации.

В связи с этим большой интерес представляет изучение возможностей метода генерации ВГ по отношению как к исследованию единичных объектов микро-структур, так и по отношению к различным параметрам структуры, в том числе - деформациям кристаллической структуры.

Помимо развития нового, высокочувствительного, дистанционного и неразрушающего метода несомненный интерес представляет изучение новых эффектов нелинейной оптики, к числу которых можно отнести модификацию оптических восприимчивостей приповерхностных областей полупроводников и диэлектриков в присутствии механических напряжений, встроенных в результате технологических особенностей роста, или индуцированных упругими деформациями. В связи со сказанным выше была сформулирована цель данной диссертационной работы.

Целью диссертационной работы являлось, во-первых, развитие методики конфокальной микроскопии второй гармоники и демонстрация возможностей данного метода для случая отдельностоящих полупроводниковых микро-структур и однородных структур на основе мезопористого кремния; во-вторых, экспериментальное исследование особенностей генерации второй оптической гармоники в напряженном приповерхностном слое кремния и пленках железоиттриевого граната со встроенными упругими деформациями.

Актуальность темы диссертации обусловлена прежде всего фундаментальным интересом к влиянию механических напряжений в центросимметричных кристаллах, особенно в таких технологически важных, как кристаллический кремний и железо-иттриевый гранат, на их нелинейно-оптические свойства. Актуальным является вопрос перехода от интегрального метода диагностики низкоразмерных структур методом генерации ВГ, который развивается на протяжении последних нескольких десятилетий, к локальным методам зондирования единичных объектов с выявлением механизмов генерации ВГ и ее связи со структурными особенностями исследуемых объектов, такими как их геометрическая форма, материал, технология изготовления.

Практическая ценность работы состоит в демонстрации возможностей метода конфокальной микроскопии ВГ для определения нелинейных свойств отдельно расположенных микро-структур и демонстрации возможностей метода на примере эталонных микро-структур GaInP/GaAs. Важным с практической точ-

ки зрения результатом работы является развития на основе генерации ВГ метода диагностики механических напряжений в центросимметричных материалах - кремнии и тонких поликристаллических пленках железо-иттриевого граната, что представляет интерес для использования в технологических процессах.

#### Научная новизна работы

- развита методика конфокальной микроскопии второй оптической гармоники и продемонстрированы возможности данного метода для изучения механизмов нелинейно-оптического отклика отдельно расположенных полупроводниковых микроструктур;
- впервые исследовано распределение нелинейных микроисточников в слоях пористого кремния с использованием метода конфокальной микроскопии второй оптической гармоники и обнаружено, что величина квадратичной восприимчивости слоев пористого кремния пропорциональна пористости структуры;
- проведено изучение механизмов генерации второй гармоники, индуцированной механическими напряжениями, в приповерхностном слое кристаллического кремния, и обнаружена зависимость квадратичной восприимчивости кремния от величины упругих деформаций;
- обнаружено, что встроенные упругие деформации в поликристаллических пленках феррит-гранатов, допированных висмутом, приводят к росту интенсивности второй гармоники, генерируемой в таких структурах.

#### На защиту выносятся следующие **научные положения**:

- метод конфокальной микроскопии второй оптической гармоники позволяет исследовать квадратичный нелинейно-оптический отклик единичных полупроводниковых микроструктур GaInP/GaAs;
- квадратичные нелинейные источники в мезопористом кремнии локализованы преимущественно на поверхности пор и описываются электродипольной компонентой нелинейно восприимчивости;
- наличие деформации растяжения в тонком приповерхностном слое центросимметричного полупроводника приводит к появлению дополнительного источника нелинейной восприимчивости;
- интенсивность ВГ, отраженная от пленок железоиттриевого граната, допированного висмутом, возрастает с увеличением встроенных деформаций, вызванных несоответствием постоянных кристаллических решеток в пленках;

- нелинейный магнитооптический эффект Керра не зависит от величины упругих деформаций в пленках железиттриевого граната в диапазоне концентраций висмута от 0,1 до 0,3 формульных единиц.

Апробация результатов работы проводилась на следующих конференциях: Международная конференция “MISM, (Moscow, Russia, 2008), Международная конференция “ICROM, (Токуо, Japan, 2008), Международная конференция “Quantum Electronics and Laser Science Conference” (QELS), (Балтимор, США, 2007), Международная конференция “International Symposium of Integrated Optoelectronic Device” (SPIE), (Сан Хосе, Калифорния, США, 2007), Международная конференция “ICONO, (Minsk, Belarus, 2007), Международная конференция “Frontiers in Optics”, (Рочестер, Нью-Йорк, США, 2006), Международная конференция “3rd International conference on material science and condensed matter physics”, (Кишинев, Молдавия, 2006), Международная конференция “Conference on Lasers and Electro-Optics”, (Балтимор, США, 2006), Международная конференция “Optics and Photonics, Optical diagnostics“ (SPIE annual meeting 2005) , (San Diego, USA, 2005) Международная конференция “Optical Properties of Nanocrystals“ (SPIE annual meeting 2002),(Seattle, USA, 2002).

Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, включая 7 статей в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК России и 10 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 118 страниц, включая список литературы, 34 рисунка и 4 таблицы. Список цитированной литературы содержит 87 наименований, включая публикации автора по теме диссертации.

Личный вклад автора Все результаты диссертационной работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна представленных исследований, показана практическая значимость полученных результатов, приведены выносимые на защиту научные положения.

## **Глава 1. Генерация второй оптической гармоники: способы описания и экспериментальные методики**

В первой главе, имеющей преимущественно обзорный характер, представлено феноменологическое описание процессов генерации второй оптической гармоники в полубесконечной среде, микро- и наноструктурах.

Рассмотрены процессы генерации магнитоиндуцированной ВГ в магнитных средах, симметричные свойства четных и нечетных по намагниченности компонент тензоров нелинейных восприимчивостей.

## **Глава 2. Конфокальная лазерная микроскопия второй оптической гармоники единичных полупроводниковых микроструктур и пористого кремния**

Во второй главе с использованием метода конфокальной микроскопии второй гармоники исследованы нелинейно-оптические свойства единичных полупроводниковых микроструктур на основе GaInP/GaAs, а также слоев пористого кремния с различной пористостью. В данной главе предпринята попытка перейти от стандартной методики исследования микроструктур методом генерации ВГ в геометрии на отражение, когда информация об объекте усредняется с областей порядка 400 - 1000 квадратных микрон в латеральной плоскости и определяется размером перетяжки пучка накачки, к конфокальной микроскопии второй гармоники, где зондируемая область имеет геометрические размеры порядка 1 квадратного микрона.

Концепция конфокальной микроскопии была разработана в середине 1950-х гг. аспирантом Гарвардского университета Марвином Мински (Marvin Minsky) [1]. Однако широкий интерес к этой области проявился лишь в 1980-х гг. благодаря бурному развитию компьютерной и лазерной технологий. Термин “конфокальная” означает “софокусная” - в плоскости, оптически сопряженной с фокальной плоскостью объектива, находится конфокальная диафрагма. Это позволяет регистрировать сигнал лишь от небольшой точечной области объекта, определяемой параметрами перетяжки зондирующего излучения и размерами конфокальной диафрагмы. Получение информации об объекте производится последовательным сканированием исследуемого образца перетяжкой лазерного пучка. Микроскопия ВГ успешно применялась для визуализации доменных стенок, доменной структуры в пленках магнитных гранатов, фотоннокристаллических волноводов, ферроэлектрических доменов в кристаллах с периодической полировкой.

### Конфокальная микроскопия единичных микроструктур

В качестве модельного объекта для исследования методом конфокальной микроскопии были выбраны полупроводниковые микроструктуры (МС), размер которых сравним с длиной волны оптического излучения.

Образцы микроструктур на основе GaInP/GaAs были нанесены методом молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре  $580^{\circ}\text{C}$  на подложку GaAs(100) с предосажденным буферным слоем  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  толщиной 500 нм.

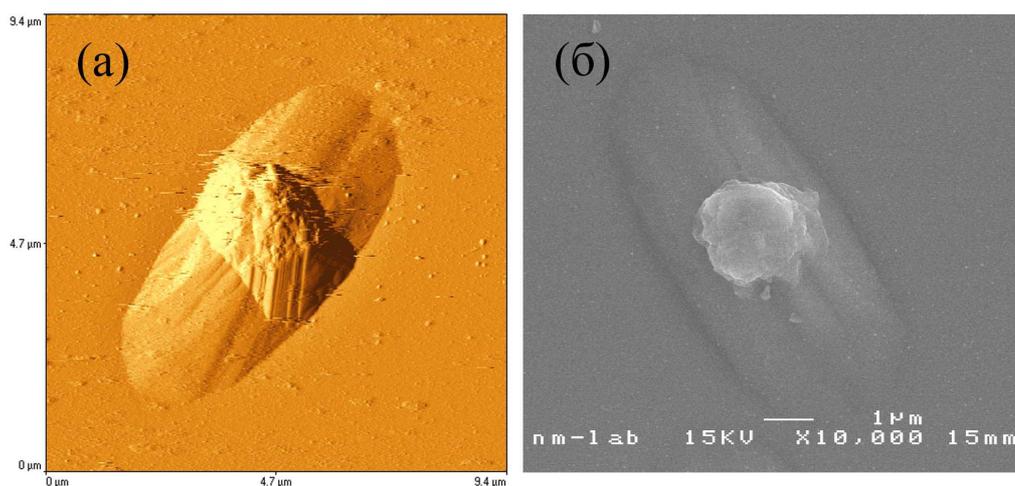


Рис. 1: (а) АСМ изображение полупроводниковой GaInP/GaAs микроструктуры, сформированной на подложке GaAs(001). Размер кадра сканирования  $9,4 \times 9,4$  мкм. (б) РЭМ изображение единичной полупроводниковой микроструктуры; наблюдается пьедестал со сферической головкой размером 2,2 мкм, поле сканирования  $10 \times 10$  мкм.

На изображениях, полученных в растровом электронном микроскопе (рис. 1(б)), видно, что полупроводниковые микроструктуры состоят из пьедестала и сферической головки. На рис. 1(а) представлены изображения этих же структур, полученные в атомносиловом микроскопе.

Пьедестал ориентирован вдоль направления (110) подложки GaAs (100). Учитывая относительно большую толщину буферного  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  слоя, можно предположить, что МС представляют собой дефекты, сформированные на неоднородных центрах кристаллизации в областях, содержащих неоднородности или дефекты кристаллической структуры GaAs.

Исследование отклика структур на частоте ВГ проводилось для четырех комбинаций ортогональных линейных поляризаций волн накачки и детектируемой ВГ. Излучение накачки было линейно поляризовано вдоль направлений X или Y в соответствии с ориентацией МС, а соответствующий сигнал ВГ регистрировался для поляризации X или Y. В работе используется следующее обозначение: первый символ обозначает поляризацию излучения накачки, второй –

поляризацию детектируемой ВГ, направление X соответствует горизонтальной оси на растровых изображениях, Y- вертикальной.

Изображение микроструктур на частоте ВГ для всех комбинаций поляризаций излучений накачки и ВГ демонстрирует изменение характера отклика при изменении длины волны накачки от 735 нм до 895 нм. В коротковолновой области спектра все изображения, кроме YY комбинации поляризаций, демонстрируют яркое пятно в центре МС с размером порядка 2 мкм. При увеличении длины волны накачки свыше 760 нм изображения становятся более сложными, появляется двухлепестковый характер рисунка интенсивности детектируемой ВГ (рис. 2, 3).

Особо следует проанализировать выполнение  $s$ - запрета в дипольном приближении для генерации второй оптической гармоники от поверхности гладкой однородной centrosymmetric среды, т.е запрет на генерацию изотропной  $s$ -поляризованной составляющей ВГ. В нашем случае вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости образца для любых комбинации поляризаций. Поэтому стоит ожидать появление сигнала ВГ от скошенных граней микроструктуры и его отсутствие от плоской подложки и элементов МС с касательной, параллельной подложке.

В случае XX комбинации поляризаций наблюдается двухлепестковый характер детектируемого изображения с ориентацией основной оси параллельно оси (OX). Можно предположить, что в этом случае основной вклад в интенсивность ВГ идет от длинных боковых сторон МС (рис. 2). В случае XY комбинаций поляризаций наблюдается двухлепестковый гантелевидный характер детектируемого изображения с ориентацией основной оси вдоль оси (OY). Можно предположить, что основной вклад в интенсивность ВГ в этом случае обусловлен торцевыми короткими сторонами МС (рис. 2). При YX комбинаций поляризаций наблюдаемый характер детектируемого изображения очень сходен с изображением, полученным для XX конфигурации поляризаций (рис. 2(a)), а для YY комбинаций поляризаций - с изображением, полученным для XY конфигурации поляризаций рис. 3(d).

С целью определения источников ВГ и их локализации в рассматриваемом типе микроструктур по полученным растровым изображениям для различных комбинаций поляризаций были построены спектральные зависимости интенсивности ВГ от длины волны зондирующего излучения.

Спектральные зависимости для МС и подложки для всех комбинаций поляризаций схожи в области спектра 730-860 нм. Это позволяет предположить, что сигнал ВГ от МС и подложки идет главным образом от объема GaAs с незначительным вкладом от слоя GaInP.

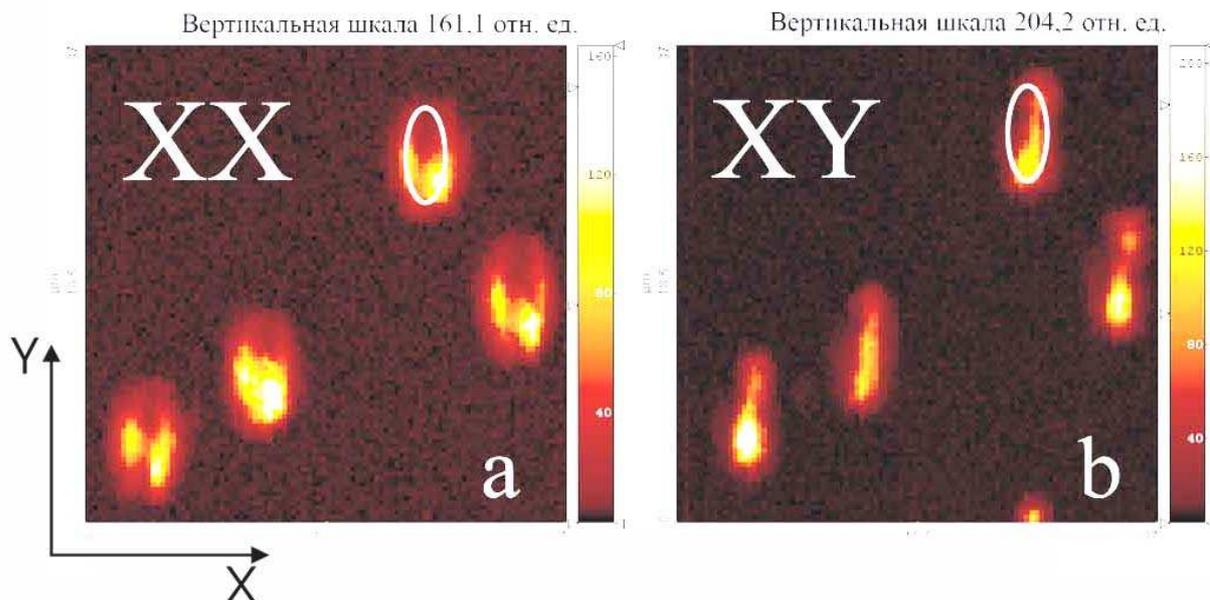


Рис. 2: Изображение полупроводниковых GaInP/GaAs микроструктур в конфокальном микроскопе ВГ. Размер изображения 37x37 мкм. Интенсивность цвета пропорциональна детектируемой интенсивности света на частоте второй гармоники. Представлены 2 изображения, для комбинаций поляризации длины волны накачки и детектируемого сигнала, а-XX, b-XY соответственно. Эллипсом отмечены границы структуры. Длина волны накачки 765нм.

Неоднородность поля в перетяжке лазерного пучка приводит к нарушению запрета на генерацию ВГ по симметричным соотношениям для всех комбинаций поляризации. Тогда МС могут быть рассмотрены как большие неоднородности, которые эффективно рассеивают зондирующее излучение, что приводит к генерации излучения ВГ в объеме вне МС. В этом случае детектируемый сигнал ВГ будет максимальным, когда сфокусированный пучок зондирующего излучения падает на участки МС с наибольшей кривизной, т.е. изображение ВГ должно иметь яркие точки на МС (для всех комбинаций поляризации). Предложенное объяснение соответствует результатам, представленным на рис. 2-3.

Формирование изображений микроструктур в сканирующем микроскопе ВГ является сложным и не до конца описанным процессом. В нашем случае в каждой точке раstra накачка падает только на маленький участок МС. С этого участка (порядка  $1 \text{ мкм}^2$ ) детектируется сигнал ВГ.

Особенность этих изображений ВГ заключается в том, что яркие точки на изображениях ВГ микроструктур расположены параллельно поляризациям поля волны накачки и второй гармоники.

Учитывая эти данные и предположения о формировании изображений микроструктур на частоте ВГ можно заключить, что объемная восприимчивость

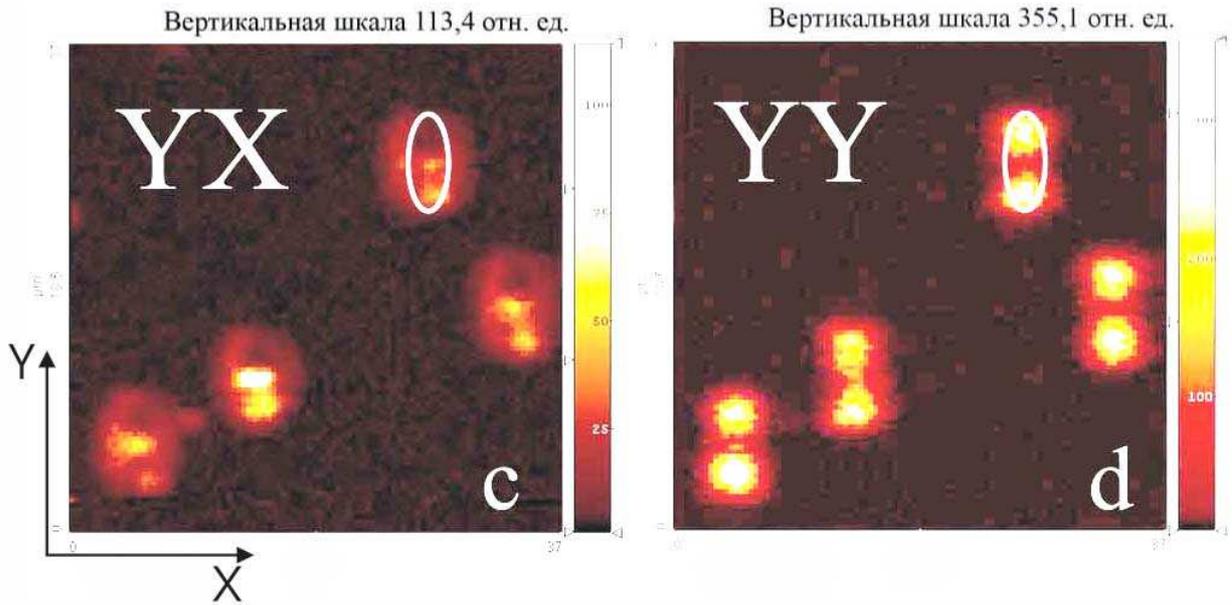


Рис. 3: Изображение полупроводниковых GaInP/GaAs микроструктур в конфокальном микроскопе. Представлены 2 изображения, комбинаций поляризаций с-YX, d-YY соответственно. Длина волны накачки 765нм.

МС обладает той же симметрией, что и GaAs, GaP, для которых тензор дипольной восприимчивости второго порядка обладает только одной ненулевой независимой компонентой  $d_{14}=d_{25}=d_{36}$ . Эта координатная система  $(x^*, y^*, z)$  соответствует кристаллическим осям подложки GaAs, которые повернуты на угол  $45^\circ$  относительно координат, связанных с МС. К примеру, при Y-поляризованной волне накачки  $E_y$  и в присутствии рассеянной  $E_z$  компоненты можно записать преобладающий член в наведенной нелинейной поляризации, ответственный за детектируемый сигнал ВГ, как  $P_{x^*}^{2\omega} = 2d_{14}E_{y^*}E_z$ ,  $P_{y^*}^{2\omega} = 2d_{25}E_{x^*}E_z$ ,  $E_{x^*} = E_{y^*} = E_y\sqrt{2}$ . При условии, что  $d_{14} = d_{25}$ , излучение ВГ поляризовано вдоль оси Y. В соответствии с симметрией конфигурации, отклик структуры на частоте ВГ будет появляться когда падающая волна накачки, поляризованная вдоль оси Y, смещена вдоль оси Y от центра МС.

Сходные рассуждения могут быть использованы для объяснения наличия двух лепестков в изображении ВГ в XX конфигурации.

### *Конфокальная микроскопия ВГ пористого кремния*

Пористый кремний (ПК) является объектом интенсивных исследований уже более двадцати лет. Изначально интерес к структурам из ПК был связан с обнаружением в них эффективной люминесценции в видимой области спектра. С конца 90-х годов прошлого века эта методика используется для создания одномерных фотонных кристаллов (ФК) и микрорезонаторов: контролируемое из-

менение во времени плотности тока электрохимического травления позволяет формировать структуры из чередующихся слоев ПК с заданной пористостью, т.е. структуры с заданной (в том числе и периодической) пространственной модуляцией эффективного показателя преломления. В фотонных кристаллах на основе ПК наблюдалось многократное усиление эффективности генерации второй и третьей оптических гармоник вблизи края фотонной запрещенной зоны и в окрестности микрорезонаторной моды.

Вместе с тем природа нелинейно-оптического отклика ПК исследована лишь частично. Пористый кремний представляет собой сеть нанокристаллических участков кремния, разделенных порами, заполненными воздухом или другим веществом, и характеризуется большой площадью внутренних границ раздела. Поэтому закономерно возникает вопрос об относительной величине поверхностного электродипольного, объемных электроквадрольного и магнитодипольного вкладов [2] в квадратичный оптический отклик структур на основе ПК. В частности, высказывалось предположение, что источником генерации ВГ в ПК являются границы раздела между слоями с различной пористостью [3].

В данном разделе второй главы исследуются механизмы генерации ВГ в слоистых структурах на основе мезопористого кремния.

Слоистые микроструктуры были изготовлены методом электрохимического травления пластин Si(001) в 15% растворе плавиковой кислоты в этаноле. Использовались пластины высоколегированного кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $0.002 \div 0.005$  Ом·см.

Изображение скола исследуемой структуры в оптическом микроскопе показано на рис. 4а. Видно, что рост пор происходит в направлении, перпендикулярном поверхности кремния, что типично для электрохимического травления пластин Si(001). Средний диаметр пор в слоях с высокой пористостью составляет около 50 нм, в слоях с низкой пористостью — около 5 нм. Изменение пористости от слоя к слою связано исключительно с изменением среднего диаметра пор в слое, число пор остается неизменным для всех слоев. Три слоя высокой пористости, полученные при значениях плотности тока травления  $j = 20, 60, 100$  мА/см<sup>2</sup> и соответствующих временах травления  $t = 74, 111, 140$  с, были разделены четырьмя слоями ПК низкой пористости, изготовленными при одинаковых параметрах электрохимического травления  $j = 5$  мА/см<sup>2</sup>,  $t = 300$  с. Геометрические параметры слоев — толщина  $d$  и пористость  $\rho$  (доля объема, занимаемая порами) — приведены на рис. 4а.

На рис. 4б представлено растровое изображение распределения интенсивности ВГ в слоистой ПК структуре для одного и того же участка ПК структуры. Для измерений были выбраны четыре комбинации поляризаций излуче-

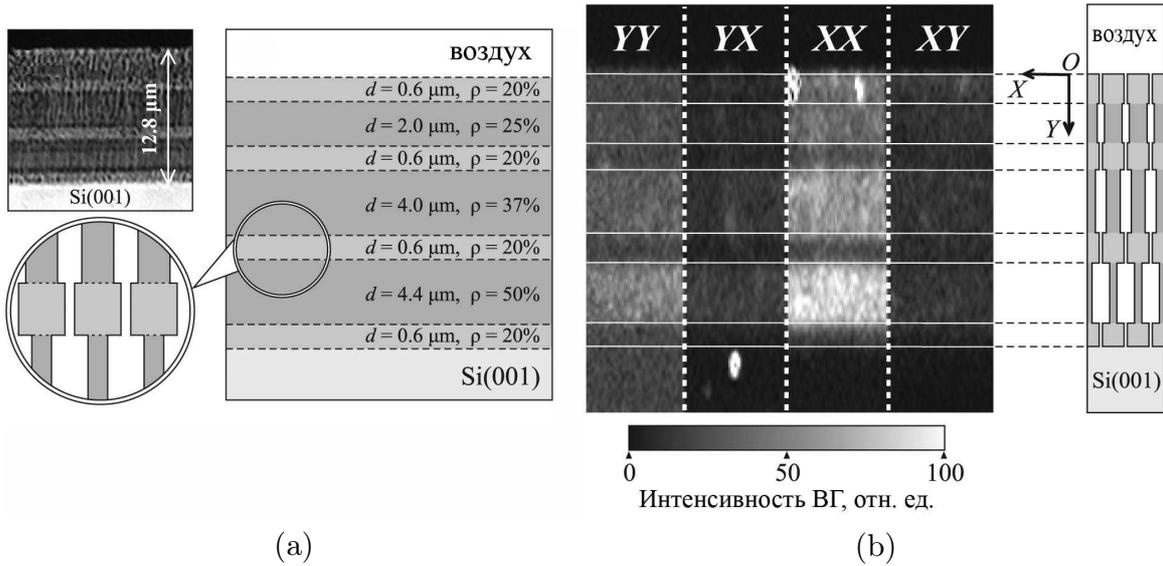


Рис. 4: (4a) Изображение скола исследуемой микроструктуры из ПК в оптическом микроскопе. (4b) Распределение интенсивности ВГ от скола слоистой микроструктуры из ПК, полученное методом конфокальной микроскопии ВГ при четырех комбинациях поляризаций излучения накачки и ВГ. На вставке справа схематически изображена структура слоев ПК с различной пористостью и указан способ выбора системы координат  $XOY$ .

ния накачки и ВГ:  $XX$ ,  $XY$ ,  $YX$  и  $YY$ . Из рис. 4b следует, что при различных комбинациях поляризаций излучения накачки и ВГ наблюдаются существенно различные уровни сигнала ВГ.

На рис. 5a для четырех комбинаций поляризаций приведены зависимости интенсивности ВГ от координаты  $Y$ , измеряемой в направлении роста пор. На графиках отчетливо видна пространственная модуляция величины  $I_{2\omega}$ , соответствующая чередованию слоев с разной пористостью. Наибольшие значения интенсивности ВГ, а также контраста зависимости  $I_{2\omega}(Y)$ , наблюдаются для  $XX$ -геометрии, когда векторы напряженности электрического поля волн накачки и ВГ перпендикулярны стенкам пор. Кроме того, уровни сигнала ВГ, регистрируемые в  $XX$ - и  $YY$ -геометриях, заметно превосходят соответствующие значения, измеренные для комбинаций со скрещенными поляризациями —  $XY$  и  $YX$ , т.е. в излучении ВГ доминирует компонента, линейно поляризованная в направлении, совпадающем с направлением поляризации волны накачки.

На рис. 5b представлены зависимости  $I_{2\omega}(\rho)$ . Уровень сигнала ВГ от каждого слоя с заданной пористостью определялся путем усреднения по всему массиву данных, полученных сканированием в пределах соответствующего слоя. Из рис. 5b следует что, для всех комбинаций поляризаций величина  $I_{2\omega}$  линейно возрастает с увеличением пористости.

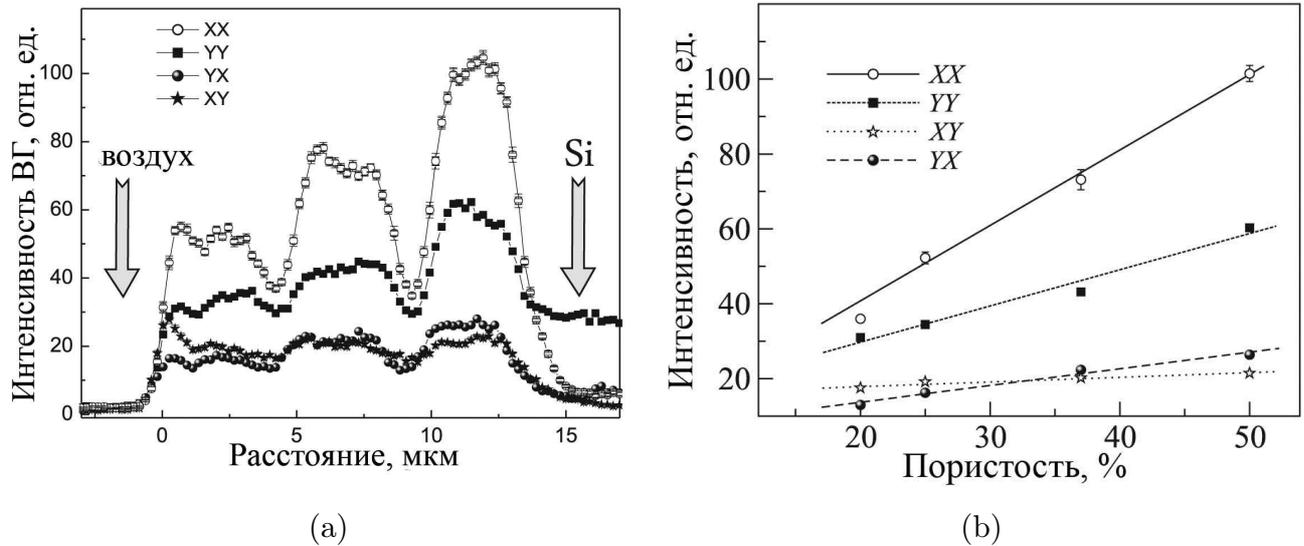


Рис. 5: (5а) Зависимость интенсивности ВГ от координаты сканирования скола вдоль направления роста пор. Началу отсчета координаты соответствует внешняя граница раздела воздух/кремний. (5б) Зависимость интенсивности ВГ от пористости слоев ПК; точки: эксперимент, прямые линии: аппроксимация экспериментальных данных линейными зависимостями.

При интерпретации полученных экспериментальных данных следует учесть, что излучение ВГ эффективно генерируется в макроскопическом объеме, локализованном под внешней границей скола — в пределах перетяжки сфокусированного пучка накачки, поэтому, пренебрегая краевыми эффектами, можно считать фрагмент структуры, участвующий в генерации ВГ, макроскопически центросимметричным. Естественно предположить, что в этом случае излучение ВГ порождено дипольным квадратичным откликом стенок пор. Шероховатость стенок пор проявляется в случайных локальных отклонениях формы поперечного сечения пор от центросимметричной и приводит к пространственным флуктуациям дипольного квадратичного отклика [4], который для отдельной поры может быть охарактеризован удельной величиной — дипольным моментом единицы длины поры  $\mathbf{D}_{2\omega}$ , индуцируемым на удвоенной частоте. Регулярная составляющая у квадратичного дипольного отклика отсутствует:  $\langle \mathbf{D}_{2\omega} \rangle = 0$ , где угловые скобки обозначают статистическое усреднение по всевозможным реализациям формы поперечного сечения поры, и соответствующий вклад в интенсивность ВГ  $I_{2\omega}$  пропорционален  $\langle |\mathbf{D}_{2\omega}|^2 \rangle$ . Предположим, что характерные размеры шероховатости на стенке поры много меньше ее среднего радиуса  $R$  и не зависят от последнего (т.е. не зависят от параметров электрохимического травления). Тогда величина “нескомпенсированного” дипольного момента  $\mathbf{D}_{2\omega}$ , возникающего для нецентросимметричной реализации поперечного сечения по-

ры, растет линейно с ростом  $R$ , откуда  $\langle |\mathbf{D}_{2\omega}|^2 \rangle \propto R^2$ . Считая, что удельные дипольные моменты любых двух пор статистически независимы, для слоя с концентрацией пор  $n$  и пористостью  $\rho$  получим:

$$I_{2\omega} \propto n \langle |\mathbf{D}_{2\omega}|^2 \rangle \propto nR^2 \propto \rho.$$

Следовательно, наблюдаемый в эксперименте линейный рост сигнала ВГ с увеличением пористости объясняется тем, что нелинейно-оптические источники имеют флуктуационную электродипольную природу и локализованы на стенках пор, причем вклады от различных пор взаимно некогерентны.

### **Глава 3. Исследование механизмов генерации второй гармоники на границе раздела кремний-оксид кремния при малых упругих деформациях растяжения.**

В третьей главе приведены экспериментальные результаты исследования генерации второй гармоники на поверхности пластины кристаллического кремния в зависимости от деформации растяжения. Приведен анализ добавок в нелинейно-оптический отклик поверхности, обусловленный деформацией растяжения.

Изучение механических напряжений в кремниевых структурах имеет важное значение для кремниевой технологии. Они проявляются на разных стадиях изготовления интегральных микросхем. По мере усложнения и миниатюризации кремниевых устройств проблемы остаточных напряжений начинают сильнее сказываться на их качестве и электрических параметрах. В то же время, целенаправленное деформирование элементов транзисторов в интегральных схемах используется такими производителями, как Intel, IBM, AMD [5] для повышения подвижности носителей заряда в кремнии. Это позволяет повысить быстродействие интегральных микросхем на основе кремния с одновременным уменьшением рассеиваемой мощности.

Кроме того, в естественных условиях на поверхности образуется прозрачная пленка оксида кремния  $\text{SiO}_2$ , которая также приводит к появлению механических напряжений в приповерхностном слое, связанных с несоответствием кристаллических решеток.

В данной работе для проведения исследований по влиянию деформации растяжения на основе линейного одно-координатного транслятора было собрано устройство для деформации пластины кремния методом изгиба. Пластина кремния закреплялась на столике, который, в свою очередь, с высокой точностью и воспроизводимостью устанавливался на подвижную часть транслятора. В процессе эксперимента происходило перемещение краев пластины относитель-

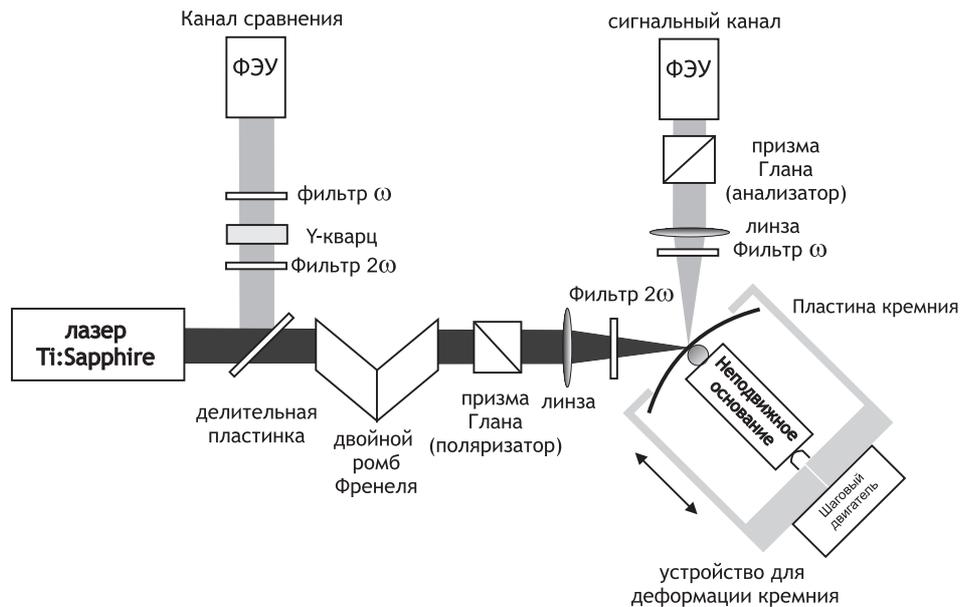


Рис. 6: Схема экспериментальной установки на базе титансапфирового лазера для исследования поверхностной второй гармоники при деформации растяжения.

но ее неподвижного центра. Зондирование нелинейнооптических свойств кремния происходило на этой точке; измерялась зависимость интенсивности ВГ от степени деформации пластины. Созданное устройство позволяло проводить измерения при одноосной и двуосной упругих деформациях растяжения.

При создании дополнительного напряжения в приповерхностном слое изгибом пластины изменяется как механическое напряжение, так и статическое электрическое поле и, соответственно, суммарный вклад в интенсивность ВГ. Были проведены эксперименты по одноосной деформации пластин кремния. Ориентация оси деформации совпадала с одной из координатных осей X или Y, вдоль которых также было поляризовано излучение накачки и ВГ. Измерения проводились для пластины низколегированного кристаллического кремния n-типа с сопротивлением  $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщиной 380 мкм и для высоколегированного p-кремния с сопротивлением  $0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщиной 480 мкм. В силу малости сигнала при деформации  $\varepsilon \leq 10^{-3}$  применялась модуляционная методика для увеличения соотношения сигнал/шум. Данные измерения проводились при длине волны накачки 734 нм.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1. Видно, что для высоколегированного p-кремния эффект имеет один и тот же знак, что объясняется появлением добавки в виде вклада, связанного с кубичной дипольной восприимчивостью за счет электростатического поля в приповерхностном слое кремния при перераспределении заряда в процессе деформации. Данный эффект не будет зависеть от ориентации оси деформации. Для низколегированного n-кремния

Таблица 1: Значения относительного изменения интенсивности ВГ, индуцированной одноосной деформацией в одном из двух направлений X или Y.

комбинация поляризаций	тип кремния	деформация X	деформация Y	тип кремния	деформация X	деформация Y
SP	n-Si	-0,05	+0,08	p-Si	+0,03	+0,08
PP	n-Si	+0,06	-0,08	p-Si	+0,16	+0,08

знак эффекта зависит от ориентации оси деформации и добавка определяется модификацией объемной кристаллографической и поверхностной нелинейной восприимчивостей  $\chi^{(2)}$  под действием деформации. Феноменологически связь между тензором нелинейной восприимчивости и тензором деформаций описывается через тензор фотоупругости P:

$$\chi_{ijk}^{(2)} = P_{ijklm} \cdot u_{lm} \quad (1)$$

Более высокий ранг тензора фотоупругости будет приводить к появлению анизотропного отклика ВГ при повороте плоскости деформации, что наблюдается в эксперименте для низколегированного кремния, в котором электроиндуцированный вклад оказался незначительным по сравнению с деформационным.

С целью проведения измерений по определению зависимости вклада в интенсивность ВГ, индуцированного деформацией, был выбран низколегированный n-кремний. Измерения показали (рис. 7а), что при двuosной деформации интенсивности ВГ квадратична при относительной деформации до  $1,5 \cdot 10^{-3}$ . Знак эффекта изменяется при длине волны 740 нм накачки (рис. 7b), что соответствует резонансу кремния в области 3,34eV его зонной структуры на частоте ВГ. По-видимому, это связано с изменением фазы вклада во ВГ при переходе через резонанс и, соответственно, с изменением знака интерференционного члена в выражении для нелинейной поляризации.

#### Глава 4. Генерация второй оптической гармоники в пленках железиттриевого граната, допированного висмутом при остаточных напряжениях

Четвертая глава посвящена исследованию поликристаллических пленок железиттриевого граната, допированного висмутом. Особенностью данных пленок является наличие варьируемого внутреннего механического напряжения, опре-

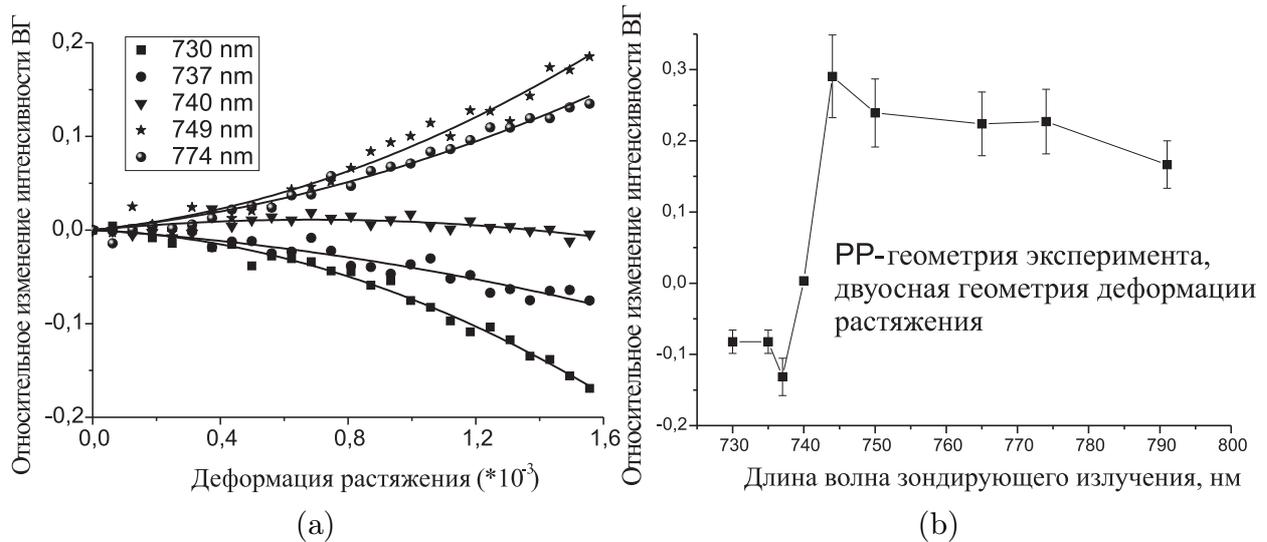


Рис. 7: (7a) График зависимости относительного изменения интенсивности ВГ от двусосной деформации растяжения в пластине кремния (001) *n*-типа ( $4,5 \cdot \text{Ом} \cdot \text{см}$ ); (7b) График зависимости относительного изменения интенсивности ВГ от длины волны зондирующего излучения при двусосной деформации растяжения. Изменение знака эффекта происходит на длине волны ВГ 370 нм.

деляемого рассогласованием постоянных решеток материалов пленки и подложки, а также наличием дислокаций.

Магнитные феррит-гранаты известны как материалы, обладающие широким набором магнитных, оптических и магнитооптических свойств. Они прозрачны в оптической области спектра и поэтому находят применения в устройствах магнитооптической записи, отображения и обработки оптической информации. Что касается их нелинейно-оптических свойств, то следует отметить, что именно в пленках феррит-гранатов был обнаружен эффект генерации магнитоиндуцированной второй гармоники, или нелинейно-оптические аналоги магнитооптических эффектов Фарадея и Керра [6], и впервые продемонстрировано, что магнитоиндуцированный поворот плоскости поляризации и изменение интенсивности ВГ по крайней мере на порядок превосходят аналогичные линейные магнитооптические эффекты.

Впоследствии появился ряд работ, в которых показано, что в феррит-гранатах в ряде случаев возможна генерация объемной ВГ, что означало, в частности, отклонение их структуры от centrosymmetric [7].

Было высказано предположение, что в присутствии ионов висмута, отличающихся большим атомным радиусом, происходит искажение кристаллографической решетки ЖИГ и она становится слабо полярной, т.е. допускает генерацию ВГ в объеме кристалла [8]. В то же время следует отметить, что последователь-

ного исследования связи внутренних механических напряжений с эффективностью нелинейно-оптического отклика феррит-граната до настоящего времени не проводилось.

В данной главе проведено исследование механизма генерации ВГ в тонких эпитаксиальных пленках ЖИГ, допированных висмутом. При этом основное внимание было уделено анализу параметров кристаллографической структуры пленок, выявлению величины внутренних остаточных деформации в пленках ЖИГ разного состава и определению зависимости анизотропии и интенсивности ВГ от этих факторов.

Образцы представляют собой тонкие эпитаксиальные пленки железо-иттриевого граната с висмутом, напыленные на подложки гадолиний галлиевого граната (GGG) с кристаллографической ориентацией поверхности (111), толщина пленок лежит в диапазоне от 300 до 1200 нм. Известно, что введение ионов висмута приводит к увеличению микронапряжений в структуре пленок железо-иттриевого граната. Пленки ЖИГ, допированного висмутом, были изготовлены в Мичиганском технологическом университете в группе проф. М. Леви. При напылении использовались мишени, описываемые стехиометрической формулой  $\text{Bi}_{0.8}\text{Y}_{2.2}\text{Fe}_{4+x}\text{Ga}_{1-x}\text{O}_{12}$ , где  $x$  принимает значение либо 0, либо 0.8. Наиболее значимые параметры напыления эпитаксиальных пленок это: ра-

бочее давление, температура подложки, время напыления, энергия падающего потока ионов аргона  $\text{Ar}^+$ , количество кислорода в рабочем объеме, расстояние от подложки до мишени (Bi:YIG). Варьируя химический состав и условия изготовления образцов, можно изменять внутренние напряжения в эпитаксиальной пленке.

Напряжения в кристаллических структурах делят на макронапряжения и микронапряжения. Первые связаны с упругими искажениями кристаллической решетки в значительной части кристалла и проявляются на рентгенограммах в

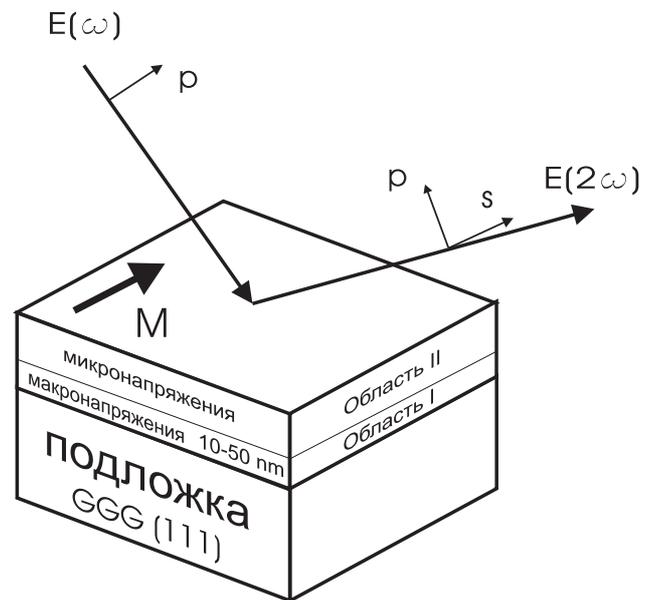


Рис. 8: Схема структуры пленки и геометрии эксперимента. Область I макронапряжений обусловлена несоответствием параметров кристаллической решетки подложки и пленки, ее толщина порядка 10-50 нм, область II микронапряжений обусловлена дислокациями.

виде сдвига интерференционных линий. Вторые связаны с искажением структуры отдельных кристаллитов, появлением дислокаций, проявляются на рентгенограммах в виде уширения рефлексов и появления диффузного фона. Напряжения, вызванные несоответствием постоянных решеток подложки и напыляемой пленки, будем называть напряжениями типа I, а для их описания использовать величину  $A=(a_1-a_0)/a_0$ , где  $a_0$  — постоянная решетки подложки и  $a_1$  — постоянная решетки пленки в нормальном направлении.

Второй вид напряжений, вызванных дислокациями и флуктуациями (микронапряжения), будем называть напряжениями типа II и для его описания использовать величину  $\epsilon$ . Величина  $\epsilon$  связана с расплыванием рефлексов и находилась по методу Вильямсона-Холла. Оказалось, что для исследуемых пленок величина, характеризующая микронапряжения  $\epsilon$ , на порядок меньше величины  $A$ , характеризующей напряжения типа I.

Для определения количественного состава пленок использовался метод обратного резерфордского рассеяния (RBS). Было обнаружено, что при увеличении концентрации висмута параметр  $A$  уменьшается, а с увеличении концентрации иттрия  $A$  растет. Зависимости величины микронапряжений от концентрации какого-либо типа ионов обнаружено не было.

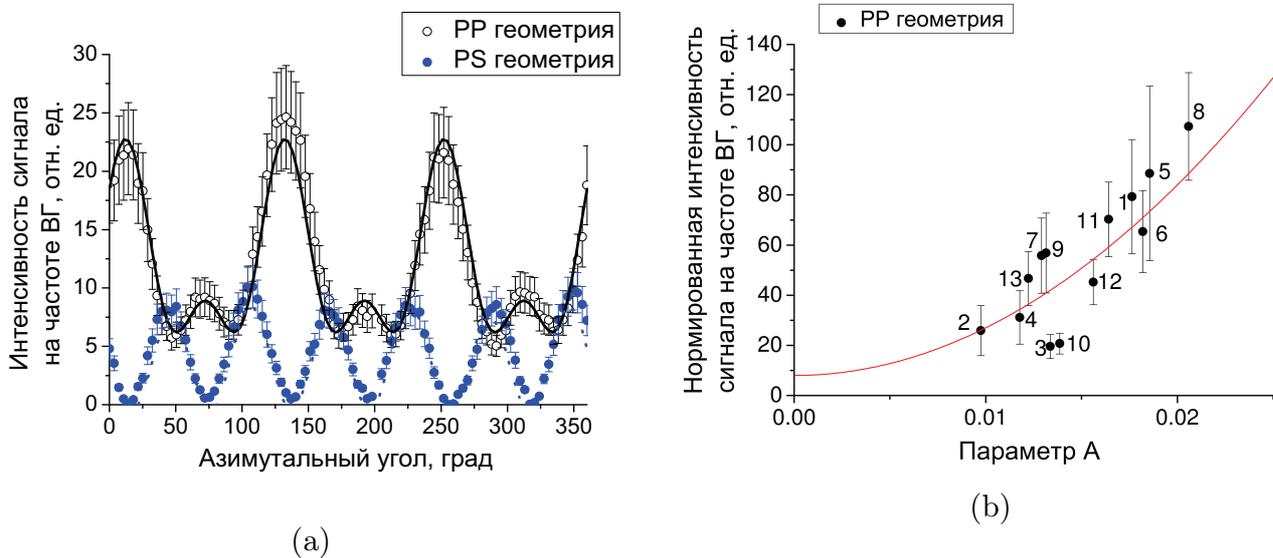


Рис. 9: (9a) Анизотропная зависимость интенсивности ВГ для одного из образцов из серии. РР геометрия эксперимента: р-поляризованная накачка, р-поляризованный детектируемый сигнал; PS геометрия: р-поляризованная накачка, s-поляризованный детектируемый сигнал. (9b) Точки - экспериментальная зависимость интенсивности отраженной от образца ВГ от параметра  $A$ , РР- геометрия; сплошная кривая - результат аппроксимации, задается уравнением вида  $y = a + bx^2$ ;

Для каждого образца эпитаксиальных пленок ЖИГ с висмутом были измерены зависимости интенсивности отраженной второй гармоники от азимутального угла образца. Измерения были проведены для различных комбинаций поляризации излучения накачки и ВГ как в присутствии магнитного поля, так и без него. Использовалась стандартная экспериментальная установка, аналогичная описанной в предыдущей главе. Целью измерений являлось установление зависимости сигнала на частоте второй гармоники от параметров, характеризующих напряжения типа I и II, вызванных особенностями технологии магнетронного напыления пленок.

Падающее на образец излучение было  $p$ -поляризованным (рис. 8), для отраженного от поверхности образца излучения детектировалась как  $p$ -поляризованная компонента (PP геометрия эксперимента), так и  $s$ -поляризованная компонента (PS геометрия эксперимента). На рис. 9а приведен характерный для всех образцов график азимутальной зависимости интенсивности второй гармоники (ВГ), отраженной от поверхности эпитаксиальной пленки ЖИГ. Непрерывной линией на рисунке представлен результат аппроксимации, соответствующий анизотропии отклика на частоте ВГ для грани (111) кубического кристалла класса симметрии  $m\bar{3}m$ . Отметим, что для  $s$ -поляризованной ВГ (PS геометрия эксперимента) отсутствует изотропная составляющая, т.е. выполнен  $s$ -запрет. Это говорит о том, что поверхность исследуемых образцов является достаточно гладкой, а хорошее согласие теоретической кривой и экспериментальных данных указывает на высокое качество кристаллической структуры пленок.

На рис. 9б приведена зависимость интенсивность сигнала на частоте второй гармоники в максимуме PP зависимости от параметра  $A$ . Предполагаем, что генерация ВГ в объеме пленки незначительна, поскольку напряжения типа II на один - два порядка меньше напряжений типа I. Тогда генерация гармоники происходит в переходном слое толщиной 10-50 нм, соответствующем области несоответствия кристаллических решеток (рис. 8). Кроме того предполагаем, что сигнал от приповерхностного слоя значительно меньше, поскольку приповерхностная область включает в себя несколько атомарных слоев, тогда как толщина переходного слоя, который также является источником ВГ, на порядок больше.

Влияние механического напряжения на эффективность генерации ВГ в тонких пленках можно описывать зависимостью тензора нелинейной восприимчивости от тензора фотоупругости  $p_{ijklm}$ :

$$\chi_{ijk}^{(2)} = \chi_{ijk}^{(2,0)} + p_{ijklm} u_{lm}, \quad (2)$$

где  $\chi_{ijk}^{(2,0)}$  нелинейная восприимчивость второго порядка для ненапряженной

пленки,  $u_{lm}$  — тензор деформаций, описываемый в виде:

$$u_{lm} = u_{lm}^1 \theta(h_c - z) + u_{lm}^2 \theta(z - h_c), \quad (3)$$

где  $\theta(z)$  — функция Хевисайда, первый член в выражении (3) соответствует вкладу в деформацию несоответствия постоянных кристаллических решеток, второй член определяет деформации, вызванные появлением дислокации в структуре пленки,  $h_c$  - критическая толщина пленки. Если толщина пленки меньше  $h_c$ , то она будет свободна от присутствия дислокаций и деформации в ней будут определяться только первым членом в выражении (3). Исследуемые в работе пленки имеют толщину на порядок большую, чем  $h_c$ . В работе [9] было показано, что детектируемая в эксперименте РР и РS - компоненты интенсивности ВГ определяются обоими вкладами в деформацию пленки в выражении (3).

В предположении доминирующего вклада напряжения типа I в интенсивность ВГ были построены зависимости (рис. 9b). Излучение ВГ, исходящее из области I в направлении детектора, проходит весь объем пленки и ослабляется, поэтому мы нормировали ее значение на независимо измеренный коэффициент пропускания на длине волны ВГ. Зависимости интенсивности отраженной ВГ от величины  $\epsilon$  характеризующей деформации, вызванные дислокациями, нами обнаружены не были в пределах экспериментальных ошибок.

В рамках такого подхода интенсивность второй гармоники, измеряемая в эксперименте, является квадратичной функцией деформаций типа I в пленке ЖИГ.

Исходя из формулы (2), для аппроксимации зависимости  $I_{2\omega}^{pp}(A)$  была выбрана кривая второго порядка; соответствующий результат представлен на рис. 9b.

Таким образом, полученные экспериментальные данные указывают на то, что рост макронапряжений в пленке, связанный с режимами напыления пленок железо-иттриевого граната, приводит к увеличению интенсивности второй гармоники, отраженной от пленки. Полученная зависимость (рис. 9b) соответствует возрастающему характеру зависимости  $I_{2\omega}^{pp}(A)$ .

Характеризация магнитных нелинейно-оптических свойств серии пленок ЖИГ с висмутом заключалась в измерении магнитного контраста, определяемого выражением

$$\rho_{2\omega} = \frac{I_{2\omega}(\mathbf{M}) - I_{2\omega}(-\mathbf{M})}{I_{2\omega}(\mathbf{M}) + I_{2\omega}(-\mathbf{M})}, = \frac{2\chi_{ijk}^e \chi_{ijkm} \mathbf{M}_m}{|\chi_{ijk}^e|^2 + |\chi_{ijkm} \mathbf{M}_m|^2}. \quad (4)$$

диапазон изменения которого составил 0,1% до 11 %. Он определяет наличие нечетных компонент по магнитному полю в магнитный отклик на частоте

ВГ. Сопоставляя данные по измерению магнитного контраста с концентрацией висмута и иттрия, можно сделать вывод в об отсутствии его зависимости от данных параметров. Скорее всего это связано с малым диапазоном концентраций висмута, в данной серии, на котором эта зависимость не различима на уровне ошибок.

## Основные результаты и выводы

В рамках диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Методом сканирующей конфокальной микроскопии второй гармоники (ВГ) получены изображения одиночных GaInP/GaAs микроструктур, сформированных на подложке GaAs(001). Сравнение зависимостей ВГ от поверхности подложки и полупроводниковых микроструктур (ПМ) указывает на то, что излучение ВГ (при освещении ПМ) обусловлено вкладом от подложки в коротковолновой области спектра и непосредственно от ПМ при длине волны накачки свыше 900 нм. Двух-лепестковый характер изображений во ВГ для коллинеарных векторов поляризаций накачки и ВГ при 900 нм волны накачки предположительно является следствием проявления объемной восприимчивости ПМ.
2. Методом конфокальной микроскопии (ВГ) исследованы слоистые структуры на основе пористого кремния. Обнаружен линейный рост интенсивности ВГ с увеличением пористости слоев в диапазоне 20-50 %. Такой характер зависимости может быть обусловлен пространственными флуктуациями дипольного квадратичного отклика стенок пор.
3. Наблюдалась генерация второй оптической гармоники от поверхности (001) кремния с естественным оксидом при малых упругих деформациях растяжения. Экспериментально показано, что под действием малых упругих деформаций растяжения наблюдается добавка в ВГ, которая в случае высоколигированного р-кремния в основном определяется электроиндуцированным вкладом и связана с перезарядкой поверхности при изгибе пластины. В случае низколигированного n-кремния - в основном определяется появлением дополнительных компонент квадратичного тензора нелинейной восприимчивости, индуцированных механическими деформациями. Зависимость относительного изменения интенсивности ВГ от деформации растяжения имеет квадратичный вид при относительных деформациях до  $1,5 \cdot 10^{-3}$ .
4. Проведено систематическое исследование генерации второй гармоники в се-

рии образцов эпитаксиальных пленок железиттриевого граната, допированного висмутом, со встроенными упругими деформациями. Показано, что определяющее влияние на интенсивность ВГ оказывают деформации в структуре пленки, вызванные несогласностью постоянных кристаллографических решеток подложки и пленки. Обнаружен, возрастающий вид зависимости интенсивности ВГ в геометрии на отражение для пленок  $\text{Bi:YIG}$  от величины таких деформаций.

### Список цитируемой литературы

- [1] M. Minsky, Memoir on inventing the confocal scanning microscope // *Scanning* – 1988. – Vol. 10, p. 128–138.
- [2] Y.R. Shen, *The Principles of Nonlinear Optics*. – New York: John Wiley and Sons, 1984.
- [3] T. V. Dolgova, A. I. Maidikovskiy, M. G. Martemyanov, A. A. Fedyanin, O. A. Aktsipetrov, Giant third-harmonic generation in porous silicon photonic crystals and microcavities // *JETP Lett.* – 2002. – Vol. 75, p. 15–19.
- [4] O. A. Aktsipetrov, I. M. Baranova, Yu. A. Il'inskii, Surface contribution to the generation of reflected second-harmonic light for centrosymmetric semiconductors // *Sov. Phys. JETP* – 1986. – Vol. 64, p. 167–173.
- [5] T. Ghani, M. Armstrong, C. Auth, M. Bost, P. Charvat, G. Glass, K. Hoffmann A 90nm high volume manufacturing logic technology featuring novel 45nm gate length strained silicon cmos transistors In *IEDM Technical Digest* Washington, D.C., USA December 7–10 2003.
- [6] O. A. Aktsipetrov, O. V. Braginskii, D. A. Esikov, Nonlinear optics of gyrotropic media: second harmonic generation in rare-earth iron garnets // *Kvantovaya Electron.* – 1990. – Vol. 17, p. 320–324.

- 
- [7] V. N. Gridnev, V. V. Pavlov, R. V. Pisarev, A. Kirilyuk, Th. Rasing, Second harmonic generation in anisotropic magnetic films // *Phys. Rev. B* – Apr 2001. – Vol. 63, №18. – p. 184407.
- [8] В. В. Павлов, Р. В. Писарев, М. Feibig, D. Fröhlich, Генерация оптических гармоник в эпитаксиальных пленках магнитных гранатов в области края фундаментального поглощения // *Физика твердого тела* – 2003. – Vol. 45, №4. – p. 630–637.
- [9] I. L. Lyubchansky, Jae-Woo Jeong, Sung-Chul Shin, N. N. Dadoenkova, Lyubchanskii M. I., Th. Rasing, Influence of lattice mismatch on magnetization-induced optical second harmonic generation from a magnetic film on nonmagnetic substrate // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 87, p. 6794–6796.

**Содержание диссертации отражено в следующих основных работах:**

Статьи

- [1] Reflection second-harmonic microscopy of individual semiconductor microstructures / S. I. Bozhevolnyi, A. Mailykovski, B. Vohnsen, V. Zwiller // *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 90, no. 12. – Pp. 6357–6362.
- [2] Гигантская третья гармоника в фотонных кристаллах и микрорезонаторах на основе пористого кремния / Т. В. Долгова, А. И. Майдыковский, М. Г. Мартемьянов и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – 2002. – Т. 75. – С. 17–21.
- [3] Giant microcavity enhancement of second-harmonic generation in all-silicon photonic crystals / T. V. Dolgova, A. I. Mailykovski, M. G. Martemyanov et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 81. – Pp. 2725–2727.
- [4] Giant optical second-harmonic generation in single and coupled microcavities on the base of one-dimensional photonic crystals / T. V. Dolgova, A. I. Mailykovski, M. G. Martemyanov et al. // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2002. – Vol. 19. – Pp. 2129–2140.

- [5] Second harmonic generation study of internally generated strain in bismuth-substituted iron garnet films / P. Kumar, A. I. Mailykovskiy, M. Levy et al. // *Opt. Express*. — 2010. — Vol. 18, no. 2. — P. 1076.
- [6] Генерация оптической второй гармоники, индуцированной механическими напряжениями в кремнии / О. А. Акципетров, В. О. Бессонов, Т. В. Долгова, А. И. Майдыковский // *Письма в ЖЭТФ*. — 2009. — Т. 90, № 11. — С. 813–817.
- [7] Конфокальная микроскопия второй гармоники слоистых микроструктур на основе пористого кремния / А. И. Майдыковский, Н. М. Нагорский, Т. В. Мурзина et al. // *Письма в ЖЭТФ*. — 2011. — Vol. 94, no. 6. — в печати.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

- [1] Observation of the local field distribution in photonic crystal microcavity by snom technique / A. Mailykovski, O. Lebedev, T. Dolgova et al. // *Optical Properties of Nanocrystals (SPIE annual meeting)*. — Vol. 4808. — Seattle, USA: 2002. — Pp. 180–184.
- [2] A. I. Mailykovski, O. V. Lebedev, O. A. Aktsipetrov, Fedyanin A. A. Local optical field distribution in photonic crystals with microcavities probed by snom technique In *IQEC/LAT* page 50 Moscow, Russia 2002.
- [3] A. I. Mailykovski, O. V. Lebedev, T. V. Dolgova, D. V. Kazantsev, A. A. Fedyanin Observation of the local field distribution in photonic crystal microcavity by snom technique In *Optical Properties of Nanocrystals (SPIE annual meeting)* Seattle, USA 2002.
- [4] A. I. Mailykovski, T. Dolgova, V. Bessonov, O.A. Aktsipetrov Second-harmonic spectroscopy probe of surface strain at si(001) In *Optics and Photonics, Optical diagnostics* SPIE annual meeting San Diego 2005.
- [5] Surface-strain-induced second-harmonic generation in silicon / T. V. Dolgova, V. O. Bessonov, A. I. Mailykovsky, O. A. Aktsipetrov // *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies: Technical Digest*. — Optical Society of America, 2006. — P. QWF2.
- [6] Surface-strain-induced second harmonic in silicon / T. Dolgova, V. Bessonov, A. Mailykovsky, O. Aktsipetrov // 3rd International conference on material

---

science and condensed matter physics „MSCMP-2006". — Chisinau, Moldova: 2006. — October. — P. 50.

- [7] Reflection second-harmonic microscopy of porous silicon layers / A. Maidikovski, J. Yongseok, S. Magnitskiy et al. // ICONO, Conference program. — Minsk, Belarus: 2007. — May. — Pp. I02–23.
- [8] Nonlinear optical studies of magnetic garnet films / A. Maydykovskiy, N. Dubrovina, O. Aktsipetrov et al. // MISM. — Moscow, Russia: 2008.
- [9] Surface strain-induced second-harmonic generation at si-sio2 interface / A. Maydykovskiy, T. Dolgova, V. Bessonov, O. Aktsipetrov // Proceedings of ICROM. — 2008. — April. — P. 32.
- [10] T. V. Murzina, O. A. Aktsipetrov, A. I. Maydykovskiy Nonlinear optical probes of silicon surface, thin films and nanostructures In *Proceedings of ICROM* page 16 Tokyo, Japan April 2008.

Напечатано с готового оригинал-макета

Подписано в печать 31.08.2011 г.  
Формат 60x90 1/16. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 110 экз. Заказ 359.

Издательство ООО “МАКС Пресс”  
Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.  
Тел. 939-3890. Тел./Факс 939-3891.  
119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
2-й учебный корпус, 527 к.