

На правах рукописи

Круткова Елена Юрьевна

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНИЗОТРОПНЫХ
КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Тимошенко Виктор Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Белогорохов Александр Иванович
кандидат физико-математических наук
Федянин Андрей Анатольевич

Ведущая организация: Центр Естественно-Научных Исследований
Института Общей Физики РАН
им.А.М. Прохорова

Защита состоится “ 24 ” мая 2007 года в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.70 в Московском Государственном Университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, аудитория 2–05^А криогенного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ ” апреля 2007 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.10
доктор физико-математических наук
профессор

Плотников Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы представленных исследований обусловлена широкими возможностями использования кремниевых структур в современных оптоэлектронных технологиях. Учитывая, что кристаллический кремний (с-Si) является базовым материалом современной микроэлектроники и компьютерной техники, то на повестку дня встает задача совмещения кремниевых электрических и оптических элементов в рамках одной интегральной схемы. Однако высокая изотропия линейных оптических свойств с-Si ограничивает возможности его применения как для решения данной задачи, так и в фотонике в целом. Выходом из ситуации может быть формирование на основе с-Si анизотропных микро- и наноструктур, которые обладают оптическими характеристиками, необходимыми для управления светом. При этом, варьируя условия формирования, можно было бы создавать анизотропные кремниевые структуры с желаемыми значениями показателей преломления и величиной двулучепреломления. Кроме того, поскольку кремний является полупроводником, открывается перспектива управления оптическими свойствами образцов посредством контролируемого изменения концентрации свободных носителей заряда в их микро- и наноструктурах. Все это обуславливает **актуальность задачи** по исследованию оптических свойств анизотропных кремниевых структур.

Анизотропные кремниевые структуры можно формировать, используя преимущественное травление с-Si вдоль кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$, что достигается в определенных электрохимических или химических процессах. Важными примерами таких анизотропно-структурированных кремниевых систем являются так называемые пористый кремний (ПК) и щелевые кремниевые структуры (ЩКС). В частности, недавно было обнаружено, что ПК, получаемый при электрохимическом травлении сильно легированных бором монокристаллов с-Si с ориентацией поверхности (110), при определенных режимах формирования обладает значительным двулучепреломлением, обусловленным анизотропией формы составляющих его

кремниевых остатков (нанокристаллов) и пор [1]. Причем, величина двулучепреломления в слоях ПК оказывается много больше, чем для известных природных двулучепреломляющих кристаллов, таких, например, как исландский шпат [2]. Еще большим двулучепреломлением могут обладать ЩКС, состоящие из чередующихся кремниевых слоев и пустот (щелей) с характерными толщинами порядка нескольких микрометров [3]. В последнем случае двулучепреломление проявляется в средней и дальней инфракрасной (ИК) области спектра. Отметим, что анизотропия оптических свойств ПК и ЩКС связана с так называемым явлением двулучепреломления формы, обусловленным присутствием в среде анизотропных по форме структурных элементов с характерными размерами много меньше длины волны света [4].

Важной особенностью двулучепреломления в ПК является то, что ее величиной можно управлять как в процессе формирования материала, так и при последующих его обработках. Фактически двулучепреломляющие слои ПК представляют собой яркий пример создания новых наноструктурированных материалов с уникальными оптическими и электронными свойствами. Поскольку при определенных условиях формирования ПК представляет собой ансамбль кремниевых нанокристаллов с чрезвычайно большой удельной поверхностью, то открывается возможность управления его свойствами, в частности, концентрацией свободных носителей заряда, посредством адсорбции различных молекул. До последнего времени считалось, что в силу различных причин в ПК происходит практически полное обеднение равновесными носителями заряда. Такое обеднение хорошо объяснимо для микропористого кремния (микро-ПК) с характерными размерами нанокристаллов и пор порядка нескольких нанометров [5]. В этом случае необходимо учитывать квантовый размерный эффект, приводящий к сильной локализации носителей заряда и росту энергии связи примесных центров. Однако, в мезопористом кремнии (мезо-ПК), для которого характерные размеры кремниевых нанокристаллов обычно составляют более 5-10 нм, концентрация свободных носителей заряда может достигать значительных

величин (более 10^{17} см^{-3}) [6]. Концентрация свободных носителей заряда при этом сильно зависит от диэлектрического окружения и поверхностного состояния нанокристаллов [6,7]. Свободные носители заряда в случае их высокой концентрации вносят существенный вклад в полную диэлектрическую проницаемость ПК. Поэтому, управляя концентрацией свободных носителей заряда с помощью адсорбции молекул, можно существенным образом влиять на оптические свойства ПК, особенно в ИК области спектра [8].

К моменту постановки данного диссертационного исследования в научной литературе отсутствовали надежные данные о дисперсии показателей преломления двулучепреломляющего мезо-ПК. Не было также исследовано влияние пористости данного материала и концентрации свободных носителей заряда в нем на спектры показателей преломления и двулучепреломление. Оптические свойства ЩКС были исследованы только в узком спектральном диапазоне, а полученные результаты не имели количественного согласия с предсказаниями теории.

Целью работы являлось исследование в широком спектральном диапазоне оптических свойств анизотропных слоев мезо-ПК, полученных на сильно легированных бором подложках c-Si, а также микроструктур ЩКС, для выяснения влияний их структурных характеристик и концентрации свободных носителей заряда на двулучепреломление и дихроизм.

В работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование дисперсии показателей преломления и двулучепреломления в анизотропных слоях мезо-ПК и анализ полученных результатов в рамках модели эффективной среды.

2. Изучение зависимости величины двулучепреломления слоев мезо-ПК от их пористости и определение количественных характеристик анизотропии формы кремниевых нанокристаллов и пор в исследуемых слоях.

3. Исследование в широком спектральном диапазоне оптического пропускания образцов ЩКС и анализ полученных результатов с целью нахождения значений основных компонентов тензоров эффективной

диэлектрической проницаемости и эффективного показателя преломления таких структур.

4. Изучение особенностей комбинационного рассеяния света в мезо-ПК и ЩКС для выявления роли анизотропии формы кремниевых структур и свободных носителей заряда в данном явлении.

5. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния свободных носителей заряда на эффективные показатели преломления и коэффициенты поглощения мезо-ПК и ЩКС в ИК диапазоне спектра.

Для решения поставленных задач был применен комплекс различных **методов исследования**, включающий методы поляризационно-чувствительной ИК и субмиллиметровой спектроскопии тонких слоев, растровую электронную микроскопию, спектроскопию комбинационного рассеяния света (КРС).

Достоверность полученных результатов обеспечена применением набора взаимно-дополняющих экспериментальных методик, детальным анализом физических явлений и процессов, определяющих оптические свойства исследуемых структур. В значительной степени достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием между экспериментально полученными данными и значениями, рассчитанными в рамках общепринятых физических моделей.

Автор защищает:

1. Новые данные по дисперсии показателей преломления и двулучепреломления мезо-ПК в спектральном диапазоне 0.6-6 мкм и вывод о возможности их описания в рамках обобщенной модели эффективной среды Бруггемана.
2. Найденные зависимости эффективных показателей преломления, величины двулучепреломления и степени анизотропии формы кремниевых нанокристаллов и пор от величины пористости слоев мезо-ПК, изменяемой в диапазоне от 55 до 85%.
3. Утверждение о возможности многократного изменения величины двулучепреломления и ее знака в ИК диапазоне спектра в слоях мезо-ПК

при увеличении в них концентрации свободных носителей заряда выше 10^{19} см^{-3} .

4. Вывод о возможности описания в дальнем ИК диапазоне спектра оптических свойств ЩКС с периодом структур 4-7 мкм в рамках модели эффективной среды с учетом эффектов двулучепреломления формы.
5. Утверждение о возможности использования метода комбинационного рассеяния света для определения концентрации свободных носителей заряда в мезо-ПК.
6. Вывод о многократном увеличении интенсивности сигнала комбинационного рассеяния света в ЩКС при возбуждении их светом с длиной волны ~ 1 мкм, близкой к толщине кремниевых стенок в таких структурах.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации:

- 1) Экспериментально найдены законы дисперсии показателей преломления и величины двулучепреломления в анизотропных слоях мезо-ПК в видимом и ИК диапазонах спектра.
- 2) Установлено, что оптические свойства мезо-ПК в видимом и ИК диапазонах спектра могут быть удовлетворительно описаны в рамках модели эффективной среды Бруггемана с учетом анизотропии формы кремниевых нанокристаллов и пор.
- 3) Впервые экспериментально и теоретически изучено влияние свободных носителей заряда на дисперсию показателей преломления, двулучепреломление и дихроизм в слоях мезо-ПК.
- 4) Впервые исследованы оптические свойства ЩКС в спектральном диапазоне 1-1250 мкм и найдены законы дисперсии эффективных показателей преломления и двулучепреломления таких структур.
- 5) Предложен и реализован оптический метод определения концентрации свободных носителей заряда в диапазоне 10^{17} - 10^{19} см^{-3} в слоях мезо-ПК по изменению эффективности КРС.
- 6) Обнаружен многократный по сравнению с подложкой c-Si рост

интенсивности стоксовой компоненты КРС в образцах ЩКС при возбуждении их светом с длиной волны ~ 1 мкм, близкой к толщине кремниевых стенок в таких структурах.

Научная и практическая значимость работы состоит в получении новых результатов, которые являются важными как для понимания фундаментальных электронных и оптических свойств анизотропных кремниевых нано- и микроструктур, так и для создания новых элементов на основе кремния для управления светом.

Личный вклад. Роль диссертанта в экспериментальных исследованиях и теоретическом анализе оптических свойств мезо-ПК и ЩКС является определяющей.

Апробация результатов работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 18 работах, из которых 6 статей и 11 тезисов в сборниках докладов и трудов конференций (см. список публикаций). Апробация проходила на следующих конференциях: Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам, секция Физика (Ломоносов-2003), Москва, Россия 2003; IV Национальная конференция по применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования материалов (РСНЭ-2003), ИК РАН, Москва, Россия 2003; X Международная конференция “Физика диэлектриков” (“Диэлектрики-2004”), Санкт-Петербург, Россия, 2004; 10th International Conference on Nonlinear Optics of Liquid and Photorefractive Crystals, Alushta, Crimea, Ukraine 2004; 10th International Conference on Extended Defects in Semiconductors (EDS-2004), Chernogolovka, Russia 2004; 2nd International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2004), Chisinau, Moldova 2004; 10th Conference on Complex Media and Materials (Bianisotropics 2004), Ghent, Belgium 2004; VI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, Россия, 2004; Ломоносовские Чтения–2006, секция Физика, Москва, Россия 2006; 3^d

International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2006), Chisinau, Moldova 2006; VIII Всероссийская Молодежная Конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, Россия 2006.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и основных выводов, и списка цитируемой литературы из 81 наименования. Общий объем работы составляет 106 страниц машинописного текста, включая 75 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, поставлены задачи исследований, дан анализ научной новизны полученных результатов и их практической ценности, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлен перечень конференций, в рамках которых происходила апробация работы, и список публикаций.

Первая глава является обзором литературы и посвящена изложению основных подходов к описанию оптических свойств гетерогенных систем, а также имеющихся в научной литературе сведений по анизотропии оптических свойств ПК и ЩКС. **В разделе 1.1** обсуждаются основные модели эффективной среды, и рассматривается явление двулучепреломление формы. **В разделе 1.2** содержится информация об оптических свойствах слоев ПК, связанных с анизотропией формы составляющих его структурных элементов. Делается вывод о том, что слои мезо-ПК, сформированные на сильнолегированных пластинах монокристаллического кремния p^{++} -Si:В с ориентацией поверхности (110), обладают сильным двулучепреломлением формы. Также обсуждается анизотропия фотолюминесценции и КРС в ПК. **Раздел 1.3** посвящен описанию оптических свойств ЩКС. Показано, что данные структуры могут обладать значительной величиной двулучепреломления в дальнем ИК диапазоне спектра. **В разделе 1.4** рассматривается влияние свободных носителей заряда на диэлектрическую функцию кремниевых нано- и микроструктур, что приводит к изменению их оптических свойств. **В разделе 1.5** изложены основные

особенности явления КРС в кремниевых структурах, а также рассмотрено влияние свободных носителей заряда на спектры КРС – так называемый эффект Фано [9]. В конце главы в **разделе 1.6** сформулированы выводы из обзора литературы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе представлен теоретический анализ линейных оптических свойств анизотропных кремниевых структур в рамках модели эффективной среды Бруггемана и модели проводимости Друде. **В разделе 2.1** сформулированы основные подходы для расчета оптических характеристик анизотропных слоев мезо-ПК и ЩКС и дано обоснование использования моделей эффективной среды Бруггемана и модели проводимости Друде. **В разделе 2.2** представлены результаты расчета эффективных показателей преломления и коэффициентов поглощения ЩКС в дальнем ИК диапазоне с учетом влияния свободных носителей заряда. Также рассмотрено изменение величины двулучепреломления ЩКС с изменением пористости структуры и диэлектрической проницаемости среды, заполняющей щели. Были найдены оптимальные структурные параметры ЩКС, при которых величина двулучепреломления максимальна. Расчеты свидетельствуют, что для ЩКС в дальнем ИК диапазоне может наблюдаться область аномальной дисперсии, связанная с влиянием свободных носителей заряда, что может привести к существенному увеличению двулучепреломления. **В разделе 2.3** представлен расчет дисперсии эффективных показателей преломления мезо-ПК в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра в предположении, что кремниевые нанокристаллы и поры имеют форму эллипсоидов вращения. В дальнем ИК диапазоне было рассмотрено влияние свободных носителей заряда на двулучепреломление и дихроизм в мезо-ПК как с учетом рассеяния носителей заряда на стенках кремниевых нанокристаллов, так и без него. Показано, что в дальнем ИК диапазоне спектра слои мезо-ПК могут обладать аномальной дисперсией и величина двулучепреломления многократно возрастает по сравнению с ее значением в среднем ИК диапазоне спектра.

Третья глава посвящена описанию используемых образцов и экспериментальных методов. В разделе 3.1 данной главы изложена методика изготовления и основные параметры анизотропных слоев мезо-ПК. Для их приготовления в работе использовался метод электрохимического травления пластин сильно легированного бором монокристаллического кремния p^{++} -Si:B с ориентацией поверхности (110) в растворе плавиковой кислоты в этиловом спирте. Преимущественный рост пор в кристаллографических направлениях $\langle 100 \rangle$ в процессе электрохимического травления обуславливает вытянутость кремниевых нанокристаллов и пор в плоскости слоя в направлении $[1\bar{1}0]$ (см. рис.1). В этом случае, как установлено в работах [1,2], оптическая ось системы совпадает с кристаллографическим направлением $[001]$ в плоскости слоя. Размер кремниевых нанокристаллов и пор составляет 10 – 50 нм, что позволяет классифицировать исследуемые образцы ПК как мезопористые [5]. В разделе 3.2 приведена методика формирования ЩКС методом химического травления в растворе КОН. В качестве подложек в работе использовались низколегированные пластины c -Si с ориентацией поверхности (110). Полученная ЩКС состоит из последовательно чередующихся слоев кремниевых стенок и пустот (щелей) (см. рис.2). В работе исследовались ЩКС с периодами 4 – 7 мкм и толщинами кремниевых стенок от 1.4 до 2.3 мкм для разных образцов. Оптическая ось в ЩКС

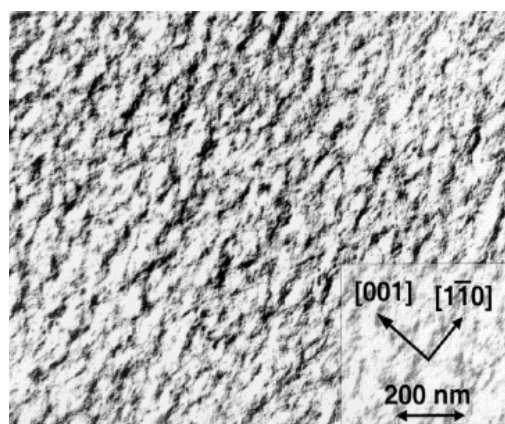


Рис.1. Изображение в просвечивающем электронном микроскопе поверхности типичного образца мезо-ПК, сформированного на подложке p^{++} -Si:B с ориентацией поверхности (110), (темные области – кремниевые нанокристаллы, светлые – поры) [2].

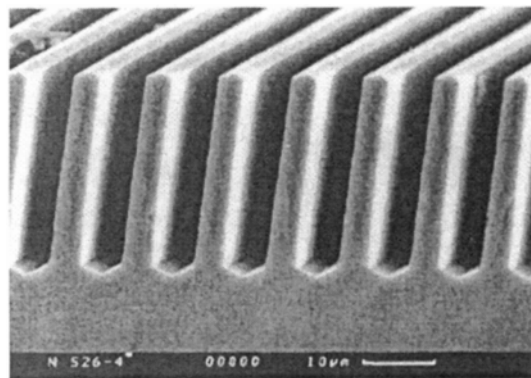


Рис. 2. Изображение в сканирующем электронном микроскопе поперечного сечения ЩКС (период 8 мкм, глубина щелей 28 мкм) [3].

направлена перпендикулярно к кремниевым стенкам и совпадает с кристаллографическим направлением [001]. В разделе 3.3 описана методика измерения спектров пропускания исследуемых образцов методами поляризационно-чувствительной спектроскопии в видимом, ИК и субмиллиметровом диапазонах спектра. Расчет коэффициентов преломления осуществлялся как путем анализа интерференционной картины спектров пропускания с учетом порядка интерференционного максимума по формуле: $2d \cdot n = m \cdot \lambda$, где m – целое число, d – толщина щелевого слоя, так и путем аппроксимации экспериментальных данных расчетными спектральными зависимостями, полученными с использованием формул Френеля. В разделе 3.4 показана схема измерения двулучепреломления и дихроизма в слоях мезо-ПК в видимом диапазоне спектра. Также изложена методика расчета концентрации свободных носителей заряда в мезо-ПК и ЩКС по спектрам пропускания в среднем и дальнем ИК диапазонах спектра и описаны способы увеличения их концентрации путем адсорбции молекул и фотовозбуждения. В разделе 3.5 приведены условия измерений спектров КРС мезо-ПК и ЩКС при возбуждении их длинами волн 0.514, 0.633 и 1.06 мкм.

В четвертой главе представлены экспериментально измеренные дисперсионные зависимости показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волны в мезо-ПК

в видимом и ИК диапазоне спектра.

Результаты измерений анализируются в рамках моделей Бруггемана и Друде. В разделе 4.1 приводятся полученные из спектров пропускания данные по двулучепреломлению и дихроизму в мезо-ПК в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра. На рис. 3 представлены типичные

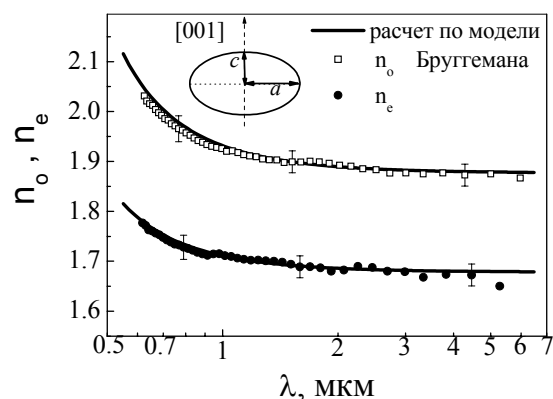


Рис.3. Дисперсионные зависимости показателей преломления обыкновенной n_o и необыкновенной n_e волн в мезо-ПК с пористостью 60%. Линиями показаны рассчитанные по формуле (1) спектры.

дисперсионные кривые для обыкновенной n_o и необыкновенной n_e волн. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетами, выполненными в работе в рамках электростатического приближения модели эффективной среды, когда форма нанокристаллов и пор аппроксимировалась эллипсоидами вращения. Использовалась обобщенная формула Бруггемана [10]:

$$f_1 \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{\parallel,\perp}}{\varepsilon_{\parallel,\perp} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_{\parallel,\perp})L_{\parallel,\perp}} + f_2 \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{\parallel,\perp}}{\varepsilon_{\parallel,\perp} + (\varepsilon_2 - \varepsilon_{\parallel,\perp})L_{\parallel,\perp}} = 0, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\parallel,\perp}$ – компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости мезо-ПК, соответствующие направлению электрического поля вдоль (\parallel) и перпендикулярно (\perp) к оптической оси; ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости кремниевых нанокристаллов и пор; $f_1 = 1 - p$ и $f_2 = p$ – факторы заполнения для кремниевых нанокристаллов и пор (p – пористость); $L_{\parallel,\perp}$ – факторы деполяризации для направлений вдоль и перпендикулярно к оптической оси, которые связаны друг с другом соотношением $2L_{\perp} + L_{\parallel} = 1$ и зависят от формы нанокристаллов и пор согласно соотношению [11]:

$$L_{\parallel} = \frac{x^2}{x^2 - 1} \left[1 - \frac{\arcsin \left[x^{-1} \sqrt{x^2 - 1} \right]}{\sqrt{x^2 - 1}} \right], \quad (2)$$

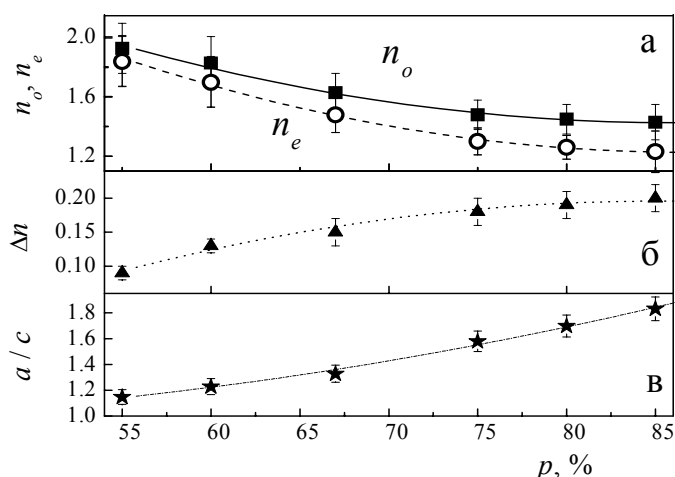


Рис.4. Зависимости показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн (а), величина двулучепреломления (б) и степени анизотропии формы (с) от пористости мезо-ПК. Кривые проведены для наглядности.

где $x = a/c$ – отношение длин полуосей эллипсоида, характеризующее степень анизотропии его формы. Наблюдаемый рост значений показателей преломления и двулучепреломления при уменьшении длины волны с 6 до 0.6 мкм (см. рис. 3) хорошо объясняется ростом величины ε_1 в соответствии с известным

законом нормальной дисперсии для нелегированного c-Si [12].

В области минимальной дисперсии ($\lambda=3-5$ мкм) были измерены зависимости показателей преломления и двулучепреломления мезо-ПК от степени его пористости (рис. 4 а,б). Из этих данных по формулам (1) и (2) были рассчитаны отношения a/c (рис. 4в). Установлено, что с увеличением пористости мезо-ПК происходит уменьшение абсолютных значений показателей преломления (рис. 4 а), но величина двулучепреломления возрастает (рис. 4 б). Последнее обусловлено ростом степени анизотропии формы нанокристаллов кремния и пор (рис. 4 в).

В разделе 4.2 представлены результаты исследования влияния свободных носителей заряда (дырок) на оптические свойства мезо-ПК в среднем и дальнем ИК диапазонах спектра. Учитывая, что характерные размеры кремниевых нанокристаллов в изучаемых слоях мезо-ПК превышают 10 нм, для рассмотрения такого влияния была использована классическая модель Друде, согласно которой диэлектрическая проницаемость нанокристаллов может быть записана в виде:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\nu_p^2}{\nu^2 + i \cdot g \cdot \nu}, \quad (3)$$

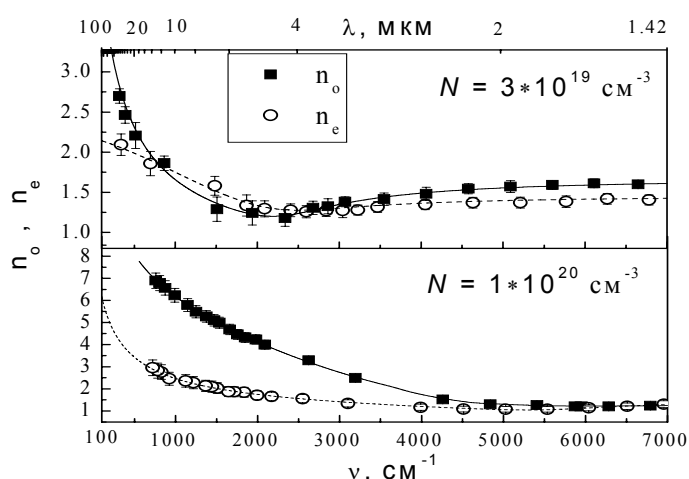


Рис.5. Спектры показателей преломления обыкновенной n_o и необыкновенной n_e волны в мезо-ПК с пористостью 70% при разной концентрации свободных дырок. Линиями даны рассчитанные по формулам (1)-(3) зависимости.

где ν_p – плазменная частота, определяемая концентрацией дырок, g – фактор затухания, обратно пропорциональный времени рассеяния квазиимпульса носителей заряда. На рис. 5 показаны спектры показателей преломления, определенные из спектров пропускания для образцов мезо-ПК с различной

концентрацией свободных дырок N . Последняя величина определялась из спектров коэффициента поглощения в соответствии с методикой, изложенной в работе [7]. Для дисперсионных зависимостей характерна область аномальной дисперсии, которая обусловлена поглощением света свободными дырками, а также область, в которой показатель преломления необыкновенной волны больше, чем обыкновенной. То есть, может иметь место изменение знака величины двулучепреломления. Как видно из рис. 5, экспериментальные спектры хорошо описываются расчетными кривыми, полученными с использованием моделей Бруггемана и Друде.

В разделе 4.3 представлены результаты измерения КРС в слоях мезо-ПК. Показано, что в мезо-ПК происходит модификация тензора комбинационного рассеяния света. Влияние свободных носителей заряда на КРС в мезо-ПК (эффект Фано) приводит к практически линейному уменьшению интенсивности стоксовой компоненты КРС с увеличением концентрации дырок с 10^{18} до 10^{19} см^{-3} (см. рис.6). Это позволяет использовать метод КРС в качестве оптического метода для определения концентрации свободных носителей заряда в мезо-ПК.

В пятой главе рассмотрены линейные оптические свойства ЩКС в широком спектральном диапазоне 1 – 1250 мкм, а также приведены результаты исследования их методом КРС.

В разделе 5.1 представлены поляризационные измерения спектров пропускания ЩКС, измеренные в диапазоне 1 – 1250 мкм. Дано объяснение изменения оптических свойств ЩКС в разных спектральных диапазонах. Из

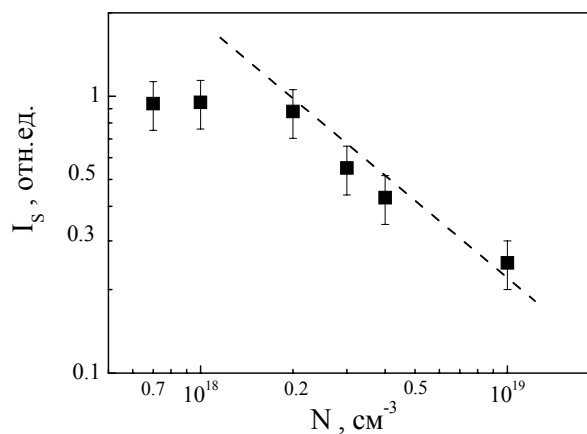


Рис.6. Зависимость интенсивности стоксовой компоненты КРС в мезо-ПК от концентрации свободных дырок. Длина волны возбуждения 1.06 мкм. Линия показывает линейную зависимость.

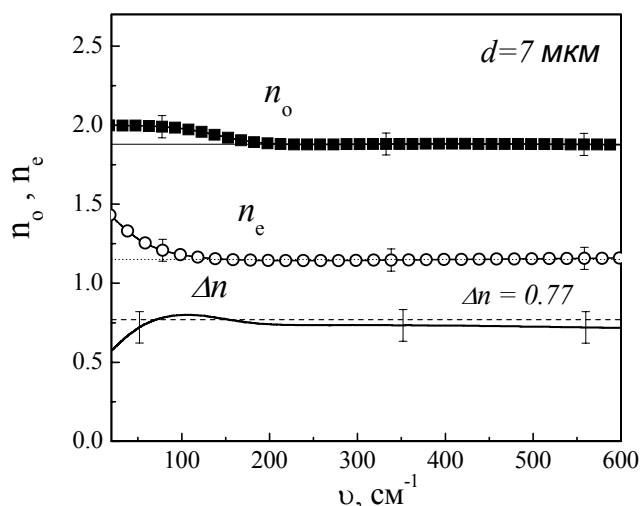


Рис.7. Спектры показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн и величины двулучепреломления в ЩКС (период 7 мкм) в диапазоне 20 – 600 см⁻¹. Линиями показаны расчетные значения.

расчитанные спектры эффективных показателей преломления и двулучепреломления в ЩКС. Видно, что ЩКС характеризуются значительным двулучепреломлением ($\Delta n = 0.77$). Хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных позволяет заключить, что оптические свойства ЩКС в дальнем ИК диапазоне спектра могут быть хорошо описаны в рамках электростатического приближения эффективной среды Бруггемана. Отклонение модели от экспериментальных данных на низких частотах могут быть связаны как с ростом влияния свободных носителей заряда, так и с особенностями структуры реальных образцов ЩКС.

В разделе 5.2 анализируется влияние фотовозбужденных носителей заряда на оптическое пропускание ЩКС в субмиллиметровом диапазоне спектра (1–20 см⁻¹). Показано, что при возбуждении образцов лазерным излучением с длиной волны 532 нм и интенсивностью порядка 0.1 Вт/см² для обыкновенной волны наблюдается уменьшение пропускания на 1 – 2%, в то время как для необыкновенной волны изменений пропускания не наблюдалось. Полученные результаты хорошо объясняются формулами (1)–(3), расчет по которым подтверждает, что рост концентрации свободных носителей заряда с 10¹⁴ см⁻³ до 10¹⁷ см⁻³ может приводить к наблюдаемым изменениям

аппроксимации экспериментальных данных спектрами пропускания, рассчитанными с использованием приближения эффективной среды и формул Френеля, были получены спектры мнимой и реальной частей эффективной диэлектрической функции ЩКС и значений эффективных показателей преломления. На рис.7 представлены измеренные и

пропускания. Результаты расчетов также показывают, что данное уменьшение пропускания ЩКС обусловлено именно ростом поглощения, а не плазменным отражением.

В разделе 5.3 представлены результаты исследования ЩКС методом КРС. Показано, что при длине волны возбуждающего света 1.06 мкм

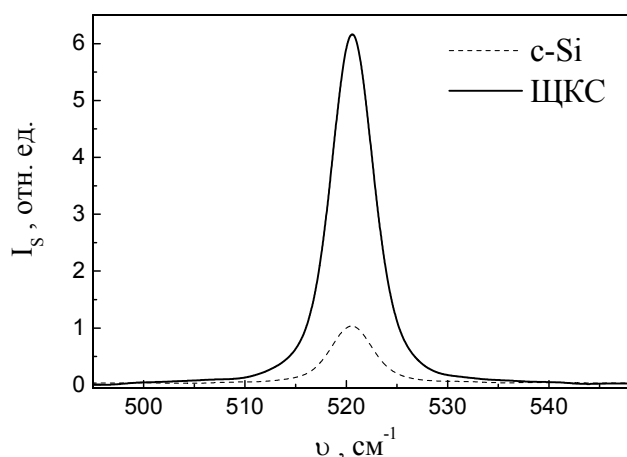


Рис.8. КРС для ЩКС и подложки c-Si при возбуждении циркулярно поляризованным светом с длиной волны 1.06 мкм.

наблюдается многократное усиление стоксовой компоненты рассеяния (см. рис. 8), что связывается с эффектами частичной локализации падающего и рассеянного излучений в кремниевых стенках, которые выполняют роль волноводов.

Поляризационные характеристики КРС в ЩКС носят изотропный характер, что может быть объяснено

деполяризацией излучения в процессе его многократного отражения в кремниевых стенках. Проведенные измерения КРС в ЩКС при возбуждении излучением с длинами волн 0.514 и 0.633 мкм не обнаруживают заметного усиления сигнала КРС. В то же время, поляризационные измерения КРС в ЩКС на данных длинах волн показывают заметную анизотропию рассеяния в направлении вдоль кремниевых стенок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В работе были изучены оптические свойства анизотропных пленок мезопористого кремния, сформированных методом электрохимического травления сильно легированного бором пластин c-Si, и щелевых кремниевых микроструктур, сформированных в результате анизотропного химического травления нелегированных кремниевых подложек, и выявлены основные закономерности влияния анизотропии формы составляющих исследуемые

образцы структурных элементов и концентрации свободных носителей заряда на эффективные показатели преломления, двулучепреломление и дихроизм в таких системах. Были получены следующие основные результаты.

1. Измерены спектры показателей преломления пленок анизотропных мезопористого кремния и выполнен их теоретический анализ, показывающий, что экспериментальные результаты для спектрального диапазона 0.6 – 6 мкм могут быть описаны в рамках электростатического приближения в модели эффективной среды, учитывающей анизотропию формы кремниевых нанокристаллов и пор, составляющих исследуемые образцы, а также материальную дисперсию кремниевых нанокристаллов.
2. Установлено, что при увеличении степени пористости пленок мезопористого кремния с 55 % до 85 % величина двулучепреломления, определяемая как разность значений показателей преломления для обыкновенной и необыкновенных волн, в среднем ИК диапазоне спектра при нормальном падении увеличивается с 0.08 до 0.2, что объясняется ростом анизотропии формы нанокристаллов и пор.
3. В ИК диапазоне спектра 5 – 50 мкм обнаружена аномальная дисперсия показателей преломления мезопористого кремния и дано объяснение полученных экспериментальных результатов в рамках приближения эффективной среды с учетом влияния свободных равновесных носителей заряда (дырок) с концентрацией более 10^{19} см^{-3} . Установлено, что при таких концентрациях свободных носителей заряда также существенно изменяется величина двулучепреломления, включая изменение ее знака.
4. Предложен и реализован новый бесконтактный метод определения концентрации свободных носителей заряда в пленках мезопористого кремния в диапазоне 10^{17} – 10^{19} см^{-3} , основанный на влиянии свободных носителей заряда на интенсивность комбинационного рассеяния света – эффекте Фано.
5. Исследованы оптические свойства щелевых кремниевых структур в широкой спектральной области 1–1250 мкм и обнаружено, что данные

структуры обладают значительной величиной двулучепреломления, которая может достигать значений 0.77 в дальнем ИК диапазоне спектра, что находится в хорошем согласии с расчетами, выполненными в рамках приближения эффективной среды.

6. Обнаружено многократное увеличение интенсивности стоксовой компоненты комбинационного рассеяния света в щелевых кремниевых структурах по сравнению с подложкой c-Si при возбуждении светом с длиной волны 1.06 мкм, близкой к толщинам кремниевых стенок, и дано объяснение данного эффекта на основе представлений о частичной локализации света в кремниевых стенках, выполняющих роль волноводов для падающего и рассеянного оптического излучения.

Цитируемая литература

1. D. Kovalev, G. Polisski, J. Diener, H. Heckler, N. Künzner, V.Yu. Timoshenko, F. Koch // *Appl. Phys. Lett.*, 2001, v. 78, № 24, pp. 916–918.
2. N. Künzner, D. Kovalev, J. Diener, E. Gross, V.Yu. Timoshenko, G. Polisski, F. Koch, M. Fujii // *Opt. Lett.*, 2001, v. 26, pp. 1265–1268.
3. Е.В. Астрова, Т.С. Перова, В.А. Толмачев, А.Д. Ременюк, J. Vij, A. Moore // *ФТП*, 2003, т. 37, с. 417–421.
4. М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*, 1973, М.: Наука, 651 с.
5. A.G. Cullis, L.T. Canham, P.D.G. Calcott // *J. Appl. Phys*, 1997, v. 82, pp. 909 – 964.
6. V.Yu. Timoshenko, Th. Dittrich, F. Koch // *Phys. Stat. Solidi (b)*, 2000, v. 222, pp.2-4.
7. V.Yu. Timoshenko, Th. Dittrich, V. Lysenko, M.G. Lisachenko, F. Koch. // *Phys. Rev. B*, 2001, v. 64, pp.085314(1-10).
8. Л.А. Осминкина, Е.В. Курепина, А.В. Павликов, В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров // *ФТП*, 2004, т. 38, в. 5, с. 603-609.
9. П. Ю, М. Кардона. *Введение в физику полупроводников*, 2002, М.: Физматлит, 440 с.
10. J.E. Spanier, I.P. Herman // *Phys. Rev. B.*, 2000, v. 61, № 15, pp. 10437–10449.
11. J.A. Osborn // *Phys. Rev.*, 1945, v. 67, pp. 351.
12. В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников (справочник)*, 1987, Киев: Наукова думка, 608 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Л.А. Головань, А.Ф. Константинова, К.Б. Имангазиева, Е.Ю. Круткова, В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров “Дисперсия оптической анизотропии в пленках наноструктурированного кремния” // Кристаллография, 2004, т. 49, № 1, стр. 151–156.
- A2. L.A. Golovan, G.I. Petrov, V. Sheslavskiy, E.Yu. Krutkova, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, P.K. Kashkarov, V.Y. Timoshenko, V.V. Yakovlev “Nonlinear optical conversion in anisotropic 1D photonic crystal structures” // Proceedings of SPIE – International Society for Optical Engineering, 2004, v. 5360, pp. 427–434.
- A3. П.К. Кашкаров, Л.А. Головань, С.В. Заботнов, В.А. Мельников, Е.Ю. Круткова, С.О. Коноров, А.Б. Федотов, К.П. Бестемьянов, В.М. Гордиенко, В.Ю. Тимошенко, А.М. Желтиков, Г.И. Петров, В.В. Яковлев “Увеличение эффективности нелинейно – оптических взаимодействий в наноструктурированных полупроводниках” // ФТТ, 2005, т. 47, вып. 1, стр. 153–159.
- A4. E.Y. Krutkova, V.Y. Timoshenko, L.A. Golovan, P.K. Kashkarov, E.V. Astrova, T.S. Perova, B.P. Gorshunov, A.A. Volkov “Broad band infrared spectroscopy of grooved silicon” // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2005, v. 5825, pp. 670–676.
- A5. Е.Ю. Круткова, В.Ю. Тимошенко, Л.А. Головань, П.К. Кашкаров, Е.В. Астрова, Т.С. Перова, Б.П. Горшунов, А.А. Волков «Инфракрасная и субмиллиметровая спектроскопия щелевых кремниевых структур» // ФТП, 2006, т. 40, № 7, стр. 855–860.
- A6. G.I. Petrov, V.I. Shcheslavskiy, V.V. Yakovlev, L.A. Golovan, E.Yu. Krutkova, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, V.Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov, E.M. Stepovich “Effect of photonic crystal structure on the nonlinear optical anisotropy of birefringent porous silicon” // Opt. Lett., 2006, v. 31, № 21, pp. 3152–3154.