

На правах рукописи



Савченко Григорий Михайлович

Особенности распространения и преобразования электромагнитных волн в полупроводниковых наноструктурах с оптическими неоднородностями

Специальность 01.04.10 — физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре оптоэлектроники и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук в лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Соколовский Григорий Семенович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук Цырлин Георгий Эрнстович, федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук», заведующий лабораторией

Кандидат физико-математических наук Алексеев Алексей Николаевич, Закрытое Акционерное Общество «Научное и техническое оборудование», генеральный директор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится “28” сентября 2017 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан “06” июля 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04
доктор физико-математических наук



В. А. Мошников

I. Общая характеристика работы

Актуальность исследования. На сегодняшний день состояние полупроводниковой технологии позволяет использовать оптические свойства полупроводников для создания широкого класса устройств: полупроводниковых излучателей и приемников оптического излучения, полупроводниковых волноведущих структур и полупроводниковых преобразователей оптического излучения. Такие устройства могут быть использованы в сложных электронных системах. В последние годы возрастает интерес к исследованиям в области оптики полупроводников в связи с перспективами реализации новой отрасли промышленности – полупроводниковой фотоники, которая сможет расширить возможности современной электроники за пределы ее естественных ограничений, связанных, прежде всего, с большими потерями мощности при рассеивании процессе переключения элементов интегральных схем.

В этой связи проводятся активные теоретические и экспериментальные исследования особенностей распространения и преобразования электромагнитного излучения в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Для современной электроники актуальной областью исследований является мезоскопика – то есть совокупность явлений, лежащих между традиционными диффузионным и баллистическим транспортными режимами. Аналогичные эффекты существуют и для фотонного транспорта. Как известно, при распространении электромагнитных волн в веществе существует взаимодействие между квантами света и элементарными возбуждениями кристалла (прежде всего – экситонами и фононами), учет которого приводит к возбуждениям нового типа, называемым поляритонами [1]. В результате такого взаимодействия распространение света по кристаллу уже нельзя рассматривать как баллистическое, ведь «механическая» подсистема в таком коллективном возбуждении (экситонная или фононная часть) подвержена рассеянию на примесях и дефектах. Однако по причине слабого взаимодействия фотонов с рассеивателями такой режим распространения света также не может быть отнесен к диффузионному. Таким образом, проблема изучения мезоскопического оптического транспорта является на сегодняшний день одной из важнейших задач фотоники.

Долгое время считалось, что экситонное поглощение света не сопровождается изменением проводимости образца, так как экситон является электрически нейтральной частицей. Однако известны работы, в которых наблюдалась экситонная фотопроводимость [2], причем как положительная, так и отрицательная. В этих работах отсутствует аналитическое описание спектральных зависимостей фотопроводимости, надлежащим образом учитывающее спектр поглощения вблизи экситонного резонанса. Такое описание дано в диссертационной работе.

Интенсивное развитие эпитаксиальных технологий за последние десятилетия привело к появлению принципиально нового класса материалов – так называемых метаматериалов и фотонных кристаллов, представляющих собой материалы с искусственно внедренными неоднородностями, наличие которых обуславливает особые оптические свойства таких материалов [3]. Огромное внимание по всему миру уделяется перспективам управления дисперсией света за счет использования фотонных кристаллов.

В связи с достигнутым уровнем развития полупроводниковых лазерных излучателей в ближней ИК-области спектра одним из перспективных направлений в области полупроводниковых лазеров является удвоение частоты излучения за счет генерации второй оптической гармоники. Это позволило бы получить лазерные источники, перестраиваемые во всем видимом диапазоне длин волн, которые могут быть созданы полностью по полупроводниковой технологии. Для эффективного преобразования излучения во вторую гармонику необходимо обеспечить синхронизм фаз первой и второй гармоник, недостижимый при использовании однородных полупроводниковых материалов из-за наличия материальной дисперсии. На сегодняшний день наиболее распространенным методом повышения эффективности преобразования является периодическая поляризация сегнетоэлектрического нелинейного кристалла с периодом, равным длине когерентности первой и второй гармоник – так называемый квази-синхронизм фаз. Однако в мире ведутся работы по подавлению дисперсии за счет использования фотонных кристаллов [4].

Для теоретического описания фотонных кристаллов часто применяется разложение по плоским волнам. Но этот метод эффективен лишь в случаях, когда характерные размеры оптических неоднородностей фотонного кристалла велики по сравнению с длиной волны света. В противном он приводит к значительным математическим трудностям, связанным с необходимостью учета большого числа гармоник. Другой распространенный метод описания фотонных кристаллов – метод матриц переноса – позволяет довольно легко получать спектры отражения и пропускания фотонного кристалла, однако не дает в явном виде информацию о дисперсии собственных мод, вследствие чего получение дисперсионного уравнения для фотонного кристалла с наперед заданными параметрами требует дополнительных усилий.

Цель диссертационного исследования заключалась в устранении существующих пробелов в теории распространения света в кристаллах при наличии примесных центров с учетом влияния температуры и магнитного поля, а также в изучении возможности создания фотонного кристалла и фотонно-кристаллического волновода для эффективной генерации второй гармоники.

Достижение этой цели сводится к решению следующих **задач**:

1. Теоретический анализ влияния упругого рассеяния экситонного поляритона в тонких образцах эпитаксиального GaAs на примесях и установление критерия существования экситонных поляритонов

при наличии примесных центров. Оценка фактора диссипативного затухания в GaAs из экспериментальных данных и сравнение его значения с критическим, при котором возбуждение экситонных поляритонов становится невозможным.

2. Исследование влияния температуры и магнитного поля на пространственную дисперсию и распространение экситонных поляритонов в GaAs через изменение концентрации рассеивающих центров.
3. Теоретический анализ спектров фотопроводимости кристаллов GaAs в области экситонного резонанса с учетом поверхностной рекомбинации и взаимодействия экситонных состояний в области непрерывного спектра с электронными состояниями в запрещенной зоне.
4. Расчет собственных оптических мод в бесконечном одномерном фотонном кристалле и определение параметров фотонного кристалла, обеспечивающих истинный синхронизм фаз первой и второй гармоники за счет подавления материальной дисперсии.
5. Расчет собственных мод и дисперсии групповой скорости фундаментального излучения и второй гармоники в плоском волноводе, сердцевинной которого является ФК и определение параметров волновода, обеспечивающих истинный синхронизм фаз фундаментального излучения и второй гармоники за счет подавления материальной и волноводной дисперсии.

Предмет исследования. Предметом исследования являются экситоны и экситонные поляритоны в объемном GaAs; коэффициент поглощения света кристаллами GaAs; собственные оптические моды в бесконечномерном фотонном кристалле и в планарном волноводе на его основе.

Объект исследования. Объектом исследования являются объемные кристаллы чистого эпитаксиального GaAs n-типа с концентрацией электронов до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а также ФК, представляющий собой набор чередующихся слоев собственного AlN и AlN, легированного до поверхностной концентрации $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; волновод с обкладками из твердого раствора $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ и сердцевинной, представляющей собой вышеописанный фотонный кристалл с различным числом пар чередующихся слоев.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования. Для описания экситонных поляритонов при решении задачи 1 был выбран метод канонического преобразования Боголюбова-Тябликова; задача 2 решалась стандартными методами статистики электронов и дырок в полупроводниках; задача 3 предполагает решение уравнения непрерывности в предположении однородной генерации носителей при освещении образца при наличии центров поверхностной рекомбинации и с учетом особенностей поглощения света в близи экситонного резонанса; для решения задач 4-5 использовалась теорема Блоха, дающая вид решения волнового уравне-

ния в среде с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью; при решении задачи 5 из уравнений Максвелла выведено дисперсионное уравнение для света в многослойной одномерной структуре.

Решение задач 1-3 предполагает сопоставление получаемых результатов с данными экспериментов, выполненных в лабораториях ФТИ им. А.Ф. Иоффе. При решении задач 4-5 использовались данные различных экспериментов по измерению дисперсии показателя преломления в AlN.

Научная новизна результатов исследования.

1. Впервые показано, что процессы упругого рассеяния экситонного поляритона могут приводить к потере пространственной дисперсии и к невозможности распространения поляритона даже в условиях, когда истинная диссипация за счет неупругого рассеяния подавлена.
2. Впервые проведен теоретический расчет вероятности упругого рассеяния экситонного поляритона в кристаллах GaAs на примесях.
3. Дано теоретическое объяснение падающей части зависимости интегрального поглощения GaAs от магнитного поля.
4. Впервые получены аналитические выражения для сигнала фотопроводимости GaAs в области экситонного резонанса, адекватно учитывающие экситонный механизм поглощения.
5. Впервые предложена полупроводниковая структура, обеспечивающая истинный синхронизм фаз при генерации второй гармоники в видимом диапазоне длин волн.
6. Впервые предложена полупроводниковая структура, обеспечивающая истинный синхронизм фаз при генерации второй гармоники в видимом диапазоне длин волн и обладающая при этом волноведущими свойствами.
7. Предложено два метода расчета собственных мод в фотонно-кристаллических волноводах – точный и приближенный, дающие хорошо совпадающие результаты.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Построена теория упругого рассеяния экситонного поляритона на примесях.
2. Построена теория спектров фотопроводимости кристаллов GaAs, в которой учитывается аналитическая форма экситонного края поглощения полупроводниковых кристаллов и транспорт фотогенерированных носителей заряда с учетом конечной толщины кристалла и наличия центров поверхностной рекомбинации.
3. Выполненный теоретический анализ экспериментальных данных по поглощению света в полупроводниках позволяет оценить концентрацию носителей заряда даже для сверхчистых полупроводников, являющихся нечувствительными к стандартным методам определения концентрации – измерениям проводимости или эффекта Холла.

4. Проведенный теоретический анализ экспериментально измеренных спектров фотопроводимости вблизи экситонного резонанса позволяет получить информацию о состоянии полупроводника и его поверхности (диффузионная длина, время жизни носителей, полуширина линии экситонного поглощения, скорость поверхностной рекомбинации, плотность и глубина залегания поверхностных состояний).
5. Предложено принципиально новое полностью полупроводниковое устройство, позволяющее осуществлять эффективную генерацию второй гармоники в видимом диапазоне длин волн, которое может быть создано эпитаксиальными методами.
6. Предложены два способа расчета собственных мод в фотонно-кристаллических волноводах, что позволяет управлять дисперсией света в таких волноводах и решать таким образом широкий круг практических задач, в которых эффективность решения ограничивается наличием материальной дисперсии показателя преломления.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Конференция по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада Физика.СПб, Санкт-Петербург (2011), Российская молодежная конференция по физике и астрономии Физика.СПб, Санкт-Петербург (2014), Международная Зимняя Школа по физике полупроводников, Зеленогорск (2014), Formation doctorale: Son et lumiere - phononique et photonique a l'échelle nanometrique, Les Houches, France (2015), 18th International Conference on Laser Optics, St.-Petersburg (2016), семинарах ФТИ, ЛЭТИ и СПбГУ

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 работах, из которых 6 входят в список изданий, рекомендованных ВАК РФ и международные системы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, содержащего 71 источник. Объем работы составляет 110 страниц, в том числе 26 рисунков.

Личный вклад соискателя. Все теоретические расчеты, моделирование и анализ экспериментальных данных.

II. Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Наличие центров упругого рассеяния может приводить к потере средней пространственной дисперсии и к невозможности возбуждения экситонного поляритона даже в условиях, когда истинная диссипация подавлена.
2. Уменьшение интегрального поглощения света в GaAs с ростом магнитного поля при малых значениях магнитной индукции связано с уменьшением числа заряженных рассеивающих центров за счет магнитного вымораживания примесей.

3. Поглощение света вблизи экситонного резонанса с образованием свободных экситонов оказывает существенное влияние на спектр фотопроводимости образца
4. Использование фотонного кристалла из чередующихся слоев собственного полупроводника и полупроводника, легированного до металлической проводимости, позволяет подавить материальную дисперсию показателя преломления и добиться истинного синхронизма фаз при генерации второй гармоники в широком диапазоне длин волн.

III. Краткое содержание работы

Во введении раскрыта актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы и состоит из трех разделов. В первом разделе рассматривается распространение электромагнитных волн в кристаллах GaAs. Собственным состоянием электромагнитного поля в таких кристаллах является экситонный поляритон – возбуждение кристалла, обусловленное взаимодействием квантов электромагнитного поля с механической подсистемой кристалла – экситонами. Приведены критерии существования экситонного поляритона, обсуждается их связь с пространственной дисперсией среды [5]. Во втором разделе рассматривается влияние экситонов и поляритонов на поглощение света.

Третий раздел посвящен фотопроводимости полупроводников с ярко выраженными экситонными эффектами. Приводятся основные положения стандартной теории фотопроводимости и обсуждаются механизмы формирования экситонов при нерезонансном оптическом возбуждении.

Четвертый раздел первой главы содержит общие сведения о генерации второй гармоники. Рассмотрены критерии эффективности генерации второй гармоники – длина когерентности и дисперсия групповой скорости. Перечислены основные методы, с помощью которых сегодня достигается квазисинхронизм фаз.

Во второй главе изучается упругое рассеяние экситонного поляритона на заряженных примесях, в том числе при наличии внешнего магнитного поля. Проведен теоретический анализ экспериментальной зависимости интегрального коэффициента поглощения от амплитуды магнитного поля.

В первом разделе дается введение в проблему и дается план решения задачи. Показано, что упругое рассеяние поляритонов влияет на пространственную дисперсию среды и тем самым – на поглощение света, в гораздо

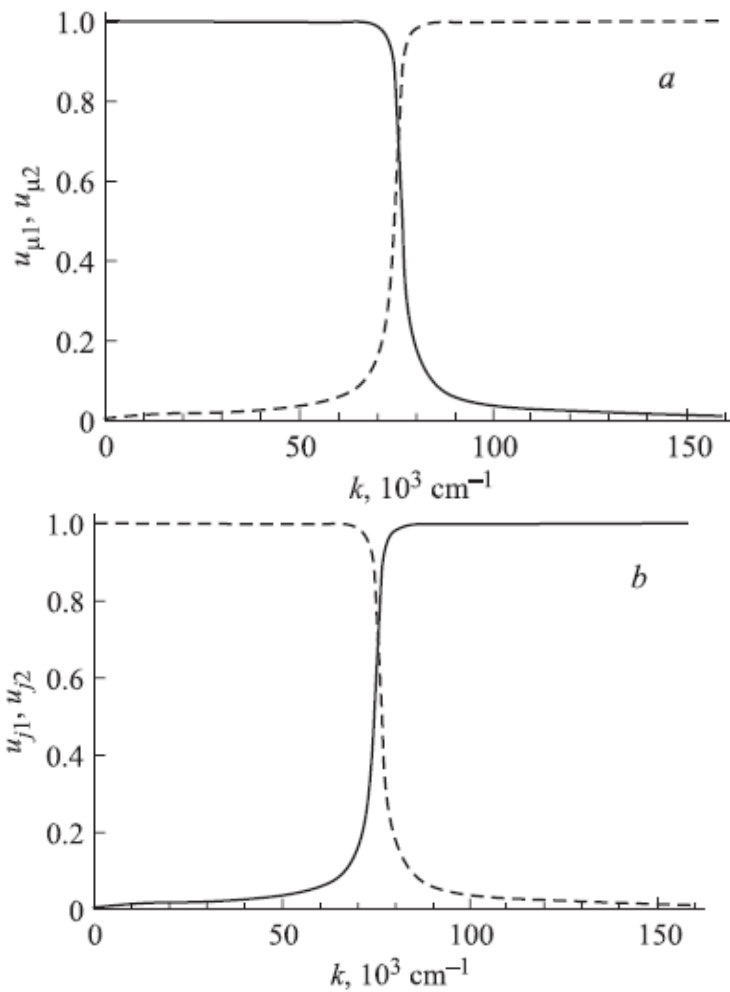


Рис.1. Вид функций, задающих удельный вес экситонов и фотонов в полярионе.

большой степени, чем это следует из литературы [6]. Так как фотоны непосредственно с примесями не взаимодействуют, а рассеянию подвержена только экситонная часть поляритона, для расчетов необходимо знать весовые части экситонов и фотонов в полной волновой функции поляритона. После их вычисления (см. рис.1) проводится расчет упругого рассеяния «голого» экситона на заряженной примеси с помощью теории возмущений первого порядка с кулоновским взаимодействием электрона и дырки с примесным центром. Затем произведена перенормировка результата

с учетом поляритонного эффекта, то есть, того обстоятельства, что с примесью взаимодействует лишь экситонная часть поляритона. Для оценки величин эффектов не принимался во внимание сложный характер валентной зоны.

Второй раздел содержит расчет упругого рассеяния экситонного поляритона на примесях. Для решения задачи разделения экситонной и фотонной частей в волновой функции поляритона выбран метод описания, основанный на диагонализации полного гамильтониана экситон-фотонного взаимодействия с помощью канонического преобразования Боголюбова-Тябликова.

Функции преобразования, и являются искомыми весовыми функциями экситонов и фотонов для каждой поляритонной ветви. В тексте диссертации приводится явный вид этих функций.

Для вычисления вероятности рассеяния экситона на примеси волновая функция экситона была выбрана в стандартном водородоподобном виде

$$\psi_n(\mathbf{k}, \mathbf{r}_e, \mathbf{r}_h) = e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}} \Phi_n(\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_h),$$

где $\Phi_1(\rho) = \sqrt{\frac{4}{a_B}} \exp\left(-\frac{\rho}{a_B}\right)$, $\mathbf{R} = \frac{\mathbf{r}_e m_e + \mathbf{r}_h m_h}{m_e + m_h}$. С помощью найденных функций $u_{ap}(\mathbf{k})$ и $v_{ap}(\mathbf{k})$ производится перенормировка результатов для «голового» экситона.

Результат расчета фактора диссипативного затухания от волнового вектора приведен на рис.2. Третий раздел посвящен влиянию магнитного поля на поглощение света в кристаллах. В четвертом разделе даются выводы по результатам расчета. При температуре 1.7 К фактор диссипативного затухания оказывается ниже критического значения, измеренного экспериментально для GaAs, таким образом, условие существования экситонного поляритона выполняется. Однако повышение температуры вызовет ионизацию донорных примесей, что приведет к увеличению числа рассеивателей на несколько порядков и соответствующему росту фактора диссипативного затухания.

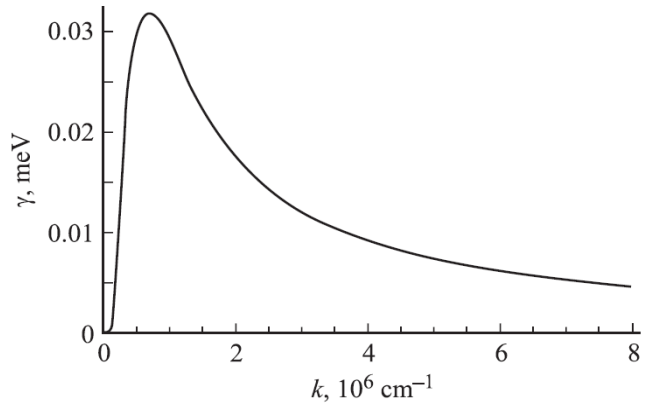


Рис.2. Зависимость фактора диссипативного затухания от волнового вектора

Таким образом, даже при отсутствии истинной диссипации (неупругого взаимодействия с фононами) большое число упругих центров рассеяния способно привести к потере пространственной дисперсии и невозможности распространения экситонного поляритона.

Третья глава диссертационной работы посвящена экситонной фотопроводимости кристаллов GaAs. В первом разделе приведены экспериментальные спектры фотопроводимости кристаллов GaAs 20-микронной толщины, полученные при температурах 1.7К (см. рис.3) и 77К. Основной целью этой главы является теоретический анализ экспериментальных данных, подразумевающий получение аналитических выражений зависимости избыточной концентрации электронов от энергии кванта излучения, извлечение информации о процессах, отвечающих за формирование этой за-

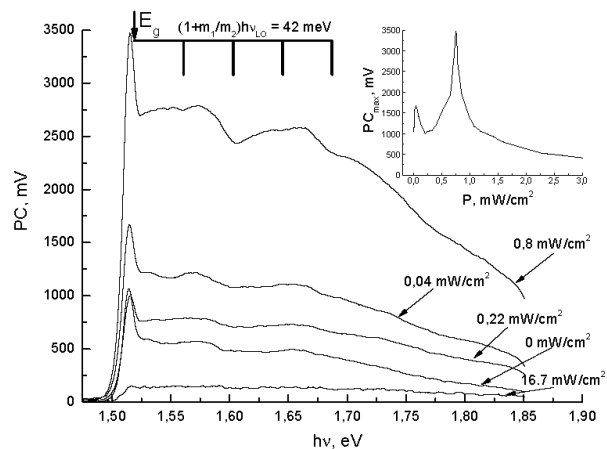


Рис.3. Спектральная зависимость фотопроводимости GaAs при T=1.7К (экспериментальные данные, см. [1]). На вставке – зависимость фотопроводимости от плотности мощности накачки

висимости и разработка методов характеристики полупроводника и состояния его поверхности, исходящих из фотоэлектрических измерений.

Для этого приводится аналитическое выражение для коэффициента поглощения в области экситонного резонанса с учетом кулоновского взаимодействия экситона с электронами зоны проводимости, а также возможного хвоста плотности состояний зоны проводимости. Далее произведен расчет спектров фотопроводимости с учетом особенностей коэффициента поглощения и наличия центров поверхностной рекомбинации.

Во втором разделе приводится теоретический анализ полученных результатов (см. рис.4). Показано, что при энергии возбуждения, меньшей ширины запрещенной зоны, спектр фотопроводимости определяется элементарными возбуждениями экситонного типа, а при больших энергиях возбуждения – поверхностными состояниями, а также процессами, связанными с испусканием оптических фононов. Обнаружено, что в изучаемых образцах образование экситонов непосредственно при поглощении света может иметь вероятность, сопоставимую с вероятностью формирования экситонов из термализованного электронно-дырочного газа. Наблюдаемые зависимости сигнала фотопроводимости от плотности мощности дополнительной лазерной подсветки с энергией кванта, лежащей в области континуума электронных состояний, могут быть исследованы как отражение спектра поверхностных состояний GaAs. Для этого необходимо предположить связь наблюдаемого поведения низкотемпературной фотопроводимости с заполнением поверхностных состояний, что приводит сначала к росту сигнала фотопроводимости, связанному увеличением приповерхностного изгиба зон, и затем к падению, объясняемому в рамках теории барьерной фотопроводимости. Генерация неравновесных электронов приводит к уменьшению приповерхностного изгиба зон и ОПЗ вблизи поверхности. При этом ширина проводящего канала увеличивается, и модулированный сигнал фотопроводимости оказывается пропорциональным дифференциальной фоточувствительности образца, что приводит в конечном итоге к падению сигнала фотопроводимости при больших мощностях накачки. В третьем разделе сформулированы выводы по главе 3.

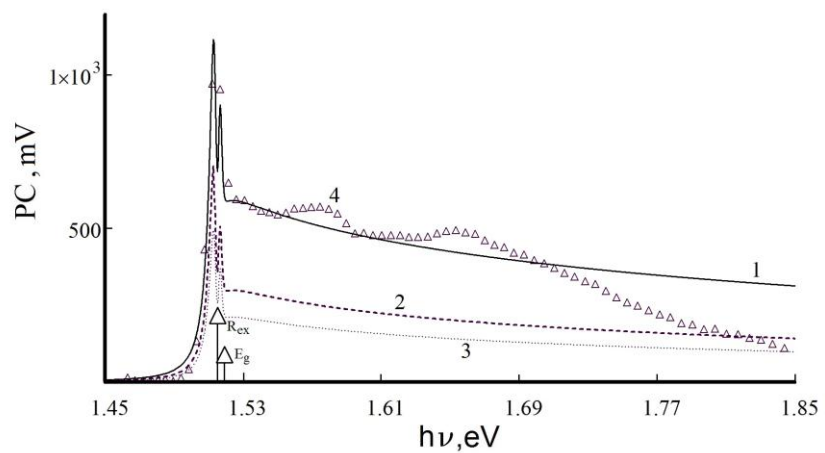


Рис.4. Сопоставление теоретических (1-3) и экспериментального (4) спектров ФП (PC) GaAs при 1.7К. Безразмерная скорость поверхностной рекомбинации: 1 – 25, 2 – 100, 3 – 300.

В четвертой главе рассматривается бесконечный одномерный фотонный кристалл, представляющий собой набор чередующихся слоев собственного полупроводника и полупроводника, легированного до поверхностной концентрации $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, при которой диэлектрическая проницаемость становится отрицательной, что позволяет условно называть такие слои металлическими. Вид изучаемой структуры приведен на рис.5.

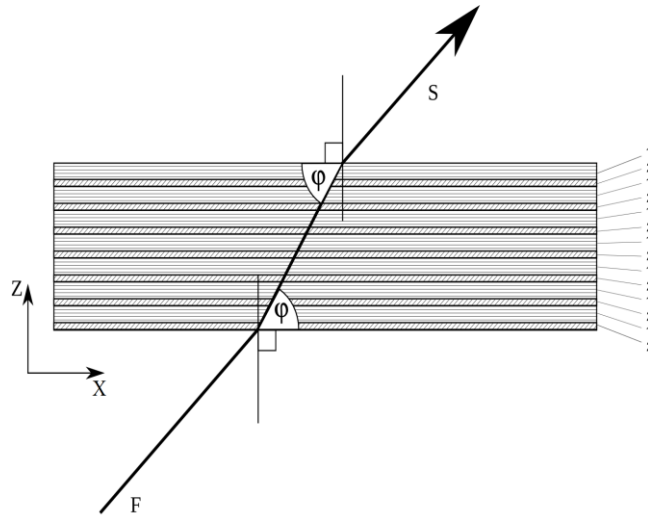


Рис.5. Схематическое изображение ФК для ГВГ

Предполагается, что за счет наличия металлических слоев можно компенсировать материальную дисперсию показателя преломления материала собственной проводимости и добиться истинного синхронизма фаз при генерации второй гармоники в видимом диапазоне длин волн (длина волны на удвоенной частоте принималась равной 550 нм). Цель четвертой главы – рассчитать собственные моды в таком фотонном кристалле и подтвердить сделанное предположение, попутно подобрав такие параметры фотонного кристалла (толщины слоев и их материал), при которых возможно достижение фазового синхронизма. Критерием фазового синхронизма является длина когерентности – расстояние, на котором разность фаз волн на основной и удвоенной частотах не превышает π . Если разность фаз становится больше π , эффективность преобразования света во вторую гармонику начинает падать из-за деструктивной интерференции с волной накачки. Длина когерентности может быть выражена через показатели преломления материала. В первом разделе четвертой главы ставится условие фазового синхронизма, согласно которому длина когерентности должна быть не ниже 1 см:

$$L = \frac{\lambda}{2(n_{2\omega} - n_{\omega})} \geq 10 \text{ мм} \quad (1)$$

В этом же разделе описываются трудности, связанные с вычислением собственных мод фотонного кристалла методом разложения по плоским волнам. В целях уменьшения поглощения волны при распространении по

структуре, имеющему место в металлических слоях, их толщина должна быть минимизирована. Но при толщине слоев порядка 1 нм длина волны света оказывается намного больше, что приводит к необходимости учета огромного числа членов ряда в разложении и соответствующим математическим трудностям.

Второй раздел посвящен решению поставленной задачи. Пространственное решение волнового уравнения ищется в виде

$$E(z) = U_k(z) \exp(ik_z z) + U_{-k}(z) \exp(-ik_z z)$$

где z – направление чередования слоев. Дисперсионное уравнение для волн имеет вид

$$P(\omega, q) = R(\omega, k_z) \quad (2)$$

$$P(\omega, q) = \frac{(\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega))k_0^2 - 2q^2}{2\kappa_1(\omega)\kappa_2(\omega)} [sh(a\kappa_1(\omega))sh(b\kappa_2(\omega)) + ch(a\kappa_1(\omega))ch(b\kappa_2(\omega))].$$

Здесь $R(\omega, k_z) = \cos k_z(a + b)$, $k_0 = \omega/c$, $\kappa_i(\omega) = \sqrt{q^2 - \varepsilon_i(\omega)k_0^2}$, q – волновой вектор в плоскости слоев, позволяющий формально ввести эффективный показатель преломления $n_{eff} = \lambda q(\lambda)/2\pi$.

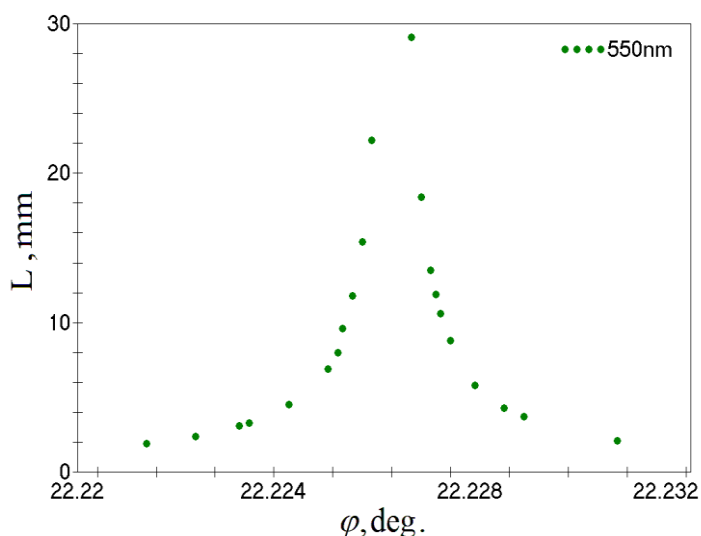


Рис.6. Зависимость длины когерентности от угла распространения

Решение уравнения (2) позволяет найти параметры фотонного кристалла, необходимые для выполнения условия (1). Результаты показывают, что в случае использования слоев из AlN и при толщине слоев собственной проводимости $a=474$ нм и толщине металлических слоев $b=2$ нм, длина когерентности может достигать нескольких сантиметров. Результат расчета длины когерентности от угла распространения показан на рис.6. При этом направление распространения волн в фотонном кристалле является управляемым параметром, позволяющим выполнять

перестройку по длине волны в широком диапазоне.

Пятая глава посвящена исследованию возможности эффективной генерации второй гармоники в плоском волноводе, состоящим из двух обкладок, между которыми расположен описанный в главе 4 фотонный кристалл с конечным числом пар чередующихся слоев. Схематическое изображение волновода показано на рис.7. В первом разделе производится постановка задачи. Второй раздел содержит описание приближенного метода расчета собственных мод такой структуры, сводящегося к согласованному решению

дисперсионного уравнения (2) и известного дисперсионного уравнения для плоского трехслойного волновода с однородным материалом сердцевины.

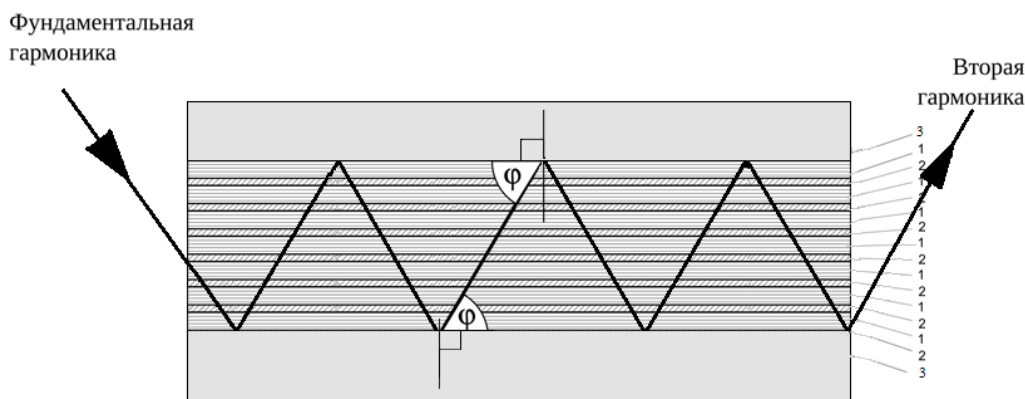


Рис.7. Схематическое изображение фотонно-кристаллического волновода для генерации вто-

При этом в качестве показателя преломления сердцевины берется действующий показатель преломления фотонного кристалла, выраженный через компоненты волнового вектора. Результаты показывают, что при надлежащем выборе параметров такого фотонно-кристаллического волновода длина когерентности по-прежнему может превышать несколько сантиметров. При этом структура обладает приемлемой чувствительностью к изменению как толщины слоев собственной проводимости, так и общей толщины волноводного слоя. Таким образом, управляя дисперсией фотонного кристалла, можно подавить не только материальную дисперсию показателя преломления, но и волноводную дисперсию. Однако волноводный эффект приводит к тому, что теперь угол распространения волн по структуре строго фиксирован, что сильно повышает ее чувствительность к изменению базовой длины волны. В третьем разделе предлагается точный метод расчета собственных мод описанного фотонно-кристаллического волновода. Дисперсионное уравнение получается из условий сшивки решений уравнения Гельмгольца и его производных на границах слоев. Для решения дисперсионного уравнения необходимо вычислить определитель порядка $s=4m+2$, где m – число периодов фотонного кристалла. Этот определитель представляет собой ленточный определитель с ненулевыми элементами, расположенными вдоль главной диагонали, который может быть вычислен с помощью рекуррентных соотношений, выражающих определитель порядка s через определители более низких порядков. После преобразований дисперсионное уравнение сводится к системе из нескольких трансцендентных уравнений, решаемых численными методами.

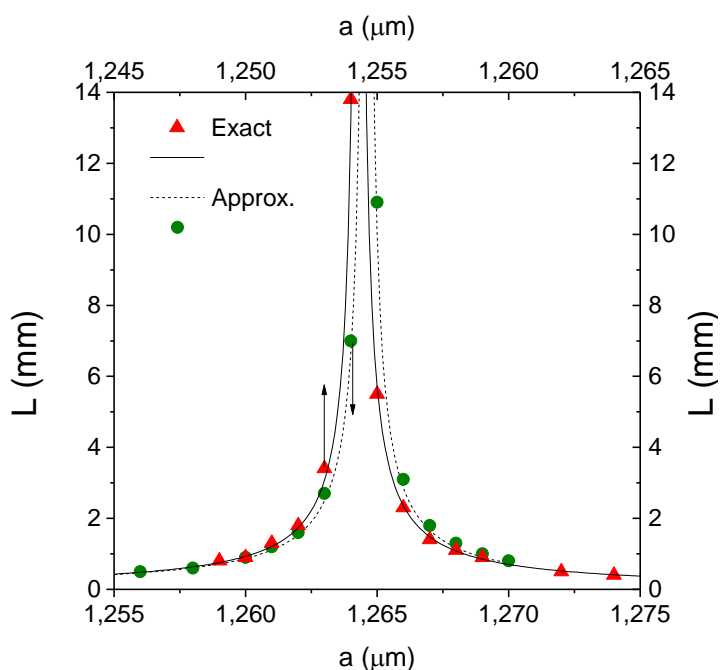


Рис. 8. Зависимость длины когерентности от толщины слоя собственной проводимости, полученная точным (Exact) и приближенным (Аппрох.) расчетами

В четвертом разделе приведены выводы по главе 5. Оказалось, что значения эффективных показателей преломления, полученные двумя предложенными методами, отличаются не более чем на 0.001, что является хорошим совпадением. Кроме того, рассчитанные двумя способами значения толщины слоев собственной проводимости, также с хорошей точностью совпадают, что видно из рис. 8. Вычислена величина дисперсии групповой скорости для описанной структуры. Она не превосходит $0.0004 \text{ пс}^2/\text{м}$, что на два порядка

ниже дисперсии групповой скорости в структурах, предлагаемых в литературе [4]. Зависимости длины когерентности и дисперсии групповой скорости от толщины слоя собственной проводимости приведены на рис. 9.

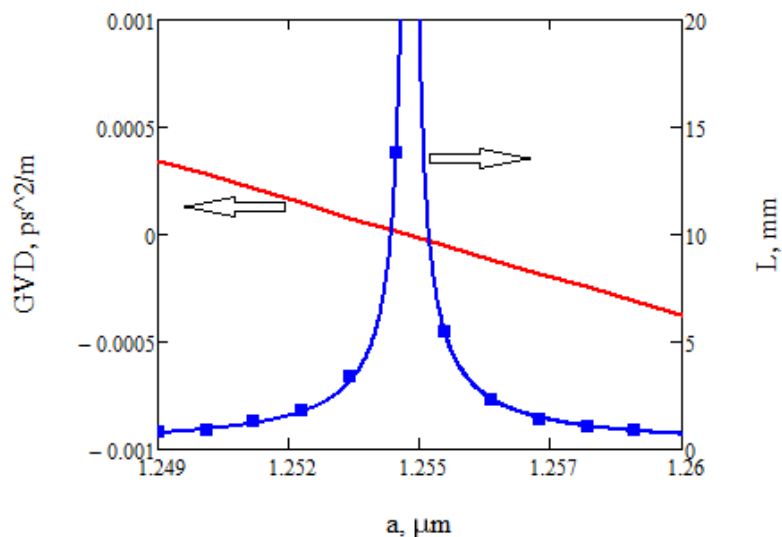


Рис. 9. Зависимость длины когерентности L и дисперсии групповой скорости GVD от толщины a слоя собственной проводимости.

В заключении диссертации приводятся основные результаты исследования, кратко перечисленные ниже.

IV. Результаты исследования

1. Разработана теория упругого рассеяния экситонного поляритона на заряженных примесных центрах.
2. Показано, что наличие центров упругого рассеяния может приводить к потере пространственной дисперсии и невозможности существования ЭП.
3. Показано, что интегральный коэффициент поглощения в кристаллах GaAs, помещенных во внешнее магнитное поле, убывает с ростом магнитного поля (при малых значениях магнитной индукции) вследствие магнитного вымораживания примесей, приводящего к уменьшению числа эффективных рассеивающих центров. По экспериментальным данным зависимости интегрального поглощения от магнитного поля можно оценить концентрацию носителей в труднодетектируемых сверхчистых полупроводниках.
4. Получены и проанализированы аналитические выражения для неравновесной концентрации фотогенерированных электронов в GaAs с учетом экситонного поглощения и наличия центров поверхностной рекомбинации.
5. В чистом эпитаксиальном GaAs спектральная зависимость фотопроводимости при низких энергиях возбуждения определяется возбуждением экситонов, а при высоких энергиях – процессами, связанными с испусканием оптических фононов, а также поверхностной рекомбинацией.
6. В GaAs при температуре 1.7K вероятность образования экситона при нерезонансном оптическом возбуждении по близнецовому механизму может быть сопоставима с вероятностью бимолекулярного формирования.
7. Немонотонная зависимость модулированного сигнала фотопроводимости GaAs от плотности мощности накачки с энергией кванта выше фундаментального края поглощения объясняется в рамках теории барьерной фотопроводимости, сопровождающейся захватом неравновесных носителей на поверхностные состояния. Это позволяет произвести оценку плотности и глубины залегания поверхностных состояний и анализа фотоэлектрических измерений.
8. Показано, что фотонный кристалл, состоящий из большого числа чередующихся слоев полупроводников собственной проводимости и сильнолегированного полупроводника, является средой, обеспечивающий истинный синхронизм фаз основной и второй гармоники оптического излучения. При этом управление углом распространения волн делает такой ФК перестраиваемым в широком диапазоне длин волн.

9. Разработано два метода расчета дисперсии показателя преломления в плоском волноводе, в сердцевину которого помещен фотонный кристалл.
10. Показано, что при правильном подборе параметров ФК можно реализовать устройство для эффективной генерации второй гармоники в видимом диапазоне длин волн.

V. Список работ, в которых опубликованы основные положения диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Сейсян Р.П. Диамагнитный экситон-поляритон в межзонной магнитооптике полупроводников [текст] / Сейсян Р.П., Савченко Г.М., Аверкиев Н.С. // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – В. 7. С. 896-900.
2. Аверкиев Н.С. «Экситонная» фотопроводимость кристаллов GaAs [текст] / Аверкиев Н.С., Зайцев Д.А., Савченко Г.М., Сейсян Р.П. // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48 – В. 10. С. 1311-1316.
3. Аверкиев Н.С. Упругое рассеяние экситонных поляритонов [текст] / Аверкиев Н.С., Зайцев Д.А., Савченко Г.М., Сейсян Р.П. // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – В. 2. С. 277-282.
4. Савченко Г.М. Метаматериал для эффективной генерации второй гармоники [текст] / Савченко Г.М., Дюделев В.В., Соболева К.К., Лундин В.В., Сахаров А.В., Когновицкая Е.А., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Аверкиев Н.С., Соколовский Г.С. // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т.42. – В. 20. С. 40-48.
5. Савченко Г.М. Фотонно-кристаллический волновод для генерации второй гармоники [текст] / Савченко Г.М., Дюделев В.В., Лундин В.В., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Когновицкая Е.А., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Аверкиев Н.С., Соколовский Г.С. // Физика твердого тела. – 2017. – Т.59. – В. 9 С. 1680-1683.
6. Savchenko G.M. Metamaterial for the Second Harmonic Generation [текст] / Savchenko G.M., Dudelev V.V., Soboleva K.K., Lundin V.V., Sakharov A.V., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Averkiev N.S., Sokolovskii G.S. // Int. Conf. Laser Optics, St Petersburg, Russia, 27 June-1 July 2016, Article number 7549748, Page R338, doi: 10.1109/LO.2016.7549748.

Другие публикации

1. Савченко Г.М. Влияние магнитного вымораживания примесей на поглощение света в сверхчистых полупроводниках [текст] / Савченко Г.М., Сейсян Р.П., Маркосов М.С. // Тезисы докладов конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада Физика.СПб. – 2011. – СПб: издательство Политехнического университета.

2. Савченко Г.М. Упругое рассеяние экситонных поляритонов [текст] / Савченко Г.М. // Тезисы докладов российской молодежной конференции по физике и астрономии ФизикА.СПб. – 2014. – СПб: издательство Поли-технического университета.

VI. Цитируемая литература

1. Агранович В.М. Теория экситонов [текст] / Агранович В.М. – М.: Наука, 1968. – 382 с.
2. Батырев А.С. Спектральный фоторезистивный эффект поля в кристаллах CdS при низких температурах [текст] / Батырев А.С., Бисенгалиев Р.А., Жукова Н.В., Новиков Б.В., Читыров Э.И. // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – В. 11 С. 1961-1967.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ [текст] / Веселаго В.Г. // УФН. – 1967. – Т.92. – В. 3 С. 517-526.
4. Liang X. Ultra-broadband dispersion engineering of nanophotonic waveguides [текст] / Liang X., He Y., Luo R., Lin Q. // Optics Express. – 2016. – Vol. 24. – I.26 PP. 29444-29451.
5. Ахмедиев Н.А. Роль пространственной дисперсии в поглощении света экситонами [текст] / Ахмедиев Н.А. // ЖЭТФ. – 1980. – Т. 79. – В.4 С.1534.
6. Wang Y.J. Impurity scattering induced excitonic polariton damping and its influence on the reflectance spectra of GaN epilayers [текст] / Wang Y.J., Wang R.X., Li G.Q., Xu S.J. // Journal of Applied Physics – 2009. – Vol. 106. – PP. 013514.

Подписано в печать 30 июня 2017 г.
Тираж 100 экз.