

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Ф. СКОРИНЫ

УДК 548.0:535+539.2+534

Стеродубцев Евгений Генрихович

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
И ФОТОАКУСТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ГИРОТРОННЫХ
КРИСТАЛЛАХ И СВЕРХРЕШЕТКАХ

01.04.05 - оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Гомель - 1996

Работа выполнена в Гомельском государственном университете им. Ф.Скорины.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор СЕРДЖКОВ А.Н., кандидат физико-математических наук МИТЮРИЧ Г.С.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор БАРКОВСКИЙ Л.М., кандидат физико-математических наук, ст. научн. сотр. БУРБЕЛО Р.М.

Оппонирующая организация: Институт прикладной физики АН Беларуси

Защита состоится "13" мая 1996 г. в "14" часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.12.12 при Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины (246699, г. Гомель, ул. Советская, 104). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГГУ им. Ф. Скорины.

Автореферат разослан " " 1996 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций  А.Н. Годлевская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ. Круг проблем, решаемых в данной диссертационной работе, лежит на стыке нескольких интенсивно развиваемых в течение последних десятилетий и взаимосвязанных научных направлений: оптики гиротропных кристаллов, оптики кристаллических слоисто-периодических структур (СПС), или сверхрешеток (СР), фотоакустической (ФА) спектроскопии конденсированных сред. Разработка элементной базы современной оптоэлектроники, вычислительной и лазерной техники стимулировала большой интерес к исследованию кристаллических, в частности, гиротропных, сред как материалов с уникальными оптическими свойствами. Сильная чувствительность параметров оптической анизотропии и гиротропии к незначительным изменениям внутренней структуры кристаллов, возможности специфического преобразования такими средами параметров электромагнитного излучения нашли широкие применения в спектроскопии, эллипсометрии, при модуляции света, перспективны при разработке устройств оптической информатики.

Логическим развитием технологии кристаллических пленок стало получение СПС на основе различных соединений с толщинами слоев вплоть до десятка ангстрем. Широкий выбор параметров СР (физико-химических свойств компонентов, числа, расположения и толщины слоев) позволяет получать на основе СР материалы с требуемыми физическими характеристиками, часто не имеющими аналогов среди монокристаллов. Благодаря новым оптическим свойствам СР находят разнообразное применение в квантовой электронике, интегральной оптике и других областях. Практически важный класс СР составляют короткопериодные СР, период которых существенно меньше длин волн (электромагнитных, акустических), взаимодействующих со СПС. Свойства таких СР с высокой точностью описываются в длинноволновом приближении, когда СПС рассматривается как однородная среда с некоторыми усредненными характеристиками.

Для исследования кристаллических материалов необходимы эффективные методы неразрушающего контроля данных сред. Одним из таких методов является ФА спектроскопия, основанная на регистрации акустического сигнала, возникающего при поглощении исследуемым образцом модулированного электромагнитного излучения. Высокая чувствительность, возможности профилированного по глубине образца определения оптических, теплофизических характеристик при коэффициентах поглощения от 10^{-7} до 10^6 см $^{-1}$, широкий спек-

тральный диапазон возбуждающего излучения обусловили эффективность применения ФА методов для исследования свойств кристаллов и кристаллических структур, включая СР: оптического поглощения, анизотропии, линейного и циркулярного дихроизма.

Развитие перечисленных направлений требует в ряде случаев разработки теории взаимодействия электромагнитного излучения с кристаллами, СПС и ФА преобразования. Корректное описание термооптического возбуждения звука в кристаллических средах связано с решением граничной электродинамической задачи и расчетом диссипации световой энергии в объеме образца. Для таких расчетов оказалась эффективной феноменологическая теория кристаллических сред, предложенная Ф.И. Федоровым. При ФА измерениях величин анизотропии, гиротропии кристаллов возникает необходимость учета эффектов оптической интерференции, т.к. вклад последней в ФА отклик в широком диапазоне значений параметров сопоставим с вкладом измеряемых величин. При этом применение обычно используемых приближений полубесконечных, слабопоглощающих, слабодихроичных образцов может оказаться недостаточным. Требуется исследование влияния поляризации возбуждающего излучения, произвольного сочетания эффектов поглощения, анизотропии, гиротропии на ФА преобразование в кристаллах различных классов симметрии и СПС.

В короткопериодных СР не исследован ряд эффектов высших порядков обусловленных влиянием внешних управляющих факторов на оптические характеристики СПС. Интерес для приложений представляют электрооптические (аналоги эффектов Поккельса и Керра), магнитооптические (аналоги обычного и вынужденного эффекта Фарадея, магнитогирация) эффекты, нелинейная оптическая активность, электрогирация в СР. Не получены общие соотношения для определения малых добавок к эффективным материальным тензорам СПС при воздействии указанных внешних факторов. В СР, компоненты которых обладают оптической анизотропией и гиротропией, недостаточно исследованы свойства собственных волн, особенности пропускания, поглощения электромагнитного излучения, возможности управления энергетическими и поляризационными характеристиками. Анализ, проведенный для СР, образованных кубическими, одноосными, ромбическими кристаллами, указывает на широкие возможности создания СПС с требуемыми параметрами оптической анизотропии и гиротропии. Изучение особенностей преобразования электромагнитного излучения в короткопериодных СР является перспективным для разработки но-

вых материалов нелинейной оптики, электро- и магнитооптики, создания элементной базы оптической информатики.

СВЯЗЬ РАБОТЫ С КРУПНЫМИ НАУЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ, ТЕМАМИ

Исследования, проведенные в диссертационной работе, выполнялись в рамках госбюджетных тем "Фототермоакустическая спектроскопия гиротропных сред" (шифр ГБЦМ 92-03, № ГР 01.92.0004641), "Импульсная фотоакустическая спектроскопия нелинейных кристаллов" (шифр ГБЦМ 94-18), "Лазерная фотоакустическая спектроскопия гиротропных кристаллических структур" (шифр ГБЦМ 95 - 08, № ГР 199618), а также плановой темы "Лазер 3.15. Исследование электромагнитных, фотоакустических и магнитооптических взаимодействий в анизотропных и периодически неоднородных средах" кафедры оптики Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Целью настоящей работы является анализ особенностей преобразования характеристик электромагнитного излучения гиротропными кристаллами, короткопериодными сверхрешетками, а также разработка на этой основе общей теории фотоакустического эффекта в поглощающих кристаллических средах.

В диссертации поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Исследование формирования ФА сигнала в кубических и одноосных оптически активных кристаллах при произвольном сочетании эффектов анизотропии, гиротропии, оптической интерференции и поляризации возбуждающего излучения.
2. Решение в приближении эффективной среды граничных задач о взаимодействии электромагнитного излучения со СР, образованными кристаллами кубической и ромбической сингоний.
3. Построение теории ФА преобразования в короткопериодных СР, образованных кристаллами кубической сингонии.
4. Определение для СР в длинноволновом приближении тензоров электрооптических, магнитооптических коэффициентов, нелинейной оптической активности и электрогирации.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Впервые при отсутствии ограничений на значения параметров анизотропии, гиротропии, оптического поглощения и интерференции исследованы диссипация световой энергии и ФА эффект в кубических и всех одноосных гиротропных кристаллах.

Установлены новые условия проведения ФА измерений параметра циркулярного дихроизма кубических кристаллов. Предложены новые, более точные и универсальные, ФА методы определения коэффициентов поглощения собственных волн, всех диагональных компонент комплексного тензора гирации для кристаллов средних сингоний.

Выявлены особенности поглощения световой энергии и ФА преобразования в короткопериодных СР, образованных гиротропными кубическими кристаллами. Показано, что диссипативные свойства таких структур, включая дихроичные, могут не быть промежуточными между аналогичными свойствами кристаллов, образующих СР. Установлены условия контроля параметров данных СР ФА методами.

В длинноволновом приближении определены оптические свойства СР, образованных кристаллами класса 222. Исследованы характеристики собственных волн, прошедшего излучения, диссипация световой энергии, показаны возможности эффективного преобразования такими СР параметров электромагнитного излучения.

Впервые показано, что особенности распределения энергии электромагнитного поля между собственными волнами при наличии многолучевой интерференции могут вести к компенсации влияния оптической анизотропии кристаллов и СР на интенсивность и диссипацию энергии электромагнитного излучения. Определены условия, при которых данный эффект имеет место, указаны возможности его практического использования.

Впервые получены общие соотношения для расчета малых изменений комплексных несимметричных тензоров диэлектрической, магнитной проницаемостей, оптической активности короткопериодных СР при воздействии управляющих внешних факторов. На основе этого определены тензоры электрооптических, магнитооптических эффектов, нелинейной оптической активности и электрогирации. Найден вид перечисленных тензоров в СР, образованных кристаллами типа цинковой обманки. Показаны новые возможности использования короткопериодных СР в качестве перспективных оптических материалов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в работе теоретические результаты по ФА преобразованию в гиротропных кристаллах различных классов симметрии и СР, а также разработанный на их основе пакет программ для ПЭВМ могут быть использованы в экспериментах по определению параметров оптической активности (вещественные и мнимые части

компонент тензора гирации), поглощения (коэффициенты поглощения собственных волн) и геометрии структуры (толщина кристаллического слоя, относительные толщины слоев, образующих СР). Полученные данные могут найти применение при создании приборов ФА спектроскопии (ФА дихрографы, спектрополяриметры и др.).

Результаты, касающиеся особенностей оптических свойств поглощающих гиротропных кристаллов и СР, могут быть использованы при разработке модуляторов и преобразователей характеристик электромагнитного излучения, при создании новых оптических материалов на основе СР и оптической элементной базы вычислительной техники.

Результаты работы частично вошли в содержание научных отчетов по перечисленным выше госбюджетным темам.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

После экспериментальной апробации теоретические результаты, полученные в работе, могут быть использованы для усовершенствования на уровне изобретений следующих приборов и оптических материалов: ФА дихрографов; модуляторов интенсивности и поляризации, фильтров электромагнитного излучения; электро-, магнито- и нелинейнооптических материалов на основе СР.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- Теоретический анализ диссипации световой энергии, ФА эффекта и предложенные на основе этого новые, более точные и универсальные, методы ФА измерений параметров гиротропии, анизотропии, поглощения в кристаллах высшей и средних сингоний;
- установленные оптические свойства короткопериодных СР, образованных кубическими и ромбическими кристаллами; разработка метода ФА спектроскопии для исследования СР;
- соотношения, определяющие в длинноволновом приближении малые изменения материальных тензоров СР, вызванные внешними управляющими факторами;
- вид тензоров, характеризующих аналоги эффектов Погкельса, Керра, Фарадея, нелинейной оптической активности, электро- и магнитогирации в короткопериодных СР;
- эффект компенсации влияния оптической анизотропии кристаллов и СР на энергетические характеристики электромагнитного излучения, обусловленный интерференционными особенностями распределения энергии электромагнитного поля между собственными волнами.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

Диссертация отражает личный вклад автора в проведенные исследования. Научные руководители А.Н. Серджков и Г.С. Митурнич сформулировали тему диссертационной работы, осуществляли постановку задач, руководство исследованиями и участвовали в обсуждении результатов. В работах по теме диссертации автору принадлежат вывод основных формул, создание программного обеспечения, численные расчеты на ПЭВМ и формулировка основных положений.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты, полученные в ходе исследований, докладывались и представлялись на Международном семинаре по электродинамике хиральных и бианизотропных сред "Bianisotropics-93" (Гомель, 1993), Международном семинаре по электродинамике гиротропных сред "Chiral-94" (Perigueux, France, 1994), Международном семинаре по современной акустике (Nanjing, China, 1994), Международной конференции по электродинамике хиральных, бианизотропных и бианизотропных сред "Chiral-95" (Pennsylvania, USA, 1995), семинарах кафедры оптики Гомельского государственного университета им. Ф.Скорины.

ОПУБЛИКОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Список основных работ по теме диссертации включает 11 наименований, приведенных в конце автореферата, из которых 5 статей в журналах, препринт, 5 работ, опубликованных в материалах международных конференций.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, выводов, двух приложений и списка использованных источников. Полный объем диссертации составляет 129 страниц, в том числе объем, занимаемый иллюстрациями, - 20 страниц, списком 168 использованных источников - 14 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе приведен обзор литературы по отдельным вопросам электродинамики анизотропных и гиротропных кристаллов, кристаллических СПС и ФА спектроскопии данных сред.

Во второй главе диссертации исследованы особенности распространения электромагнитного излучения и ФА преобразования в гиротропных кристаллах высшей и средних сингоний. Расчеты выполнены в плосковолновом приближении для случая нормального падения излучения на образец и произвольного сочетания эффектов оптического поглощения, анизотропии, гиротропии и многолучевой интерференции. При этом методики расчета ФА отклика, предложенные Розенцвейгом и Гершо [1], Джексоном и Амером [2], обобщены с учетом специфики оптических свойств исследуемых кристаллов.

В разделе 2.1 рассмотрено ФА преобразование в кубических кристаллах и изотропных средах для газомикрофонного и пьезоэлектрического методов регистрации ФА сигнала. Отношения вкладов в диссипацию световой энергии, обусловленных: 1) поглощением отраженных волн внутри кристаллического слоя, 2) наличием циркулярного дихроизма, к величине диссипации энергии преломленных волн внутри слоя, определяются соответственно параметрами

$$\eta_1 = \frac{|\sqrt{\epsilon} - n_2|^2}{|\sqrt{\epsilon} + n_2|^2} \exp(-2\beta l), \quad \eta_2 = \frac{2\tau\gamma''}{(1+\tau^2)\text{Im}(\sqrt{\epsilon})}, \quad (1)$$

где ϵ , β и γ'' - комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициент поглощения и параметр циркулярного дихроизма кристалла, l - толщина плоскопараллельного слоя, n_2 - показатель преломления непоглощающей изотропной подложки, τ - эллиптичность возбуждающего излучения. При условии $\eta_1 \sim \eta_2$, выполняемом в широком диапазоне параметров образцов, необходим учет отраженного излучения и многолучевой интерференции в слое при ФА измерениях дихроичных свойств. Сравнение влияния интерференции оптических и тепловых волн на формирование ФА сигнала показало определяющую роль тепловых процессов. Рост параметра $b = (k_b k_g)(\rho_g/\rho_b)^{1/2}$, где k_j - коэффициенты тепло-, ρ_j - температуропроводности образца ($j=g$) и подложки ($j=b$), ведет к усилению тепловой интерференции и росту амплитуды ФА сигнала, что может быть использовано для повышения точности ФА измерений параметре γ'' . Установлено, что такие измерения требуют чувствительности газомикрофонной системы регистрации $10^{-5} - 10^{-4}$ Па. При этом проявляются особенности, определяемые влиянием дихроичных свойств кристалла и поляризации возбуждающего излучения, преимущественно, на амплитуду q ФА сигнала. При типичных условиях зависимости $q(\gamma'')$ линейны при

$\gamma'' < 10^{-4}$ и частотах модуляции возбуждающего излучения $\Omega > 50$ Гц, что позволяет измерять величину γ'' методом ФА спектроскопии. В разделе 2.1 также показана возможность определения ФА методом параметра циркулярного дихроизма centrosимметричных кубических кристаллов, индуцированного постоянным электрическим полем.

В разделе 2.2 рассмотрены особенности диссипации световой энергии в слоях из одноосных гиротропных кристаллов, вырезанных параллельно оптической оси. Показано, что для величины диссипации W справедливо приближение, линейное по диагональным компонентам γ_{kk} ($k=1,2,3$) комплексного псевдотензора гирации [3]. При этом недиагональные компоненты тензора γ на диссипативные свойства не влияют и для любого класса указанных кристаллов

$$W = (\nu/4) \sum_{j=1}^2 \text{Im}(\varepsilon_j) \left[|A_j|^2 \exp(-\beta_j z) + |B_j|^2 \exp(\beta_j z) \right], \quad (2)$$

где ν - частота падающего излучения, β_j и ε_j - коэффициенты поглощения и комплексные диэлектрические проницаемости для собственных волн в кристалле, z - координата точки внутри слоя ($0 \leq z \leq 1$), A_j и B_j - величины, характеризующие векторные амплитуды преломленных и отраженных волн внутри слоя, определяемые из решения граничной задачи. Влияние поляризации падающего излучения - эллиптичности τ и азимута ϕ (угла между большой осью эллипса поляризации и оптической осью кристалла) на величину W описывается функциями

$$W(\tau) = T_1 + (T_2 \tau + T_3) / (1 + \tau^2), \quad W(\phi) = F_1 \cos^2(\phi) + F_2 \sin(2\phi) + F_3, \quad (3)$$

где величины T_k , F_k не зависят от τ и ϕ соответственно. Наличие в (3) параметра T_3 обусловлено оптической анизотропией, а параметра F_2 - гиротропией кристалла. При $\phi \neq \phi_1 = \pi/4 + \pi i$ ($i = 0, 1$) $T_3 \gg T_2$, при $\phi = \phi_1$ $T_2 \gg T_3$ и зависимости $W(\tau)$ имеют монотонный вид, характерный для кубических кристаллов. Варьирование параметров τ , ϕ может вести к существенному (до 50 %) изменению величины W , возрастающему в условиях оптической интерференции.

В разделе 2.3 полученные результаты использованы для исследования ФА преобразования во всех классах одноосных гиротропных кристаллов. Показано, что рассмотренные особенности диссипации световой энергии имеют место и для амплитудных характеристик ФА сигнала, что позволяет исследовать оптические свойства таких

кристаллов ФА методом. Комплексная амплитуда ФА сигнала $Q=qe^{i\Phi}$ определяется линейной комбинацией параметров $\text{Re}(\gamma_{kk})$, $\text{Im}(\gamma_{kk})$, коэффициенты при которых зависят от теплофизических свойств системы "детекторный газ - образец - подложка" [1], величин ϵ_j , интенсивности и поляризации возбуждающего излучения. На основе этого предложен метод определения величин γ_{kk} оптически непрозрачных образцов (с толщиной $l \gg \beta_j^{-1}$), основанный на изменениях амплитудных (q) и фазовых (Φ) характеристик ФА сигнала при различных поляризациях возбуждающего излучения. Показана возможность определения коэффициентов поглощения β_j собственных волн ФА методом при $\tau = 0$, $\phi = (\pi/2)l$.

В разделах 2.2, 2.3 установлено, что даже при сильной оптической анизотропии ($|\epsilon_2 - \epsilon_1| \gg 0$) величина диссипации световой энергии и, как следствие, амплитуда ФА сигнала могут практически не зависеть от азимута поляризации ϕ падающего на кристалл излучения. Анализ показал, что такая компенсация влияния оптической анизотропии кристалла может иметь место и для интенсивностей излучения, отраженного (I_r) и прошедшего (I_t) через кристаллический слой (при этом оптическая ось параллельна границам слоя и перпендикулярна волновой нормали падающего излучения). В разделе 2.4 для случая негиротропного кристалла получены условия, при которых величины W , I_r и I_t не зависят от азимута ϕ .

Интенсивности I_t и I_r не зависят от ϕ соответственно при

$$|n_1 \Delta_2(+n)|^2 = |n_2 \Delta_1(+n)|^2, \quad |\Delta_1(-n) \Delta_2(+n)|^2 = |\Delta_2(-n) \Delta_1(+n)|^2, \quad (4)$$

где $\Delta_j(\pm n) = (n_j \pm n)(n_j + n_3) \Phi_{j-} + (\pm n - n_j)(n_j - n_3) \Phi_{j+}$, $\Phi_{j\pm} = \exp(\pm i k n_j l)$, $l^2 = -1$, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число для вакуума, l - толщина слоя, n_j - комплексные, а n и n_3 - вещественные показатели преломления собственных волн в кристалле и непоглощающих негиротропных сред перед и за слоем соответственно. В случае непоглощающих кристаллов условия (4) совпадают и имеют вид

$$\frac{(n_1^2 - n^2)(n_1^2 - n_3^2)}{n_1^2} \sin^2(k n_1 l) = \frac{(n_2^2 - n^2)(n_2^2 - n_3^2)}{n_2^2} \sin^2(k n_2 l), \quad (5)$$

что может выполняться, в частности, при $n_1 (n_2) = n$, $n_2 (n_1) = n_3$ или $2n_j l = q_j \lambda$, $j = 1, 2$, где q_j - целые числа.

Диссипация W не зависит от ϕ при

$$V_1 = V_2, \quad V_j = \operatorname{Im}(\epsilon_j) |\Delta_j(+n)|^2 (N_{j+} + N_{j-}), \quad (6)$$

где $N_{j\pm} = |n_3 \pm n_j|^2 \exp[\pm \beta_j(1-z)]$. Численный анализ показал, что рассматриваемый эффект слабо зависит от параметров оптической активности и соотношения (4) - (6) с высокой точностью выполняются и для гиротропных кристаллов.

Показано, что при условиях (4)-(6) происходит согласованное распределение энергии электромагнитного поля между собственными (преимущественно, преломленными) волнами в кристалле, отраженной и прошедшей кристаллический слой волной при существенном влиянии оптической интерференции. Указаны возможности использования данного эффекта для определения характеристик кристаллических пленок и в устройствах оптической обработки информации.

В третьей главе исследованы оптические свойства СР, образованных поглощающими гиротропными кристаллами кубической и ромбической сингоний, и ФА преобразование в таких структурах. В плосковолновом приближении рассмотрен случай короткопериодных СР: $D < \lambda$, где D - период СР, состоящий из двух слоев с относительными толщинами $x = d_1/D$, $1-x = d_2/D$ ($D = d_1 + d_2$), λ - длина волны излучения, падающего нормально к границам СР.

В разделе 3.1 исследовано поглощение световой энергии в СР, образованных кубическими кристаллами. При указанной геометрии взаимодействия с излучением оптические свойства таких СР эквивалентны свойствам изотропных сред с эффективными комплексными параметрами

$$A_e = \langle A \rangle = x A_1 + (1-x) A_2, \quad (7)$$

где $A_j = \epsilon_j$, γ_j - скаляры диэлектрической проницаемости и оптической активности СР ($j=e$), первого и второго ($j=1,2$) компонентов СР. В этом случае возможно использование соотношений раздела 2.1, при заменах, соответствующих усреднению (7). Численный анализ показал возможность получения СР с заданными дихротичными свойствами при варьировании оптических параметров компонентов и геометрии СР. При этом изменения эллиптичности τ возбуждающего излучения ($\tau = -i + i$) и параметра κ ($\kappa = 0 + i$) соответственно влияют на поглощение энергии электромагнитного излучения.

Установлено, что диссипативные свойства рассмотренных СР,

включая дихроичные, могут не быть промежуточными между соответствующими свойствами компонентов СР. Обоснованы возможности контроля параметров таких СР фотокалориметрическими методами.

В разделе 3.2 исследованы характеристики электромагнитных собственных волн (СВ) для СР, образованных кристаллами класса 222. Рассмотрен случай, когда компоненты СР имеют одну общую ось второго порядка, перпендикулярную границам слоев и параллельную волновой нормали падающего на СР излучения. При такой геометрии на основе методик расчета эффективных тензоров диэлектрической проницаемости ϵ_e [4] и оптической активности α_e [5] получено:

$$\epsilon_e = \begin{bmatrix} L & R & 0 \\ R & N & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}, \quad \alpha_e = \begin{bmatrix} P & P & 0 \\ P & Q & 0 \\ 0 & 0 & H \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где комплексные компоненты тензоров определяются оптическими постоянными, расположением слоев и даны в диссертации. В общем случае тензоры ϵ_e , α_e не приводятся к диагональному виду.

В результате решения волнового уравнения для естественно гиротропных сред [3] с учетом (8) определен общий вид преломленных и отраженных СВ в СР, которым соответствует показатели преломления $n_1 = n_+$, $n_2 = n_-$,

$$n_{\pm}^2 = (1/2) \left\{ L + N + G_1 \pm \left[(L - N)^2 + 4R^2 + G_2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (9)$$

где $G_1 = 2(FQ - P^2)$, $G_2 = 4(F + Q)(LQ + NP - 2RP)$.

Проведен численный анализ эллиптичностей, азимутов поляризации и величины неортогональности β преломленных СВ в СР в зависимости от геометрии структуры, параметров поглощения и гиротропии. В частности, установлено, что в данных СР величина β может достигать значений 0.2 - 0.3 рад при типичных оптических свойствах компонентов. Влияние гиротропии на неортогональность СВ существенно ослабевает с уменьшением оптического поглощения. Показаны возможности изменения в широких пределах поляризации СВ и получения материалов с различными оптическими свойствами за счет выбора геометрии слоев и компонентов СР.

В разделе 3.3 результаты раздела 3.2 использованы для решения граничной электродинамической задачи, определения электромагнитных полей вне СР и величины диссипации световой энергии в СР, образованных ромбическими кристаллами. Определена за-

зависимость интенсивности прошедшего СР излучения от поляризации падающего света, при $\alpha_e = 0$ имеющая вид

$$I(\tau_0, \phi) = (\tau_0^2 + 1)^{-1} \left\{ \rho_1 \tau_0^2 + \rho_2 \tau_0 + \rho_3 + (\tau_0^2 - 1) [\rho_4 \sin^2(\phi) + \rho_5 \sin(2\phi)] \right\}, \quad (10)$$

где величины ρ_v ($v=1+5$) не зависят от эллиптичности τ_0 и азимута поляризации ϕ падающего на СР излучения.

Показано, что варьирование геометрии СР при типичных значениях оптических постоянных слоев ведет к существенным изменениям диссипации световой энергии, интенсивности и поляризации взаимодействующего со СР излучения. При этом преобразование поляризационных характеристик слабо зависит от параметров поглощения, что дает возможность эффективного управления, в частности, поляризацией электромагнитного излучения при малом изменении интенсивности. Установлено, что при определенных параметрах диссипация энергии и интенсивность прошедшего СР излучения могут не зависеть от азимута поляризации падающего света, несмотря на сильную оптическую анизотропию СР. Механизм такой компенсации влияния оптической анизотропии аналогичен рассмотренному в разделе 2.4, а условия, при которых данный эффект имеет место, при $x = 1$ соответствуют соотношениям (4) - (6).

В разделе 3.4 на основе соотношений, полученных в разделе 3.1, исследовано ФА¹ преобразование (газомикрофонный метод регистрации ФА сигнала [1]) в СР, образованных гиротропными кристаллами кубической сингонии.

Предполагалась справедливость соотношения (7) для эффективных коэффициентов тепло- и температуропроводности СР. Получены общие выражения для амплитудных и фазовых характеристик ФА сигнала и рассмотрены практически важные частные случаи. Показано, что особенности, определяемые эффективным характером параметров СР и наличием циркулярного дихроизма, в большей степени проявляются для амплитуды ФА сигнала. Определены условия проведения ФА измерений и контроля ФА методом гесметрии СР (относительных толщин компонентов СР), эффективных теплофизических характеристик, параметра циркулярного дихроизма. Установлено, что чувствительные ФА измерения в гиротропных СР требуют учета не только эффективных и геометрических параметров слоистой структуры, но и эллиптичности возбуждающего излучения, а также многолучевой оптической интерференции в СР.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию ряда эффектов, связанных с влиянием внешних управляющих факторов (в частности, электрических и магнитных полей) на оптические характеристики короткопериодных СР. Анализ проведен в длинноволновом приближении для СР, образованных слоями произвольной кристаллографической симметрии.

В разделе 4.1 на основе методик [4, 5] получены общие соотношения, определяющие комплексные несимметричные тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей, оптической активности СР, а также малые изменения данных тензоров. Как для эффективной среды ($j = e$), так и для компонентов СР ($j = 1, 2$) использовались материальные уравнения [3]: $\vec{D}^{(j)} = \epsilon^{(j)} \vec{E}^{(j)} + \alpha^{(j)} \vec{H}^{(j)}$, $\vec{B}^{(j)} = \mu^{(j)} \vec{H}^{(j)} + \beta^{(j)} \vec{E}^{(j)}$, описывающие среды с различными видами анизотропии и гиротропии. С учетом того, что обычно $\epsilon, \mu \gg \alpha, \beta$ [3], расчеты выполнены в линейном по компонентам тензоров α, β приближении. Частные случаи полученных соотношений описывают эффекты высших порядков в короткопериодных СР, обусловленные малыми изменениями тензоров $\epsilon, \mu, \alpha, \beta$.

В разделе 4.2 исследованы электрооптические (ЭО) свойства СР. Определен вид эффективных тензоров линейных и квадратичных ЭО коэффициентов и показано, что на основе СР возможно получение материалов с широким диапазоном ЭО свойств, которые могут не иметь аналогов среди монокристаллических сред. На примере структур из кристаллов класса $\bar{4}3m$, к которым относится большинство реализованных СР, рассмотрены возможности управления ЭО характеристиками за счет вариации параметров слоев. Показаны преимущества использования СР из одноосных кристаллов при наличии искусственной ϵ -изотропии в качестве активных элементов ЭО затворов.

В разделе 4.3 исследованы эффекты Фарадея (обычный и вынужденный - при наличии постоянного управляющего электрического поля) и линейная магнитогирация в СР. Определен общий вид эффективных тензоров, описывающих перечисленные явления. В частности, изменение тензора $\epsilon^{(e)} \Delta \epsilon_{1p}^{(e)} = i e_{1qp} \eta_{qk}^{(e)} H_k^0$ при эффекте Фарадея (H_k^0 - напряженность управляющего магнитного поля, $i^2 = -1$, e_{1qp} - тензор Леви-Чивита) определяется усреднением вида (7) величин

$$\begin{aligned} & \epsilon_{33}^{-1} \mu_{33}^{-1} \eta_{13}, \quad \epsilon_{33}^{-1} (\eta_{1j} - \mu_{3j} \mu_{33}^{-1} \eta_{13}), \quad \mu_{33}^{-1} (\eta_{33} + P_1 \eta_{13} + P_2 \eta_{23}), \\ & \eta_{3j} + P_1 \eta_{1j} + P_2 \eta_{2j} - \mu_{3j} \mu_{33}^{-1} (\eta_{33} + P_1 \eta_{13} + P_2 \eta_{23}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $i, j = 1, 2$, $P_i = \epsilon_{ij} \epsilon_{33}^{-1}$, ϵ и μ - тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей в отсутствие поля H^0 . Установлены условия, при которых эффективные магнитооптические параметры СР превосходят соответствующие величины для ее компонентов, а также показаны возможности получения на основе СР новых магнитогирационных материалов.

В разделе 4.4 определен общий вид тензоров, характеризующих нелинейную оптическую активность (НЛОА), линейную и квадратичную электрогирацию в СР. Анализ НЛОА проведен в приближении заданного поля для случая монохроматической волны накачки и отсутствия влияния пробной волны на материальные тензоры СР. Показано, что наличие дополнительной трансляционной симметрии ведет к специфическому проявлению указанных эффектов в СР. В частности, установлено, что переход от кристаллов класса $\bar{4}3m$ к СР со слоями из данных кристаллов ведет к увеличению в три раза числа независимых компонент тензоров, характеризующих НЛОА и электрогирацию. При этом симметричные свойства НЛОА второго порядка и квадратичной электрогирации в таких СР не имеют аналогов среди монокристаллических сред, а компоненты соответствующих тензоров не сводятся к простому усреднению характеристик слоев.

В приложениях приведены вид тензоров ЭО эффектов для СР, а также условия усиления эффективных ЭО характеристик СР.

ВЫВОДЫ

Подводя итог проведенным исследованиям, формулируем основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

1. Установлены новые особенности диссипации энергии плоских монохроматических электромагнитных волн в кубических и одноосных гиротропных кристаллах, обусловленные взаимосвязанным влиянием поляризации возбуждающего излучения, оптической активности и анизотропии, многолучевой интерференции.

2. При произвольном сочетании эффектов поглощения, анизотропии, гиротропии развита методика фотоакустических измерений параметра циркулярного дихроизма в кубических кристаллах, предложены новые фотоакустические методы определения всех диагональных компонент комплексного тензора гирации, коэффициентов поглощения собственных волн в кристаллах средних сингоний.

3. В длинноволновом приближении получены решения граничных задач о взаимодействии электромагнитных волн со сверхрешетками, образованными гиротропными кубическими и ромбическими кристаллами. Показаны возможности эффективного преобразования такими структурами характеристик электромагнитного излучения. Определены условия, при которых возможен контроль параметров сверхрешеток методами фотоакустической спектроскопии.

4. Предсказан и исследован эффект компенсации влияния оптической анизотропии монокристаллов и кристаллических структур на энергетические характеристики электромагнитного излучения. Установлено, что данное явление обусловлено интерференционными особенностями распределения энергии электромагнитного поля между собственными, преимущественно, преломленными, волнами в анизотропной среде. Показаны возможности практического использования данного эффекта.

5. В приближении эффективной среды получены общие соотношения для расчета малых изменений комплексных несимметричных тензоров диэлектрической, магнитной проницаемостей, оптической активности, обусловленных воздействием управляющих внешних факторов.

6. Определен вид тензоров электрооптических, магнитооптических эффектов, нелинейной оптической активности для короткопериодных сверхрешеток, образованных компонентами произвольной кристаллографической симметрии. Выявлены новые возможности использования сверхрешеток в качестве перспективных оптических материалов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Митюрин Г.С., Стародубцев Е.Г. Особенности формирования фотоакустического сигнала в гиротропном слое // Опт. и спектр. - 1993. - Т.75, № 4. - С. 789 - 794.

2. Mityurich G.S., Starodubtsev E.G. Dissipative properties of gyrotropic superlattices in the long wavelength approximation // Proc. of Intern. Workshop "Bianisotropics'93". - Espoo, Finland, 1993. - P. 97 - 100.

3. Митюрин Г.С., Стародубцев Е.Г. Диссипативные свойства гиротропных сверхрешеток в длинноволновом приближении // Опт. и спектр. - 1994. - Т.76, № 4. - С. 656 - 659.

4. Mityurich G.S., Starodubtsev E.G. Characteristic properties of light energy dissipation in uniaxial gyrotropic crystals // Proc. of Intern. Workshop "Chiral-94". - Perigueux,

France, 1994. - P. 427 - 432.

5. Mityurich G.S., Starodubtsev E.G. Photoacoustic transformation in uniaxial gyrotropic crystals // Proc. of Intern. Workshop on Modern Acoustics. - Nanjing, China, 1994. - P. 74.

6. Mityurich G.S., Starodubtsev E.G. Photoacoustic spectroscopy of short-period gyrotropic superlattices // Proc. of Int. Workshop on Modern Acoustics. - Nanjing, China, 1994. - P. 86.

7. Митюрин Г.С., Стародубцев Е.Г. Особенности диссипации световой энергии в одноосных гиротропных кристаллах // Опт. и спектр. - 1994. - Т.77, № 4. - С. 613 - 616.

8. Митюрин Г.С., Стародубцев Е.Г. Фотоакустическая спектроскопия короткопериодных гиротропных сверхрешеток // Кристаллография. - 1994. - Т.39, № 6. - С. 1048 - 1052.

9. Starodubtsev E.G., Mityurich G.S., Ranachowski J. Electromagnetic waves and photoacoustic transformation in gyrotropic superlattices. - Preprint / Institute of Fundamental Technological Research. - Warszawa, Poland, 1994. - 29 p.

10. Митюрин Г.С., Стародубцев Е.Г. Особенности фотоакустического преобразования в одноосных гиротропных кристаллах // Опт. и спектр. - 1995. - Т.79, № 1. - С. 96 - 100.

11. Starodubtsev E.G., Mityurich G.S. Power transformation of electromagnetic radiation by gyrotropic supergratings formed by crystals of rhombic symmetry // Proc. of Intern. Conference "Chiral'95". - Pennsylvania, USA, 1995. - P. 157 - 160.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosencwaig A. Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy. - New York: J. Wiley, 1980. - 360 p.

2. Jackson W., Amer N.M. Piezoelectric photoacoustic detection: Theory and experiment // Appl. Opt. - 1980. - Vol. 51, № 6. - P. 3343 - 3353.

3. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. - Минск: Наука и техника, 1976. - 456 с.

4. Djafari Rouhani B., Sapriel J. Effective dielectric and photoelastic tensors of superlattices in the long-wavelength regime // Phys. Rev. B. - 1986. - Vol. 34, № 10. - P. 7114 - 7117.

5. Семченко И.В. Гиротропные свойства сверхрешеток в длинноволновом приближении // Кристаллография. - 1990. - Т. 35, № 5. - С. 1047 - 1050.

РЕЗЮМЕ

Стеродубцев Евгений Генрихович

Особенности распространения электромагнитных волн и фотоакустическое преобразование в гиротропных кристаллах и сверхрешетках.

Ключевые слова: гиротропные кристаллы, плоские электромагнитные волны, фотоакустическая спектроскопия, слоисто-периодические кристаллические среды, сверхрешетки, длинноволновое приближение.

Объектом исследования в диссертационной работе является взаимодействие плоских электромагнитных волн (ЭМВ) с кристаллами и слоисто-периодическими кристаллическими структурами, или сверхрешетками (СР), обладающими сочетанием различных видов анизотропии и гиротропии. Цель работы состоит в анализе особенностей преобразования характеристик ЭМВ гиротропными кристаллами, короткопериодными СР, а также в разработке на этой основе теории фотоакустического (ФА) эффекта в данных средах. В расчетах использовались методы ковариантной электродинамики кристаллических сред, разработанной Ф.И. Федоровым и его учениками. При исследовании ФА преобразования модели Розенштейна - Гершо, Джексона - Амера обобщены с учетом специфики оптических свойств исследуемых сред.

Установлены новые особенности преобразования характеристик плоских ЭМВ и ФА эффекта в кубических и одноосных гиротропных кристаллах, короткопериодных СР, образованных кубическими и ромбическими (класс 222) кристаллами. На этой основе для указанных сред предложена методика ФА измерений параметров гиротропии, оптического поглощения и анизотропии, определения геометрии слоев. Показано, что многолучевая интерференция в анизотропном слое может компенсировать влияние оптической анизотропии кристалла или СР на энергетические характеристики ЭМВ. В длинноволновом приближении определен вид тензоров электрооптических, магнитооптических эффектов, нелинейной оптической активности в СР, образованных компонентами произвольной кристаллографической симметрии. Показаны новые возможности использования СР в качестве оптических материалов.

Полученные результаты могут найти применение при разработке приборов ФА спектроскопии, преобразователей характеристик ЭМВ, устройств оптической обработки информации.

Старадубцаў Яўгеній Генрыхавіч

Асаблівасці распаўсюджвання электрамагнітных хваляў і фотаакустычнае пераўтварэнне ў гіратропных крышталях і звышраотках.

Ключавыя словы: гіратропныя крышталі, плоскія электрамагнітныя хвалі, фотаакустычная спектраскапія, слаіста-перыядычныя крышталевыя асяроддзі, звышраоткі, доўгахвалевое прыбліжэнне.

Аб'ектам даследавання ў дысертацыйнай працы з'яўляецца ўзаемадзеянне плоскіх электрамагнітных хваляў (ЭМХ) з крышталямі і слаіста-перыядычнымі крышталевымі структурамі, ці звышраоткамі (ЗР), валодаючымі спалучэннем розных відаў анізатрапіі і гіратрапіі. Мэта працы заключаецца ў аналізе асаблівасцей пераўтварэння характарыстык ЭМХ гіратропнымі крышталямі, кароткаперыяднымі ЗР, а таксама ў распрацоўцы на гэтай аснове тэорыі фотаакустычнага (ФА) эфекта ў ладзеных асяроддзях. У выліках выкарыстоўваліся метады каварыянтнай электрадынамікі крышталевых асяроддзяў, распрацаванай Ф.І. Федаравым і яго вучнямі. Пры даследаванні ФА пераўтварэння мадэлі Разеншвейга-Гершо, Джэксана-Амера абагульнены з улікам спецыфікі аптычных уласцівасцей даследаваных асяроддзяў.

Устаноўлены новыя асаблівасці пераўтварэння характарыстык плоскіх ЭМХ і ФА эфекта ў кубічных і аднавосевых гіратропных крышталях, кароткаперыядных ЗР, створаных кубічнымі і рамбічнымі (клас 222) крышталямі. На гэтай аснове для вызначаных асяроддзяў прапанавана метадыка ФА вымярэнняў параметраў гіратрапіі, аптычнага паглынання і анізатрапіі, геаметрыі структуры. Паказана, што многапрамяневая інтэрферэнцыя ў анізатропным слоі можа кампенсаваць уплыў аптычнай анізатрапіі крышталя ці ЗР на энергетычныя характарыстыкі ЭМХ. У доўгахвалевым прыбліжэнні ўстаноўлены адносіны тэнзараў электрааптычных, магнітааптычных эфектаў, нелінейнай аптычнай актунасці ЗР, створаных кампанентамі адвольнай крышталеграфічнай сіметрыі. Паказаны новыя магчымасці выкарыстання ЗР у якасці аптычных матэрыялаў.

Атрыманія рэзультаты могуць знайсці прымяненне пры распрацоўцы прыбораў ФА спектраскапіі, пераўтваральнікаў характарыстык ЭМХ, устройстваў аптычнай впрацоўкі інфармацыі.

ABSTRACT

Starodubtsev Evgenii Genrihovitch

Features of electromagnetic waves propagation and photoacoustic transformation in gyrotropic crystals and superlattices.

Key words: gyrotropic crystals, plane electromagnetic waves, photoacoustic spectroscopy, layered-periodic crystal media, superlattices, long wavelength approximation.

The object of investigation in the dissertation is interaction of plane electromagnetic waves (EMW) with crystals and layered-periodic crystal structures or superlattices (SL) having a combination of various types of anisotropy and gyrotropy. The aim of the work is the analysis of distinctions of EMW characteristics transformation by gyrotropic crystals, short-period SL and development on this base of photoacoustic (PA) effect theory in the given media. The methods of the crystal media covariant electrodynamics developed by F.I. Fedorov and his disciples were used in the calculations. At PA transformation study the Rosenzweig - Gersho and Jackson-Amer models were generalized with the account of optical properties features of the media investigated.

The new distinctions of plane EMW characteristic transformation and PA effect in cubic and uniaxial gyrotropic crystals, short-period SL formed by cubic and rhombic (class 222) crystals have been ascertained. On this base the methods of PA measuring parameters of gyrotropy, optical absorption and anisotropy, structure geometry have been developed for the indicated media. It was shown that multibeam interference in anisotropic layer can compensate the effect of crystal or SL optical anisotropy on the EMW energy characteristics. In the long wavelength approximation the tensors describing electrooptical, magneto-optical effects, non-linear optical activity in SL formed by components of arbitrary crystallographic symmetry have been determined. The new opportunities of using SL as optical materials have been showed.

The received results can find an application at development of PA spectroscopy devices, EMW characteristics transformers and in information optical processing arrangements.

Стародубцев Евгений Генрихович

Особенности распространения электромагнитных волн и фотоакустическое преобразование в гиротропных кристаллах и сверхрешетках.

Подписано к печати 10.04.1996 г. Формат 60x90/16. Тираж 90 экз. Заказ 383 б . Отпечатано на ротационной машине Гомельского ЦНТИ, 246744, г. Гомель, пр. Ленина, 3.