

На правах рукописи

Мельников Василий Алексеевич

**ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЛЯ  
В ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОРИСТЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Специальность 01.04.05 - Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

Работа выполнена на кафедре общей физики и молекулярной электроники физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук,  
профессор П.К. Кашкаров

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор Емельянов Владимир Ильич  
доктор физико-математических наук, Белогорохов Александр Иванович

**Ведущая организация:** Институт общей физики Российской академии наук

Защита состоится “\_\_\_” июня 2005 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д-501.001.67 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, г. Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ЦФА им. Р.В. Хохлова. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” мая 2005 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д-501.001.67  
кандидат физико-математических наук  
доцент

А.Ф. Королев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Актуальность представленных исследований обусловлена фундаментальным интересом к механизмам линейного и нелинейно-оптического отклика твердотельных структур с пониженной размерностью. Одним из магистральных направлений современной физики является изучение свойств материалов, формируемых из элементов, размеры которых составляют от единиц до сотен нанометров, а также разработка принципов создания таких наноструктур. Свойства этих сред заметно отличаются от свойств составляющих их элементов. Используемый в настоящей работе метод электрохимического травления позволяет изменять оптические свойства исходного материала и формировать оптически качественные среды, свойства которых могут варьироваться в широком диапазоне. Таким образом, становится возможным создать новые материалы с заданными свойствами, которые найдут самое широкое применение в различных областях: оптике, химии, электронике. В частности, возникновение искусственной анизотропии в подобных средах, усиление локального поля в микрочастицах и возможность заполнения пор веществами с высоким нелинейно-оптическим откликом открывает широкие возможности по созданию новых эффективных преобразователей частоты света. В связи с этим детальное исследование заслуживает изучения влияния эффектов локального поля на линейные и нелинейно-оптические свойства нанокompозитных сред. Эти эффекты достаточно хорошо изучены для наносистем с металлическими включениями, а также в пористом кремнии, и, в частности, приводят к увеличению эффективности нелинейно-оптических взаимодействий. Вместе с тем детальное исследование эффектов локального поля в указанных средах осложнено присутствием в них значительного оптического поглощения. В настоящей диссертационной работе исследуется влияние эффектов локального поля на оптические свойства прозрачных нанокompозитных сред, таких как окисленный пористый кремний (ОПК), пористый оксид алюминия (ПОА) и

пористый фосфид галлия (ПФГ). Рассматриваются два предельных случая. В первом случае (пористый оксид алюминия и пористый оксид кремния) размеры неоднородностей среды много меньше длины световой волны, что позволяет рассматривать среду как оптически однородную с характеристиками, вычисляемыми в рамках модели эффективной среды. Во втором случае (пористый фосфид галлия), когда длина световой волны сравнима с размерами неоднородностей среды, возникает сильное рассеяние и возможны эффекты локализации света в результате интерференции рассеянных волн.

В работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Сформировать методом электрохимического травления пористые среды с заданными оптическими свойствами.
2. Для слоев ОПК, ПОА и ПФГ установить связь между структурными свойствами данных пористых сред, а именно морфологией пор и наночастиц, их размерами и расположением в нанокompозите, и такими оптическими параметрами как величины показателей преломления и двулучепреломления, а также временем жизни фотона в наноструктурированном материале.
3. Исследовать влияние эффектов локального поля на эффективность процессов генерации оптических гармоник в прозрачных нанокompозитах.
4. Экспериментально показать возможность увеличения эффективности генерации оптических гармоник в пористых средах при использовании следующих подходов: 1) фазового согласования в пористых слоях с анизотропией формы 2) заполнения пор веществами с высокими нелинейными восприимчивостями 3) использования эффектов локализации света.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач был применен комплекс различных методов исследования, включающих измерение спектров пропускания и отражения тонких пленок, генерацию оптических гармоник,

нелинейную спектроскопию, оптическое гетеродинирование, инфракрасную Фурье спектроскопию, атомно-силовую и сканирующую электронную микроскопию, рентгеновскую дифракцию.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена детальным рассмотрением физических явлений и процессов, определяющих линейные и нелинейные оптические свойства нанокompозитных сред. Во многом достоверность полученных результатов обеспечивается хорошим согласием между результатами расчетов и многочисленными экспериментами.

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертации:

- экспериментально исследовано явление оптической анизотропии формы в слоях окисленного пористого кремния, пористого оксида алюминия и пористого фосфида галлия;
- изучены различные возможности использования эффектов локального поля для увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий;
- экспериментально показана возможность фазового согласования для процесса генерации третьей гармоники в слоях окисленного пористого кремния
- продемонстрировано хорошее согласие теоретических расчетов в приближении модели эффективной среды для процесса генерации третьей гармоники в слоях окисленного пористого кремния с результатами эксперимента. Полученные результаты позволяют говорить о возможности модификации точечной группы симметрии однородного материала в результате его наноструктурирования;
- экспериментально обнаружено значительное усиление генерации второй гармоники в слоях пористого GaP различной пористости, которое, как показано, тесно связано с эффектами локализации света.

### **Научные положения и научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Новые данные о двулучепреломлении формы, обусловленного эффектами локального поля, в слоях окисленного пористого кремния, пористого оксида алюминия и пористого фосфида галлия и анализ этого явления в рамках приближения эффективной среды.
2. Вывод о возможности использования прозрачных слоев пористого оксида алюминия и окисленного пористого кремния, с осажденными наночастицами CdS, для увеличения эффективности генерации оптических гармоник.
3. Вывод о значительной величине двулучепреломления формы в слоях окисленного пористого кремния, достаточного для синхронной генерации третьей оптической гармоники.
4. Вывод о влиянии эффектов локального поля на модификацию тензора кубической восприимчивости окисленного пористого кремния.
5. Вывод о роли эффектов локализации света в микроструктурированном GaP на эффективность генерации оптических гармоник и комбинационное рассеяние света.

**Практическая ценность исследования.** Практическая ценность работы состоит в разработке принципов формирования новых сред для фотоники и нелинейной оптики и исследовании их оптических свойств. Например, пленки окисленного пористого кремния обладают достаточной величиной двойного лучепреломления для использования в качестве компактных фазовых пластин. Искусственная анизотропия в изученных средах позволяет уменьшить фазовую расстройку в процессах генерации гармоник, что может быть использовано для создания высокоэффективных преобразователей частоты.

**Личный вклад.** В диссертационной работе обобщены результаты исследований линейных и нелинейных оптических свойств пористых полупроводников и диэлектриков, выполненных диссертантом самостоятельно и в соавторстве. Личный вклад автора заключается в реализации цели и задач

работы, проведении экспериментальных работ, анализе и обобщении полученных результатов.

**Апробация результатов работы.** Материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах [1-19], три из которых опубликованы в ведущих научных российских журналах, и докладывались на следующих конференциях: Nanomeeting 2003, Минск, Беларусь (2003); Ломоносов-2003, Москва, Россия (2003); Laser Physics 2003, Гамбург, Германия (2003); 4-th International Conference Porous Semiconductors – science and technology, Валенсия, Испания (2004); ALT 04, Рим, Италия (2004); 10th conference on complex media and metamaterials Bianisotropics 2004, Гент, Бельгия (2004); 2nd international conference on materials science and condensed matter physics, Кишинев, Молдова (2004); Нанопотоника, Нижний Новгород, Россия (2004); XX российская конференция по электронной микроскопии ЭМ'2004, Черноголовка, Россия (2004); X International Conference “Physics of Dielectrics”, Санкт-Петербург, Россия (2004); Laser Physics 2004, Триест, Италия (2004).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 124 наименований. Объем работы составляет 151 страницы текста, включая 55 рисунков и 3 таблицы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* сформулированы цель и задачи работы. Кратко изложено содержание диссертации.

*В первой главе* представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных получению методом электрохимического анодирования

различных пористых сред и исследованию их линейных и нелинейных оптических свойств.

В разделе 1.1 кратко изложены общие сведения о методе электрохимического анодирования и подробно описываются особенности получения пористого фосфида галлия, пористого кремния и окисленного пористого кремния на его основе, а также пористого оксида алюминия.

Раздел 1.2 посвящен рассмотрению различных моделей эффективной среды для описания оптических и нелинейно-оптических свойств композитных сред. Особое внимание уделено анизотропии формы возникающей в результате эффектов локального поля в анизотропно наноструктурированных пористых средах. Кроме того, обсуждаются режимы, когда модель эффективной среды становится неприменимой. В частности, кратко изложена теория андерсоновской локализации света и представлены последние экспериментальные результаты в этом направлении.

В разделе 1.3 на основе анализа литературных данных в конце главы поставлены задачи настоящего исследования.

**Во второй главе** описаны методики, использованные в работе для получения образцов пористого оксида алюминия, окисленного пористого кремния и пористого фосфида галлия, а также приведены данные об их структурных свойствах.

**В третьей главе** описаны экспериментальные установки и приборы, использованные при исследованиях, и изложены основные методики, применявшиеся в работе для исследования линейных и нелинейных оптических свойств различных пористых слоев.

В разделе 3.1 кратко изложены основные методики, используемые в работе для изучения линейных свойств исследуемых образцов. В частности, особое внимание уделено измерению величины двулучепреломления в тонких пленках.



Раздел 3.2 посвящен описанию фемтосекундного Cr-форстеритового лазерного комплекса и наносекундного параметрического генератора света на основе Nd:YAG лазера, предназначенных для нелинейно-оптических спектроскопических исследований и являющихся идеальным средством для исследования нелинейно-оптических свойств микроструктурированных и наноструктурированных сред. Также описаны условия и методики проведенных нелинейно-оптических измерений.

Раздел 3.3 содержит краткую информацию о методе оптического гетеродинамирования, который применялся в работе для изучения эффектов локализации света.

***В четвертой главе*** с целью выявления роли эффектов локального поля в модификации оптических свойств композитных материалов, приведены результаты комплексного исследования линейных и нелинейных оптических свойств окисленного пористого кремния, пористого фосфида галлия и пористого оксида алюминия. Представлены данные по экспериментальному исследованию линейной и нелинейной искусственной оптической анизотропии в этих материалах. На примере генерации оптических гармоник рассматриваются различные способы увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в композитных средах.

Раздел 4.1 посвящен изучению линейных оптических свойств слоев пористого оксида алюминия и окисленного пористого кремния, для которых характерные размеры пористой структуры (размер пор и расстояние между ними) значительно меньше длины световой волны. В соответствии с приближением эффективной среды такие среды можно рассматривать на макроскопических масштабах как оптически однородные. Однако в результате преимущественного распространения пор вдоль выделенных направлений в однородной изотропной среде возможно появление двулучепреломления формы. Это явление представляет интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и для целого ряда прикладных задач современной оптики.

Проведено детальное исследование линейных оптических свойств пористого оксида алюминия с периодом структуры значительно меньшим длин волн видимого диапазона. Согласно проведенным измерениям величины двулучепреломления от угла падения излучения на поверхность слоя пористого оксида алюминия можно сделать вывод, что этот материал является одноосным оптическим кристаллом, с оптической осью направленной вдоль нормали к его поверхности. Теоретическая аппроксимация в приближении модели эффективной среды для экспериментальной зависимости величины двулучепреломления от угла падения излучения позволила вычислить максимальную величину двулучепреломления пористого оксида алюминия, которая составила 0,06. Наблюдаемая анизотропия показателя преломления значительно выше анизотропии кристаллического оксида алюминия и обусловлена анизотропией формы.

Исследована модификация линейных оптических свойств слоев анизотропного пористого кремния в процессе их окисления при различных температурах. Установлена зависимость между параметрами изготовления пористого кремния и линейными оптическими характеристиками плёнок окисленного пористого кремния. С увеличением плотности тока травления и, следовательно, пористости и анизотропии исходных плёнок пористого кремния, возрастает величина двулучепреломления плёнок окисленного пористого кремния. В результате проведенных исследований были получены оптически качественные слои окисленного пористого кремния прозрачные в видимом и инфракрасном диапазонах и обладающие заметным двулучепреломлением формы, величина которого достигает 0,02, что более, чем в два раза превышает величину анизотропии кристаллического кварца. Отметим, что величина двулучепреломления полученных слоёв достаточна для использования их в качестве компактных фазовых пластинок  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$  в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Экспериментально показано, что электрохимическое микроструктурирование изотропного монокристалла GaP (c-GaP) с

ориентацией (110) позволяет получить двулучепреломляющие слои обладающие высокой квадратичной нелинейностью. Оптическая ось в таких слоях лежит в их плоскости, а величина двулучепреломления достигает значения 0,04 в ИК диапазоне. В соответствии с расчетами данная анизотропия достаточна для достижения  $90^0$  фазового синхронизма для процесса генерации второй гармоники, что делает перспективным использование пористого GaP для преобразования оптических частот.

В разделе 4.2 обсуждаются результаты исследования эффектов локализации света в упорядоченных и случайно-разупорядоченных пористых средах. Явление локализации света, возникающее в результате интерференции локальных полей многократно отраженных или рассеянных волн, может наблюдаться как в упорядоченных, так и в случайно-разупорядоченных композитных средах, когда длина световой волны приближается к размерам неоднородности среды. В упорядоченных композитах показатель преломления изменяется в пространстве периодически, и распространение света описывается хорошо развитой теорией фотонных кристаллов. Локализация света в таких средах проявляется в появлении фотонных запрещенных зон – спектральных областей, для которых соответствующее им излучение не может распространяться в одном или нескольких направлениях в среде. Для описания эффектов локализации света в случайно-разупорядоченных средах используется теория андерсоновской локализации света. Явление локализации света в упорядоченных пористых средах было продемонстрировано на примере пористого оксида алюминия, а эффекты локализации света в случайно-разупорядоченных средах наблюдались в слоях пористого GaP.

Для пористого оксида алюминия с периодом структуры порядка сотен нанометров в спектрах пропускания обнаружена фотонная запрещенная зона в видимом диапазоне, что указывает на достаточно высокую степень упорядочения пор в исследованных слоях. Учитывая возможность заполнения пор веществами с эффективной люминесценцией этот эффект может быть

использован для создания источников света с направленной диаграммой рассеяния и активных элементов лазеров.

Динамика рассеяния света в слоях пористого GaP была исследована с использованием схемы оптического гетеродинамирования на базе сканирующего интерферометра Майкельсона и фемтосекундной лазерной системы на основе кристалла Cr:форстерита. Анализ данных оптического гетеродинамирования показывает, что время жизни рассеянных фотонов ( $\lambda=1,25$  мкм) увеличивается с ростом пористости образцов. Для образца с пористостью 55% оно является наибольшим и составляет около 8 пс, что на два порядка превышает этот параметр для c-GaP. Увеличение времени жизни фотона с ростом пористости связано с уменьшением длины свободного пробега фотона в результате эффектов локализации света в сильно рассеивающих слоях пористого GaP.

В разделе 4.3 обсуждаются данные по экспериментальному изучению различных возможностей увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в пористых средах. Продемонстрировано использование метода генерации оптических гармоник в качестве эффективного инструмента для изучения эффектов локального поля в композитных средах.

Опираясь на экспериментально изученные линейные оптические свойства анизотропных слоев окисленного пористого кремния, выполнен детальный теоретический анализ процесса генерации третьей гармоники в этих слоях, который сопоставлен с результатами экспериментов. Исходя из предположения о центросимметричности окисленного пористого кремния, на основании решения укороченного уравнения для процесса генерации третьей гармоники получены выражения для ориентационных зависимостей третьей гармоники, учитывающие фазовую расстройку. Эти выражения находятся в хорошем согласии с данными эксперимента при использовании эффективной кубической восприимчивости окисленного пористого кремния, рассчитанной согласно обобщенной модели Бруггемана в приближении эффективной среды (см. рис.1).

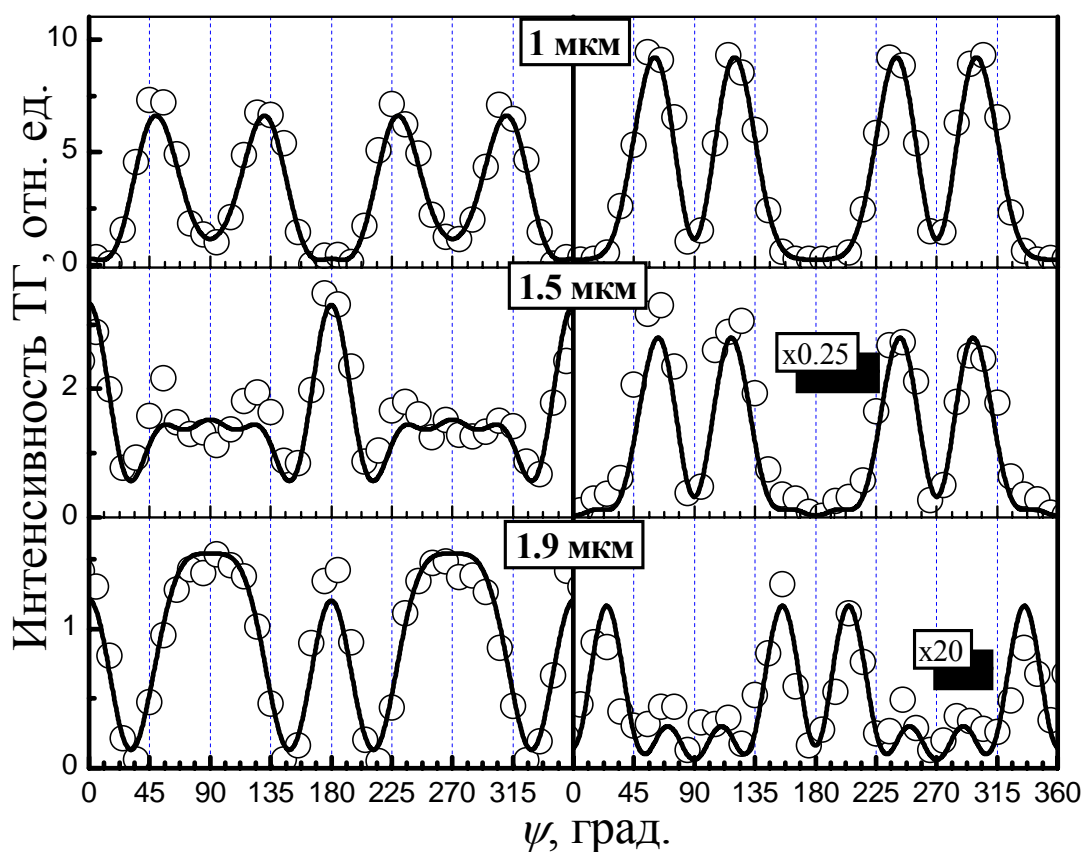
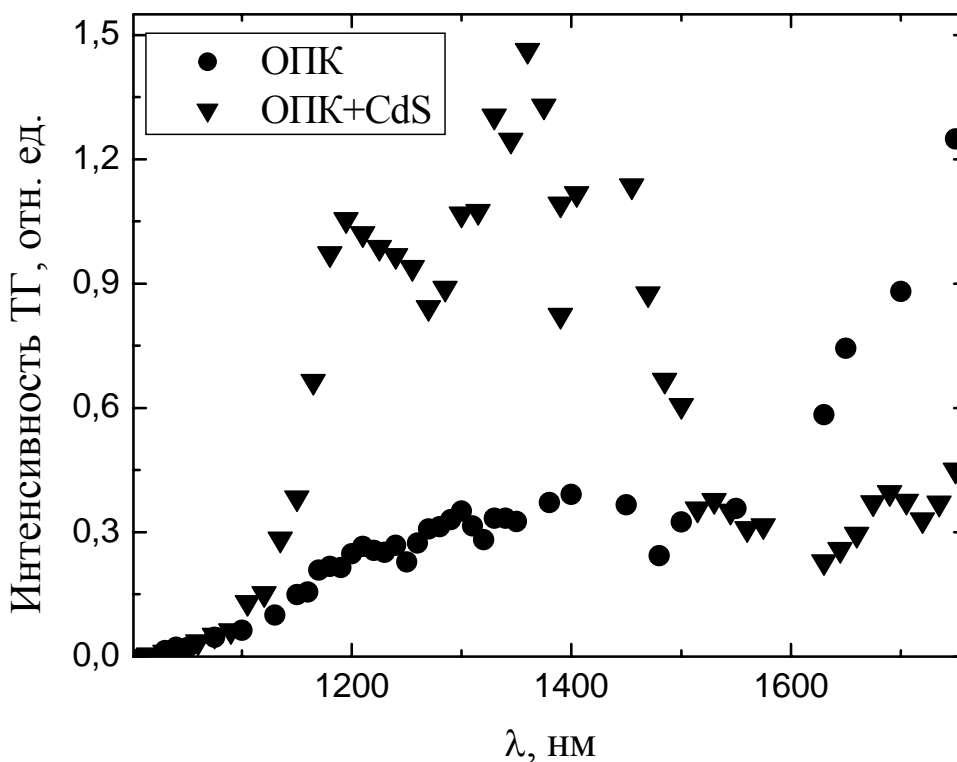


Рис. 1 Ориентационные зависимости третьей гармоники в окисленном пористом кремнии (геометрия на пропускание) для различных длин волн излучения накачки с поляризацией параллельной (левый ряд) и перпендикулярной (правый ряд) поляризации гармоники. Линии соответствуют результатам расчетов с использованием величин  $\chi^{(3)eff}$ , рассчитанных в рамках модели эффективной среды.

Показана возможность синхронной генерации третьей гармоники в слоях окисленного пористого кремния, что подтверждается соответствующими расчетами, основанными на данных линейно-оптических измерений и видом ориентационных зависимостей третьей гармоники. Прозрачность окисленного пористого кремния и химическая стабильность его внутренней поверхности делают его идеальным кандидатом для использования в качестве матрицы для заполнения светоизлучающими и нелинейно-оптическими материалами, что в совокупности с его достаточно высокой анизотропией, открывает широкие

возможности для фазово-согласованного преобразования оптических частот, оптического переключения и создания компактных элементов лазеров.

Получены зависимости интенсивности третьей гармоники от длины волны основного излучения в слоях пористого оксида алюминия и окисленного пористого кремния до и после заполнения CdS. Обнаружен сильный рост интенсивности третьей гармоники для пористого оксида алюминия и окисленного пористого кремния с CdS по сравнению с исходными матрицами в спектральном диапазоне 1,2-1,5 мкм, который соответствует краям межзонного поглощения для нанокристаллов CdS (см. рис. 2).

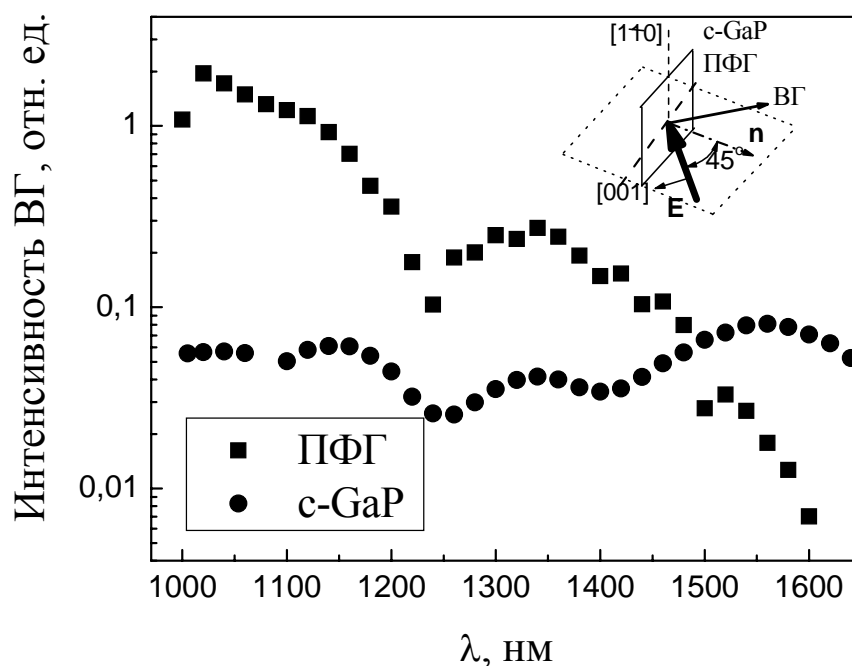


**Рис. 2** Зависимость интенсивности третьей гармоники от длины волны излучения накачки для анизотропного окисленного пористого кремния до и после осаждения CdS.

Указанный рост связывается с резонансным трехфотонным возбуждением электронов из валентной зоны наночастиц CdS в зону проводимости. Ширина

резонансной линии в спектре третьей гармоники позволяет судить о разбросе наночастиц CdS по размерам, что может быть использовано для диагностики качества осаждения CdS в пористую матрицу. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют возможность использования слоев пористого оксида алюминия и окисленного пористого кремния в качестве анизотропной матрицы для заполнения веществами с высокими нелинейными восприимчивостями с целью увеличения нелинейно оптического отклика.

Согласно экспериментам по генерации второй гармоники и комбинационному рассеянию света в рассеивающих слоях пористого фосфида галлия установлено, что формирование наноструктур, размеры которых сравнимы с длиной волны возбуждающего излучения, увеличивает эффективность преобразования более, чем на порядок по сравнению с кристаллическим фосфидом галлия (см.рис. 3).



**Рис. 3** Зависимость интенсивностей второй гармоники при отражении от кристаллического и пористого GaP от длины волны излучения накачки.

Излучение на частоте второй гармоники при этом оказывается полностью деполаризованным. Рост интенсивности второй гармоники, генерируемой при рассеянии на макропористом фосфиде галлия, существенным образом зависит от длины волны излучения накачки, причем с уменьшением длины волны накачки происходит увеличение соотношения интенсивностей второй гармоники для макропористого и кристаллического GaP (см. рис. 3). Одновременный рост времени жизни фотонов излучения на основной частоте и эффективности генерации второй гармоники, а также комбинационного рассеяния света, является экспериментальным подтверждением сильного влияния эффектов локализации света на эффективность этих процессов в исследуемых слоях пористого GaP в результате локального увеличения полей и времени взаимодействия излучения с веществом. Полученные экспериментальные результаты указывают на возможность создания эффективных преобразователей частоты и визуализаторов инфракрасного излучения на основе слоев пористого GaP.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

На основе комплексного исследования различных пористых полупроводников и диэлектриков, в которых расстояния между порами и их диаметр меняются от единиц до сотен нанометров, были установлены основные закономерности в проявлении эффектов локального поля на их линейные и нелинейные оптические свойства. Получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально исследована зависимость величины двулучепреломления от морфологии и структурных параметров пористых сред. Показана возможность создания на основе однородных изотропных полупроводников и диэлектриков прозрачных пористых сред со значительным двулучепреломлением, обусловленным анизотропией формы.



2. В приближении модели эффективной среды на основе экспериментально измеренных дисперсионных зависимостей показателей преломления окисленного пористого кремния были получены соотношения между элементами тензора эффективной кубической восприимчивости  $\chi^{(3)}(3\omega; \omega, \omega, \omega)$  этого материала. Продемонстрировано хорошее согласие ориентационных зависимостей третьей гармоники, рассчитанных с использованием этих величин, с результатами экспериментов.
3. С помощью перестраиваемой по длине волны лазерной системы на основе параметрического генератора света реализован режим синхронной генерации третьей гармоники из объема пленок окисленного пористого кремния с сильным двулучепреломлением формы. Наличие синхронной генерации подтверждается резким увеличением интенсивности ТГ при накачке, соответствующей нулевой фазовой расстройке для процесса генерации ТГ, и видом ориентационных зависимостей ТГ, в соответствии с расчетами, основанными на данных линейно-оптических измерений.
4. Обнаружен сильный рост ТГ для пористого оксида алюминия и окисленного пористого кремния с внедренным в поры CdS по сравнению с исходными образцами в спектральном диапазоне 1,2-1,5 мкм, который соответствует краям межзонного поглощения для нанокристаллов CdS. Указанный рост связывается с резонансным трехфотонным возбуждением из валентной зоны нанокристаллов CdS в зону проводимости.
5. Экспериментально обнаружено значительное уменьшение длины свободного пробега фотонов в сильно рассеивающих слоях пористого GaP с ростом пористости слоев, обусловленное эффектами локализации света, и приводящее к росту более чем на порядок эффективностей генерации второй гармоники и комбинационного рассеяния света.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.А. Мельников, Л.А. Головань, В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров, С.А. Гаврилов, Д.А. Кравченко, Ю.Н. Пархоменко, Е.А. Скрылева *Оптическая анизотропия и фотонная запрещенная зона в слоях пористого оксида алюминия* // Вестник МГУ, Сер 3. Физика. Астрономия, т. 4, с. 43-47 (2003).
2. Л.А. Головань, В.А. Мельников, С.О. Коноров, А.Б. Федотов, С.А. Гаврилов, А.М. Желтиков, П.К. Кашкаров, В.Ю. Тимошенко, Г.И. Петров, Л. Ли, В.В. Яковлев *Эффективная генерация второй гармоники при рассеянии в пористом фосфиде галлия* // Письма в ЖЭТФ, т. 78, вып. 4, с. 229-233 (2003).
3. V.A. Mel'nikov, L.A. Golovan', V.Yu. Timoshenko, A.M. Zheltikov, D.A. Muzychenko, E.V. Ukraintsev, T.V. Laptinskaya, and P.K. Kashkarov *Optical Anisotropy of Strongly Photonic Porous Gallium Phosphide* // Laser Physics, v. 14, No. 5, pp. 660- 663 (2004).
4. V.A. Mel'nikov, L.A. Golovan, S.O. Konorov, D.A. Muzychenko, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, V.Yu. Timoshenko, and P.K. Kashkarov *Second-harmonic generation in strongly scattering porous gallium phosphide* // Appl. Phys. B, v. 79, No. 2, pp. 225–228 (2004).
5. 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, т. 47, вып. 1, с. 153-159 (2005).
6. S.A. Gavrilov, D.A. Kravtchenko, A. Zheleznyakova, V.Y. Timoshenko, P.K. Kashkarov, V. Melnikov, G. Zaitsev, and L.A. Golovan *Porous anodic alumina for photonics and optoelectronics* // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., v. 5401, pp. 235-240 (2004).

7. L.A. Golovan', G.I. Petrov, S.A. Gavrilov, V.A. Mel'nikov, L.J. Li, S.O. Konorov, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, P.K. Kashkarov, V.Y. Timoshenko, and V.V. Yakovlev *Efficient nonlinear optical conversion in porous GaP: the effect of light localization* // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., v. **5360**, pp. 333-339 (2004).
8. V.A. Mel'nikov, G.M. Zaitsev, L.A. Golovan, V.Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov, S.A. Gavrilov, D.A. Kravchenko, Yu.N. Porhomenko, E.A. Skreleva *Form birefringence and photonic band gap in porous alumina films* // Physics, chemistry and application of nanostructures (Reviews and short notes to Nanomeeting 2003), Minsk, Belarus, pp. 253-255 (2003).
9. В.А. Мельников *Оптическая анизотропия и фотонная запрещенная зона в слоях пористого оксида алюминия* // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов-2003” секция “Физика” (сб. тезисов), с. 259-261, Москва (2003).
10. В.А. Мельников, Д.А. Иванов *Оптическая анизотропия в слоях пористого оксида кремния* // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов-2003” секция “Физика” (сб. тезисов), с. 273-274, Москва (2003).
11. L.A. Golovan, V.A Mel'nikov., P. K. Kashkarov, V.Yu. Timoshenko, A.M. Zheltikov, S.A. Gavrilov, G.I. Petrov, L. Li, and V.V. Yakovlev *Optical harmonic generation in macroporous gallium phosphide: Anderson localization?* // Book of abstracts of the 12th International Laser Physics Workshop “LPHYS'03”, Hamburg, Germany, pp. 293-294 (2003).
12. L.A. Golovan, V.A Mel'nikov., S.O. Konorov, A.B. Fedotov, S.A. Gavrilov, A.M. Zheltikov, P.K. Kashkarov, V.Yu. Timoshenko, G.I. Petrov, L. Li, V.V. Yakovlev *Porous gallium phosphide: challenging material for nonlinear applications* // In book: Abstracts of 4-th International Conference Porous Semiconductors – science and technology, Cullera-Valencia, Spain, pp. 88-89 (2004).
13. V.Yu. Timoshenko, L.A. Golovan, S.V. Zaboltnov, V.A Melnikov, A.M. Zheltikov, and P.K. Kashkarov *Enhanced nonlinear-optical interactions in nanostructured semiconductors* // Book of the abstracts of ALT 04 Conference “Advanced Laser Technologies”, Rome, Italy, pp. 71 (2004).

14. L.A. Golovan, D.I. Ivanov, V.A Mel'nikov., G.I. Petrov, P. K. Kashkarov, V.Yu. Timoshenko, A.M. Zheltikov, and V.V. Yakovlev *Linear and nonlinear form anisotropy in oxidized porous silicon* // Proceedings of the 10th conference on complex media and metamaterials Bianisotropics 2004, Ghent, Belgium, pp. 82-85 (2004).
15. P.K. Kashkarov, L.A. Golovan, V.A Melnikov, A.M. Zheltikov, and V.Yu. Timoshenko *Light localization phenomenon and nonlinear optical wave interactions in porous gallium phosphide* // In book of abstracts of 2nd international conference on materials science and condensed matter physics, Chisinau, Moldova, pp. 219 (2004).
16. П.К. Кашкаров, Л.А. Головань, С.В. Заботнов, В.А. Мельников, С.О. Коноров, А.Б. Федотов, В.Ю. Тимошенко, А.М. Желтиков *Увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в наноструктурированных полупроводниках и диэлектриках* // материалы совещания Нанофотоника, Нижний Новгород, с. 67-69 (2004).
17. Д.А. Иванов, В.А. Мельников, Л.А. Головань, В.Ю. Тимошенко, А.Е. Лукьянов, В.И. Петров, М.А. Степович, П.К. Кашкаров *Получение и электронномикроскопическое исследование окисленных пленок пористого кремния* // тезисы докладов XX российской конференции по электронной микроскопии ЭМ'2004, Черниголовка, с. 33 (2004).
18. V.A Melnikov, D.I. Ivanov., L.A. Golovan, S.A. Gavrillov, D.A. Kravchenko, I.V. Telegina, S.O. Konorov, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, P.K. Kashkarov, V.Yu. Timoshenko *Variable optical anisotropy in oxidized amorphous porous silicon layers* // In book of abstracts of X International Conference "Physics of Dielectrics" (Dielectrics - 2004), Saint-Petersburg, Russia, pp. 399-401 (2004).
19. L.A. Golovan, V.A. Melnikov, S.V. Zabotnov, S.O. Konorov, K.P. Bestem'yanov, A.V. Zoteyev, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, V.M. Gordienko, V.Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov *Light localization phenomena and enhancement of nonlinear-optical interactions in porous GaP* // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO/LAT 2005), St. Petersburg, Russia, ICONO/LAT Technical Digest on CD-ROM, presentation number IThK1 (2005).