

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи
УДК 535.241: 539.2

ПОЛИКАРПОВА
Наталья Вячеславовна

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ УПРУГИХ
ВОЛН В АКУСТООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2007

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Виталий Борисович Волошинов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Валентин Андреевич Буров

доктор физико-математических наук,
рук. лаб. Витольд Эдуардович Пожар

Ведущая организация: Акустический институт
им. акад. Н.Н. Андреева

Защита состоится 22 марта 2007 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.67 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, аудитория им. Р.В. Хохлова

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

Автореферат разослан «21» февраля 2007 года

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 501.001.67
кандидат физико-математических наук

А.Ф. Королев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Тема диссертационной работы относится к области радиофизики, оптоэлектроники и акустики, в частности, к области акустооптики. Известно, что уровень развития радиофизического знания является в настоящее время определяющим при оценке прогресса физической науки. Если рассматривать развитие отдельных направлений в радиофизике, то можно отметить, что успехи в области акустооптики, акустоэлектроники и оптоэлектроники в последнее время были обусловлены, например, тем, что для различных применений были созданы новые материалы с необычными свойствами. В частности, появились новые классы материалов, таких, как фотонные кристаллы, среды с негативной рефракцией и т.д., обладающие уникальными физическими характеристиками. Оказалось, что в этих средах распространение и отражение электромагнитных волн может происходить весьма необычным образом. Однако и в традиционных материалах микроэлектроники и оптоэлектроники, особенно в кристаллических средах, созданных в последние годы, могут наблюдаться необычные физические эффекты. Ожидается, что такие материалы в ближайшее время будут использованы в современных радиофизических и оптоэлектронных устройствах, а также в лазерной технике, оптике и спектроскопии для управления параметрами электромагнитного излучения.

Акустооптика исследует явление взаимодействия световых лучей с дифракционными решетками, индуцированными акустическими возмущениями. Подобное взаимодействие света и звука позволяет управлять основными параметрами светового луча. К главным достоинствам акустооптических методов управления светом относятся эффективность и быстродействие, а также широкие функциональные возможности акустооптических устройств. Благодаря акустооптическому взаимодействию также удается осуществить оптическую обработку информации, провести исследование особенностей распространения упругих волн в кристаллах, реализовать визуализацию акустических пучков и др.

Следует отметить, что развитие акустооптики стимулировано тем, что были синтезированы кристаллы с необычными физическими свойствами. Этими материалами были кристаллические среды с особым сочетанием оптических и акустических свойств. К новым акустооптическим материалам можно отнести кристаллы на основе теллура и ртути, например, парателлурит (TeO_2), каломель (Hg_2Cl_2), бромид ртути (Hg_2Br_2), йодид ртути (Hg_2I_2) и т.д. Особенностью новых

акустооптических материалов является сильная анизотропия их оптических и упругих свойств. При этом оказалось, что в новых материалах могут происходить необычные физические процессы и явления, не наблюдающиеся в изотропных и слабо анизотропных средах. Эти явления обусловлены оптической и акустической анизотропией кристаллов, которая проявляется в зависимости фазовой скорости волн от направления распространения в кристалле.

В двулучепреломляющих кристаллах оптическая анизотропия характеризуется величиной двулучепреломления $\Delta n = |n_e - n_o|$. В некоторых акустооптических материалах, например, в теллуре (Te), каломели (Hg_2Cl_2), бромиде ртути (Hg_2Br_2) относительное двулучепреломление достигает рекордной величины $\Delta n / n_o \approx 0.3 - 0.4$, а в сульфойодиде сурьмы (SbSI) двулучепреломление $\Delta n / n_o \approx 0.5$, в то время, как в большинстве известных материалов относительное двулучепреломление не превышает значения $\Delta n / n_o \leq 0.1$. Применение кристаллов с большим двулучепреломлением позволяет создавать акустооптические устройства с рекордными параметрами. Например, акустооптические фильтры, перспективные для применения в волоконно-оптических линиях связи.

До последнего времени в акустооптике под понятием “анизотропия” понималась лишь оптическая анизотропия материала, а анизотропия акустических свойств и связанные с ней особенности акустооптического взаимодействия во внимание практически не принималась. Такой подход не является оправданным, так как во многих акустооптических материалах акустической анизотропией в силу ее значительной величины пренебрегать нельзя. В диссертационной работе рассматриваются различные явления, связанные с распространением упругих акустических волн в кристаллических средах. Известно, что скорость распространения упругой волны определяется упругими свойствами среды, причем, значение скорости является индивидуальной характеристикой каждого вещества. В изотропных телах скорость не зависит от направления распространения, а анизотропия упругих свойств кристаллов проявляется в сильной зависимости значений скоростей акустических волн от направлений.

Известно, что скорость упругих волн в газообразной среде меньше, чем в жидкостях, а скорость акустических волн в жидкости меньше, чем в твердом теле. Оказалось, что в новых материалах акустооптики могут распространяться упругие волны с очень низким значением фазовой скорости. Например, в кристаллах парателлурифта минимальная скорость составляет $V = 616$ м/с. В каломели фазовая скорость сравнима со скоростью звука в воздухе $V = 347$ м/с. Более того, в йодиде ртути Hg_2I_2

минимальная скорость ультразвука $V = 254$ м/с оказывается даже ниже, чем в воздухе. Столь малые значения фазовой скорости упругих волн наблюдаются в кристаллах только вдоль отдельных направлений, причем небольшое изменение направления распространения волны в этих средах сопровождается резким возрастанием значения V .

Очевидно, что сильная зависимость скорости от направления распространения означает, что упругие волны в новых материалах распространяются с большими углами между фазовой и групповой скоростями. Анализ показывает, что угол акустического сноса между потоками энергии и волновым вектором звука может достигать величины $\psi = 70^\circ$ и более. Такая закономерность распространения упругих волн в твердом теле является весьма необычной и мало изученной.

Распространение упругих волн с большими углами между фазовой и групповой скоростями может сопровождаться рядом необычных физических эффектов. Например, в кристаллах возможно скользящее или наклонное падение звука на границу раздела “кристалл–вакуум”, при котором волна после отражения распространяется навстречу потоку энергии падающей волны. Возможность такой ситуации, в принципе, объясняется теорией упругости анизотропных сред. Однако последние исследования показали, что в парателлурите, каломели, а также и в некоторых других материалах подобное отражение происходит весьма необычно и выражено чрезвычайно ярко. Существуют и другие необычные эффекты, изучению которых посвящена данная диссертационная работа. Можно утверждать, что проведенные в рамках данной темы теоретические исследования позволили предсказать существование в кристаллах новых акустических и акустооптических эффектов. При этом рассматриваемые эффекты, обусловленные особенностями распространения упругих волн в кристаллах, не только интересны с точки зрения фундаментального знания, но и перспективны для использования в акустике, акустооптике и кристаллофизике, например, при создании акустооптических и акустоэлектронных устройств.

Цели диссертационной работы

Цели диссертационной работы состояли в изучении распространения и отражения упругих акустических волн в кристаллах, обладающих сильной анизотропией упругих свойств, а также в исследовании возможностей применения обнаруженных эффектов в акустооптике. В диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследование закономерностей распространения плоских объемных акустических волн в неограниченных кристаллических средах, обладающих большой анизотропией упругих свойств, и проведение сравнительного анализа характеристик таких волн в средах с различной степенью упругой анизотропии.
2. Изучение явления отражения плоских акустических волн в тетрагональных кристаллах с большой упругой анизотропией в случае скользящего падения ультразвуковой волны на плоскую свободную границу раздела кристалл-вакуум.
3. Исследование отражения акустических волн при наклонном падении плоской объемной упругой волны на свободную границу раздела кристалл-вакуум в кристалле парателлурита.
4. Рассмотрение возможностей применения особых режимов отражения акустических волн в новых модификациях акустооптических и акустоэлектронных устройств, например, в перестраиваемых фильтрах.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлены особенности распространения продольных и сдвиговых акустических волн в новых материалах акустооптики, в которых углы акустического сноса достигают 70° и более градусов, а также впервые проведен сравнительный анализ особенностей распространения плоских объемных акустических волн в кристаллах с различной степенью анизотропии упругих свойств. Показано, что большая упругая анизотропия среды приводит к резким изменениям углов акустического сноса энергии и ориентации вектора поляризации в зависимости от направления распространения акустической волны.
2. Впервые проведен анализ отражения акустических волн в случае скользящего и наклонного падения упругих волн на границу раздела кристалл-вакуум в сильно анизотропных тетрагональных кристаллах. Определены углы между энергетическими потоками падающей и двух отраженных волн, а также рассчитаны энергетические коэффициенты отражения. Обнаружено существование близкого к обратному и строго обратного отражения акустической волны от границы кристалла, при котором энергия падающей волны полностью преобразуется в отраженную волну. Показано, что с увеличением степени акустической анизотропии уменьшается минимальный угол между потоками энергий падающей и отраженной волн, а также растет доля энергии в обратно отраженной волне.
3. Доказана возможность использования материалов с большой анизотропией упругих свойств в новых модификациях акустооптических приборов. Показано, что новые кристаллы

перспективны для использования в перестраиваемых акустооптических фильтрах с коллинеарным направлением распространения потоков энергии световых и звуковых пучков, а также в акустоэлектронных линиях задержки. Предложены новые модификации акустооптических и акустоэлектронных приборов, в которых акустическая анизотропия среды позволяет улучшить их характеристики и реализовать в них новые типы дифракции.

Практическая значимость диссертационной работы:

Исследованные новые физические эффекты могут быть использованы в акустооптических и акустоэлектронных приборах новых поколений, например, в перестраиваемых квазиколлинеарных акустооптических фильтрах с коллинеарным направлением распространения световых и звуковых пучков, акустических линиях задержки, акустооптических модуляторах, дефлекторах и других приборах. Использование обратного отражения упругой волны позволяет повысить плотность акустической мощности в отраженной акустической волне и уменьшить величину управляющей акустической и электрической мощности в акустооптических ячейках. Применение в новых приборах кристаллов с большой упругой анизотропией позволит улучшить эффективность работы оптоэлектронных и акустоэлектронных систем, а также уменьшить их габариты и стоимость.

Положения, выносимые на защиту:

1. В кристаллах, обладающих ярко выраженной анизотропией упругих свойств, при скользющем, а также наклонном падении и последующем отражении плоских объемных акустических волн от границы раздела “кристалл-вакуум” может наблюдаться распространение энергетического потока отраженной волны навстречу потоку падающей волны. Причиной подобного необычного распространения волн в кристаллических соединениях теллура и ртути является анизотропия упругих свойств среды распространения.
2. Коэффициент отражения энергии при распространении акустической волны от свободной границы раздела в обратном направлении близок к 100% в широком интервале углов среза и углов падения. Максимальный коэффициент отражения 100% наблюдается в кристаллах при углах Брюстера, а также в интервале углов, определяемом критическими углами. Вблизи критических углов среза предсказано резкое изменение коэффициентов отражения волн.
3. Предсказанный и зарегистрированный в акустооптическом эксперименте эффект обратного отражения энергии акустических волн от свободной границы раздела “кристалл-вакуум” наиболее ярко

проявляется в средах, обладающих сильной анизотропией упругих свойств. Использование обнаруженных особенностей распространения упругих волн в анизотропных средах позволяет создать принципиально новые конфигурации акустооптических устройств.

Апробация диссертационной работы:

По результатам проведенных исследований были сделаны доклады на 14 международных конференциях в России и за рубежом (Польша, Франция, Китай): Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2002» (Москва, 2002), Международная конференция “EFTF’02 - 16-th European Frequency and Time Control”(Санкт-Петербург, 2002), Международная конференция “16-th International Symposium on Nonlinear Acoustics” (Москва, 2002), Международный оптический конгресс «Оптика-XXI век» (Санкт-Петербург, 2002), Симпозиум Европейской Акустической ассоциации, “32-nd Winter School on Molecular and Quantum Acoustics” (Szczyrk, Poland, 2003), Международный конгресс по ультразвуку “5-th World Congress on Ultrasonics WCU 2003” (Paris, France, 2003), Девятая Школа по Акустооптике Европейской Акустической ассоциации “9-th School on Acousto-Optics at the European Acoustic Association” (Gdansk, Poland, 2004), Международная конференция для молодых исследователей ”Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems” (Санкт-Петербург, 2004), Международный конгресс по Оптике и Оптоэлектронике, “Optics and Optoelectronics-2005” (Warsaw, Poland, 2005), Международный конгресс по ультразвуку “World Congress on Ultrasonics (WCU-2005)” (Beijing, China, 2005), Зимняя школа “35-th Winter School on Wave and Quantum Acoustics” (Ustron, Poland, 2006), Научная конференция “Ломоносовские чтения” (Москва, 2006), Десятая Всероссийская научная школа-семинар "Волны - 2006" (Звенигород, 2006), IX Международная конференция для молодых исследователей “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine” (Санкт-Петербург, 2006).

По материалам диссертации были сделаны доклады в Акустическом институте РАН им. Н.Н.Андреева, на семинарах кафедры Акустики и кафедры Физики колебаний физического факультета МГУ, а также на семинарах группы «Оптоэлектроники и оптической обработки информации» этой кафедры. По результатам исследований опубликовано 10 статей, а также 20 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы

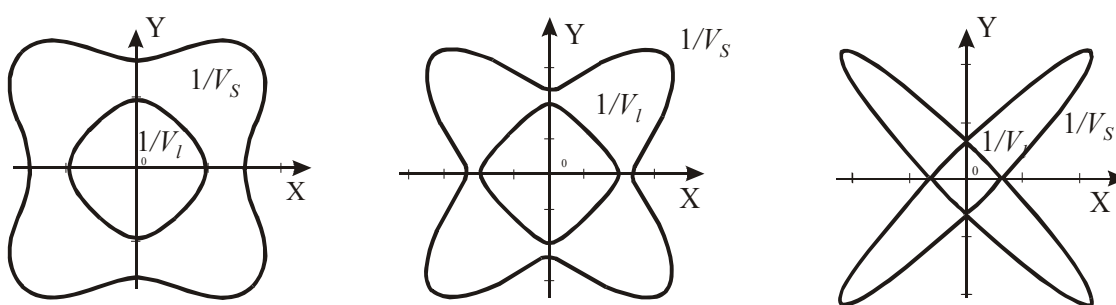
Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 171 страницу. Диссертация включает 65

рисунков и 8 таблиц. Библиография содержит 177 наименований, в том числе 30 авторских публикаций.

Содержание работы

Во введении содержится обоснование актуальности проводимых исследований, излагаются цели диссертационной работы и ее наиболее важные результаты. Здесь также, отмечаются новизна и практическая значимость проведенных исследований, приводятся сведения об апробации результатов работы.

В Главе 1 кратко представлены основные положения динамической теории упругости, а также рассмотрено ее применение к кристаллическим средам с различной степенью упругой анизотропии. Исследуется распространение упругих волн в кристаллических средах, относящихся к тетрагональной сингонии, и проводится сравнительный анализ основных характеристик акустических волн. Сравнительный анализ в рамках настоящей работы проводился как для хорошо известных материалов, таких, как титанат бария и рутил, так и для относительно новых кристаллов, представляющих интерес для акустооптики, например, парателлурита каломели, бромид и йодида ртути. Решение уравнения Кристоффеля ($\Gamma_{il}^0 u_l = \rho V^{20} u_i$, где $\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_j n_k$ - тензор Кристоффеля, $^0 u_l$ - вектор поляризации волны, c_{ijkl} - матрица коэффициентов упругости, n_l - направление нормали к волновому фронту волны, V - ее фазовая скорость) позволило найти скорости и векторы поляризации, являющиеся соответственно собственными значениями и собственными векторами тензора Кристоффеля. Рассчитаны поверхности обратных скоростей акустических волн в плоскостях (001) и ($\bar{1}\bar{1}0$) тетрагональных материалов.



Титанат бария

Рутил

Парателлурит

Рис. 1. Общий вид поверхностей акустических медленностей в тетрагональных материалах

Известно, что значение фазовой скорости ультразвука в акустооптических кристаллах вдоль отдельных направлений составляет малую величину, сравнимую со значением фазовой скорости звука в воздухе. Например, в

йодиде ртути величина фазовой скорости оказалась равной $V = 245$ м/с. Более того, в кристаллах парателлурита и соединениях ртути скорость ультразвуковых волн значительно меняется с изменением направления распространения ультразвука. Это иллюстрирует рисунок 1. Расчеты показывают, что параметр анизотропии r в этих средах велик. В зависимости от направления отношение скоростей для медленной акустической моды в парателлурите достигает величины $r = 4.9$. Рекордно большая упругая анизотропия характерна для плоскости (001) рассмотренных тетрагональных кристаллов, в то время как в плоскости ($\bar{1}\bar{1}0$) параметр анизотропии оказывается несколько меньше $r < 3.0$.

Определена ориентация вектора поляризации в зависимости от направления распространения акустической волны в плоскостях (001) и ($\bar{1}\bar{1}0$) тетрагональных материалов. Показано, что с увеличением степени анизотропии тетрагонального материала r растет отличие поляризационных характеристик акустических мод в тетрагональном кристалле по сравнению с характеристиками соответствующих акустических мод в слабоизотропных материалах.

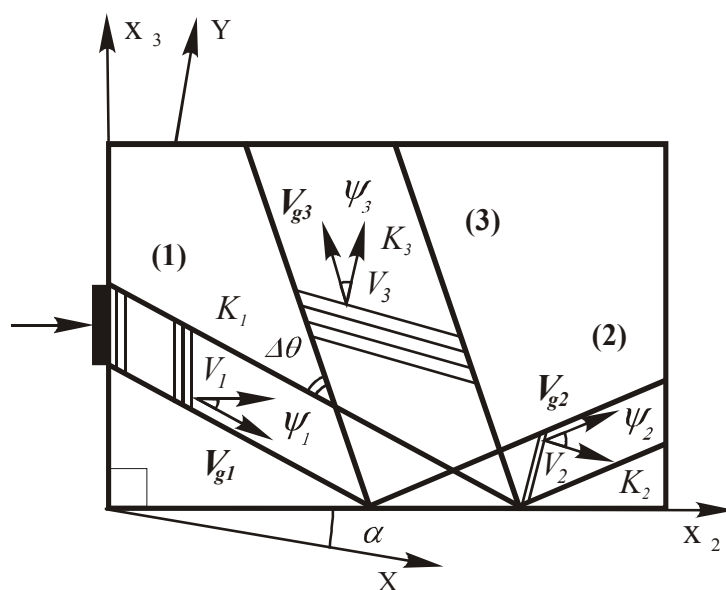


Рис. 2. Распространение и отражение акустических волн в случае скользящего падения

Рассчитана величина угла акустического сноса в тетрагональных материалах акустооптики. Ранее было показано, что максимальный снос акустической энергии наблюдается в плоскости (001) кристаллов, причем в этой плоскости угол акустического сноса может быть исключительно большим: в кристалле парателлурита максимальное значение угла сноса достигает величины $\psi = 74^{\circ}$, а в кристаллических соединениях ртути угол сноса может превышать $\psi \geq 70^{\circ}$. В рассмотренных материалах величина максимального угла сноса увеличивается с ростом параметра анизотропии.

Глава 2 посвящена исследованию поведения объемных акустических волн при отражении от границы раздела кристалл-вакуум в случае скользящего падения в плоскости (001) кристалла, когда волновой вектор падающей волны направлен параллельно поверхности раздела. Скользящее падение звука и последующее отражение показано на рисунке 2. Обнаружено, что в указанном случае наблюдаются две отраженные квазипоперечные волны (2) и (3), причем групповая скорость одной из волн направлена практически навстречу энергии падающей волны (1). Это приводит к тому, что групповая скорость отраженной волны (3) составляет угол $\Delta\theta$ в несколько градусов с групповой скоростью падающей волны (1). Показано, что причиной такого необычного поведения волн является сильная акустическая анизотропия материала.

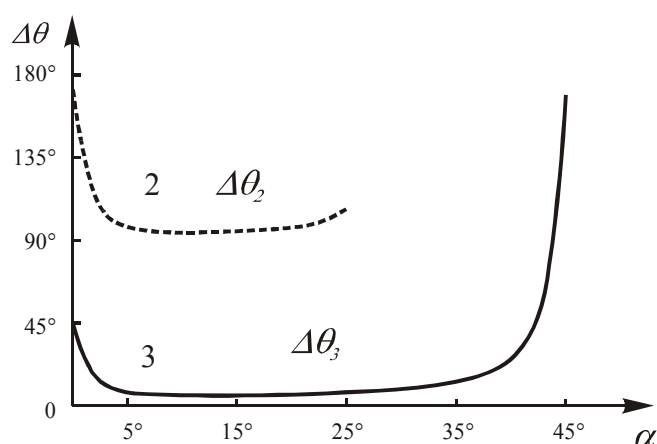


Рис. 3. Зависимость угла пространственного разделения пучков от угла среза в кристалле парателлурита в плоскости XY

В случае скользящего падения упругой волны рассчитан угол пространственного разделения пучков $\Delta\theta$, образованный энергетическими потоками падающей и отраженной волн в зависимости от угла среза материала α . Получены зависимости для различных материалов, принадлежащих к тетрагональной сингонии и отличающихся степенью анизотропии. Пример такой зависимости для случая падения квазипоперечной волны показан на рисунке 3. Было найдено, что минимальный угол пространственного разделения пучков (2) и (3) наблюдается в парателлурите и составляет величину $\Delta\theta = 5.3^\circ$, что позволяет определить отражение энергии волны как близкое к обратному.

Обнаружено, что величина угла между энергетическими потоками падающей и отраженной волн связана с величиной параметра анизотропии материала r . Показано, что чем сильнее анизотропия материала, тем меньше минимальный угол пространственного разделения пучков. В кристаллах, обладающих слабой анизотропией упругих свойств, например,

в титанате бария, значение этого угла велико и составляет величину $\Delta\theta = 73^0$, что не позволяет назвать подобное отражение обратным.

Проведен расчет энергетических коэффициентов отражения f в тетрагональных материалах. Энергетические коэффициенты отражения представляют собой отношение нормальных составляющих энергетических потоков отраженной и падающей волн $f^{(S_1)} = F_3^{(S_1)}/F_3^{(I)}$ и $f^{(S_2)} = F_3^{(S_2)}/F_3^{(I)}$. Применение условий непрерывности напряжений на границе раздела, составляющей угол среза α с кристаллографической осью X, позволяют найти коэффициенты отражения энергии. Выражения, записанные в граничной системе координат, были преобразованы в выражения, связанные с кристаллографической системой координат, поскольку обычно значения констант упругости определены только для системы координат, связанной с кристаллом. В результате вычислений была проведена оценка значений коэффициентов отражения в случае скользящего падения волны в зависимости от угла среза материала α . Исследован случай скользящего падения медленной и быстрой волн в плоскости XY для различных акустических кристаллов. Произведен количественный анализ доли энергии в обратно отраженной волне для различных кристаллических материалов. Оказалось, что в материалах с сильной анизотропией энергия обратно отраженной волны может быть близка к 100% в широком интервале углов среза.

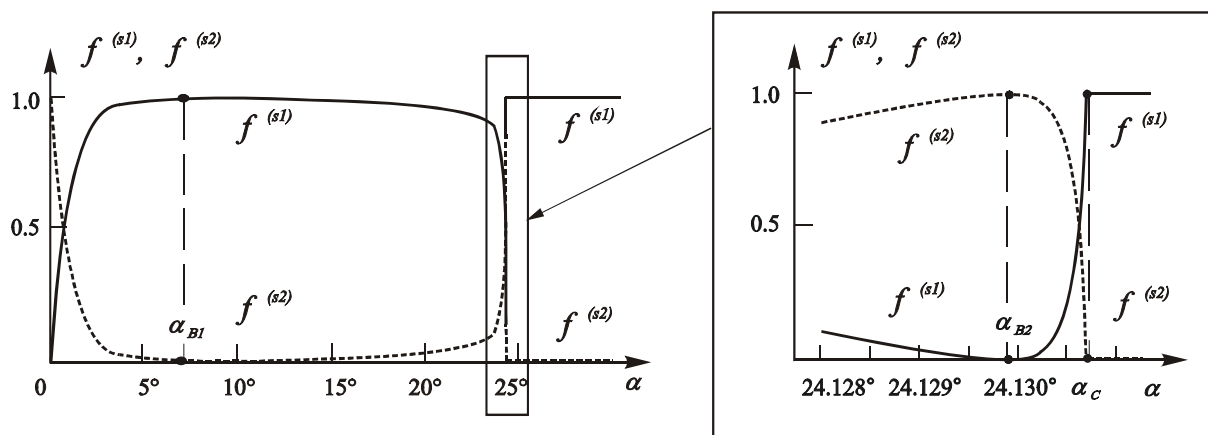


Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения от угла среза в кристалле парателлурита в плоскости XY

Предсказано существование углов Брюстера, при которых энергия падающей волны полностью преобразуется в энергию одной из отраженных волн. В кристалле парателлурита максимальный коэффициент отражения, равный 100%, наблюдается для обратно отраженной волны при угле среза $\alpha_{B1} = 7.4^0$ и при $\alpha_{B2} = 24.130^0$ для обыкновенно отраженной

волны. Зависимости коэффициентов отражения от угла среза в плоскости ХУ парателлурита показаны на рисунке 4.

Найдено критическое значение угла среза парателлурита $\alpha_C = 24.131^0$, при превышении которого $\alpha > \alpha_C$ существует только одна необыкновенно отраженная волна. Анализ акустического отражения в других материалах показал, что в анизотропных средах значения критического угла при скользющем падении значительно превышают значения аналогичных величин в слабо анизотропных средах. Этот вывод диссертационной работы подтверждается данными таблицы 1.

Таблица 1. Параметры обратно отраженной волны в зависимости от степени анизотропии при скользющем падении и отражении в тетрагональных материалах

Материалы	Параметр анизотропии $r = V_{max} / V_{min}$	Минимальный угол разделения потоков энергии $\Delta\theta_{min}$	Критический угол φ_C	Максимальный коэффициент отражения $f_{3\ max}$
Титанат бария	1.52	72.8^0	9.7^0	3%
Рутил	2.0	38.6^0	14.3^0	43%
Бромид ртути	4.4	7.2^0	23.7^0	96%
Каломель	4.7	9.7^0	22.3^0	93%
Йодид ртути	4.9	5.6^0	24.6^0	97%
Парателлурит	5.0	5.3^0	24.13^0	100%

Доказано, что угол Брюстера, соответствующий случаю, когда вся энергия сосредоточена в обратно отраженной волне, из рассмотренных в работе кристаллов существует только в кристалле парателлурита. Расчет также доказал, что в слабо анизотропных кристаллах коэффициент отражения для аномально отраженной волны составляет несколько процентов, в то время как в сильно анизотропных средах он приближается к 100%. Выявлена общая закономерность увеличения доли энергии в обратно отраженной волне с увеличением параметра анизотропии материала.

В Главе 3 изучены различные случаи наклонного падения плоской объемной звуковой волны на границу раздела “кристалл-вакуум” в парателлурите, когда волновой вектор исходной волны составляет произвольный угол θ с нормалью к границе раздела. Рассчитаны зависимости угла пространственного разделения падающего и отраженного пучков $\Delta\theta$ в зависимости от угла падения θ в плоскости ХУ для различных значений угла среза α , лежащих в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 45^0$. Показано, что в отличие от случая скользющего падения, при наклонном

падении квазипоперечной волны могут отражаться как две поперечные, так и продольная и поперечная волны.

При наклонном падении исследуется отражение в парателлурите, когда энергетический поток отраженной волны направлен строго навстречу групповой скорости падающей волны. Определены значения угла падения, при котором волна отражается строго назад. Предсказано, что существуют интервалы углов падения, когда отраженная волна распространяется практически назад, причем ширина этих интервалов достигает нескольких десятков градусов. Проведенные расчеты доказывают, что для некоторых значений углов падения наблюдается только лишь одна отраженная поперечная волна, в то время как продольная волна отсутствует. Также возможна ситуация, когда энергетические потоки отраженных волн совпадают, а направления их волновых векторов различаются значительно.

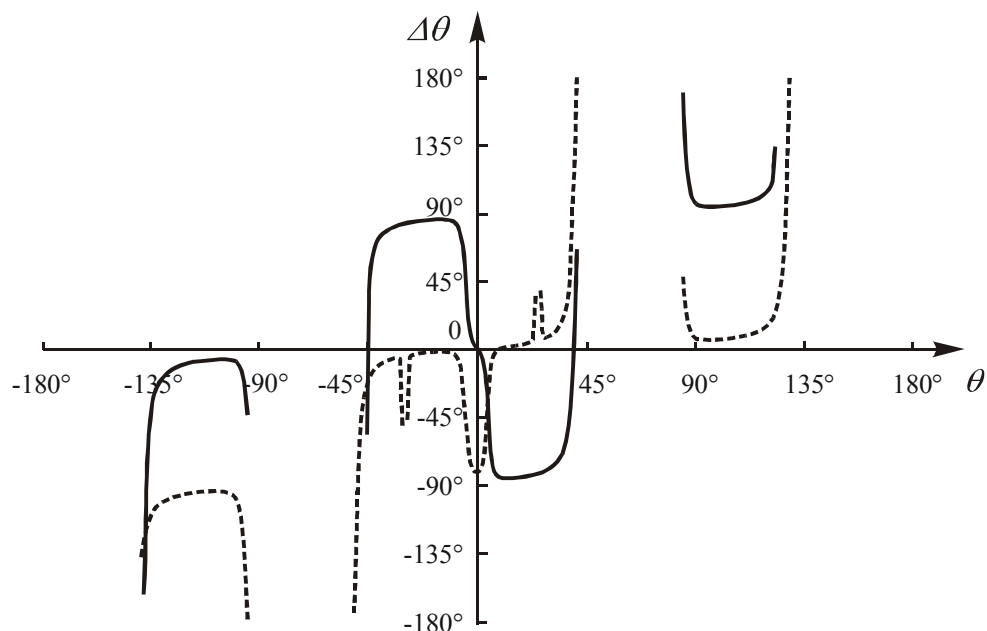


Рис. 5. Зависимость угла разделения отраженных пучков от угла падения звука в случае наклонного падения в плоскости XY

Показано, что потоки энергии отраженных волн могут распространяться по разные стороны относительно энергии падающей волны, причем одна из отраженных волн распространяется предсказуемо, в то время как другая волна направлена практически навстречу падающей волне. Рассмотрение зависимостей $\Delta\theta(\theta)$ для различных значений угла α позволило проанализировать особенности всех возможных случаев наклонного падения. Один из случаев отражения $\Delta\theta(\theta)$ показан на рисунке 5.

Рассчитаны зависимости коэффициентов отражения от угла падения в случае наклонного падения. Анализ проводился аналогично тому, как это

было выполнено в главе 2 для случая скользящего падения. Определено, каким образом перераспределяется энергия из падающей упругой волны в одну или две отраженные моды. Показано, что, как и в случае скользящего падения, существуют углы падения θ , при которых практически вся энергия из падающей волны перераспределяется в волну, отражающуюся либо строго назад, либо под малым углом к исходной волне. При наклонном падении и последующем отражении в кристаллах существуют углы Брюстера и критические углы. При этих углах энергетический коэффициент одной из волн при фиксированном угле падения достигает 100%. Также возможно отражение, когда единственная отраженная волна существует в широком интервале углов падения.

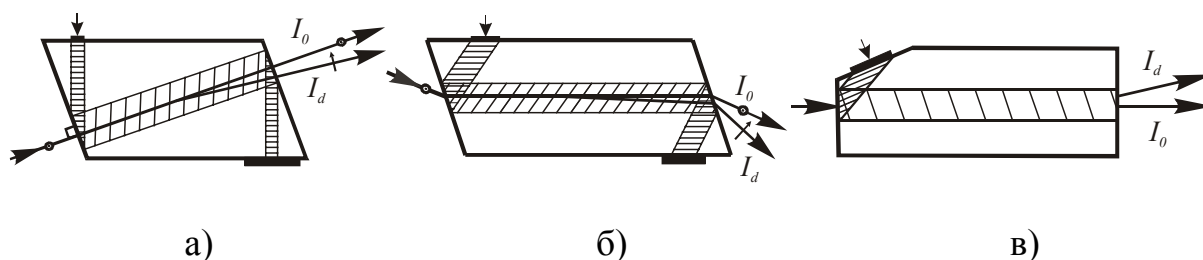


Рис. 6. Схемы квазиколлинеарных фильтров

- а) нормальное падение света и уширение сечения акустического столба
- б) наклонное падение света и сохранение сечения акустического столба
- в) нормальное падение света и сохранение сечения акустического столба

Глава 4 посвящена изучению возможностей применения явления обратного отражения упругих волн в акустооптических и акустоэлектронных устройствах новых типов. Например, исследованы новые возможности применения акустического отражения в акустооптике, позволяющего уменьшить величину управляющей акустической мощности в акустооптических квазиколлинерных фильтрах, а также решить проблему ввода-вывода оптического излучения из кристалла. Показано, что использование отражения звука в анизотропных средах позволяет повысить эффективность дифракции, снизить оптические потери в приборах и уменьшить их габариты.

На рисунке 6 показаны некоторые схемы акустооптических фильтров, в которых используется отражение акустических волн. Предложена схема фильтра, в котором акустооптическое взаимодействие происходит в плоскости $(1\bar{1}0)$, а медленная сдвиговая волна отражается ортогонально оптической грани кристалла парателлуриата. Доказано, что подобное отражение в фильтре наблюдается при угле среза кристалла $\alpha = 70.5^\circ$, при этом свет вводится в звуковой столб нормально оптической грани. Это позволяет оптимизировать схему фильтра, повысить

эффективность его работы и уменьшить влияние оптической дисперсии среды на характеристики прибора.

Рассчитаны характеристики акустооптической ячейки на кристалле парателлурита, использующей преобразование продольной акустической моды вдоль оси $[\bar{1}\bar{1}0]$ в сдвиговую волну вдоль $[110]$. Общая схема отражения в кристалле парателлурита показана на рисунке 7. Определен угол наклона акустической грани кристалла равный $\mu = 81.8^\circ$ и обеспечивающий реализацию подобного преобразования акустических мод. Предсказано, что коэффициент отражения акустической энергии в рассматриваемой акустооптической ячейке составляет значительную величину $f^{(S)} = 89\%$.

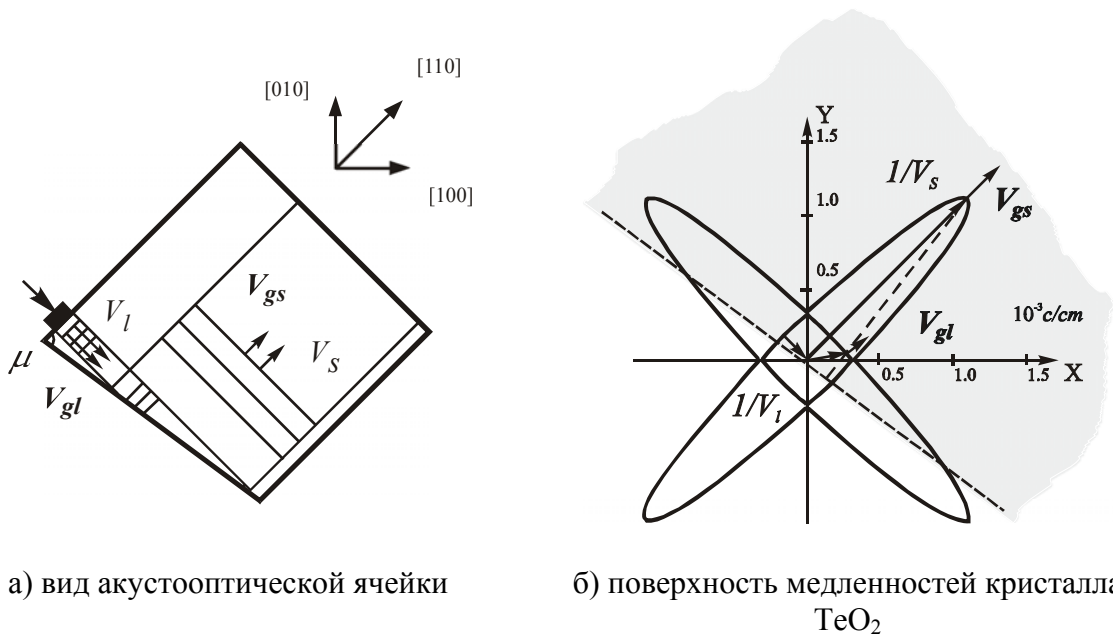


Рис.7 Преобразование продольной акустической волны в медленную поперечную волну вдоль оси $[110]$ парателлурита

Предложена конфигурация акустооптической ячейки с акустическим отражением в плоскости XY , при котором отраженная волна распространяется с максимальным углом акустического сноса, равным 74° , и максимальным коэффициентом отражения звука, составляющим 100%. Доказано, что в предложенной ячейке реализуется ранее не известный режим акустооптического взаимодействия, который может быть определен как “смешанный”, т.е. с неколлинеарной дифракцией падающего на ячейку света и коллинеарным взаимодействием дифрагированного луча, когда дифрагированный луч коллинеарен звуковому столбу. Один из вариантов реализации “смешанного” типа акустооптического взаимодействия представлен на рисунке 8.

В работе осуществлено экспериментальное подтверждение существования явления близкого к обратному отражения энергии упругой

волны в кристалле парателлуриата. Акустооптическими методами визуализации акустических полей исследован один из вариантов скользящего падения ультразвука на свободную границу раздела “кристалл-вакуум”. Измерены величины фазовых и групповых скоростей в кристалле, а также угол пространственного разделения падающего и отраженного звуковых пучков. В эксперименте зарегистрировано, что величина угла между потоками энергии равна $\Delta\theta = 4^\circ$, при расчетном значении $\Delta\theta = 7.2^\circ$. Тем самым экспериментально доказано существование эффектов обратного отражения акустических волн в средах с большой анизотропией упругих свойств.

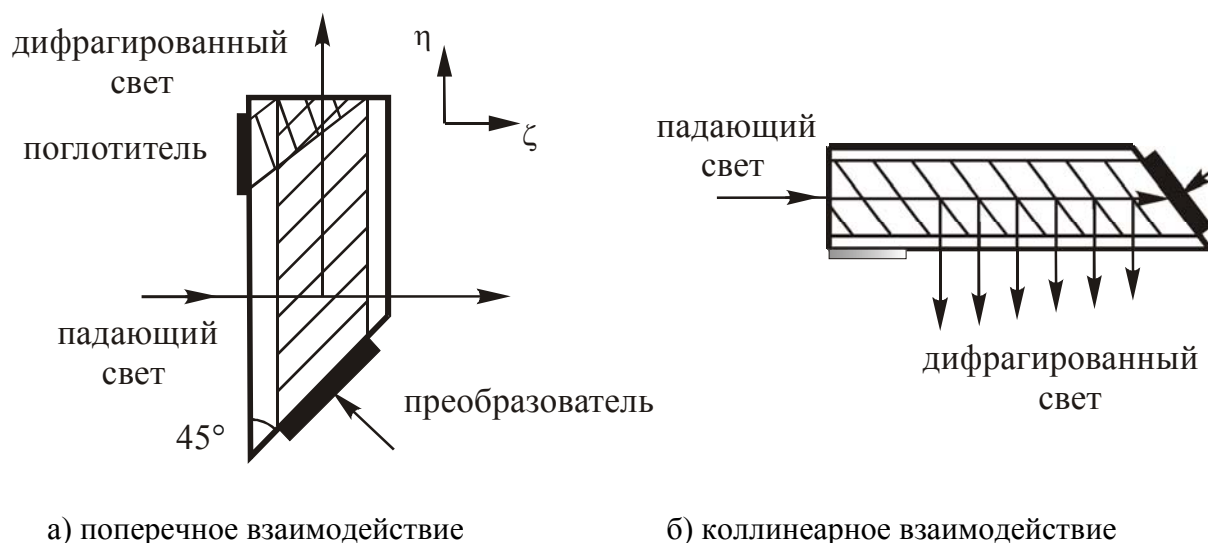


Рис. 8. Схема ячейки, реализующий смешанный тип акустооптического взаимодействия

В заключении кратко сформулированы основные результаты проведенных исследований и сформулированы выводы диссертационной работы:

1. Исследован ранее неизвестный случай отражения объемных акустических волн от свободной и плоской границы раздела кристалл-вакуум при скользящем падении упругой волны на поверхность кристалла. Обнаружено, что сильная анизотропия упругих свойств материалов приводит к необычному, т.е. близкому к обратному отражению упругих волн, при котором поток энергии отраженной волны распространяется практически навстречу падающему потоку энергии. Показано, что минимальный угол между энергетическими потоками падающей и отраженной волн в соединениях ртути и теллура не превышает нескольких градусов. Доказано, что близкое к обратному отражение акустических волн легко реализуется в эксперименте и наблюдается в широком интервале значений углов среза материалов.

2. Показано, что при скользящем падении в анизотропной среде энергия падающей волны эффективно преобразуется в энергию обратно отраженной волны. Доказано, что с ростом акустической анизотропии доля энергии в обратной волне увеличивается. В кристалле парателлурита коэффициент отражения достигает максимального значения равного 100%, в то время как в средах с умеренной анизотропией доля энергии в обратно отраженной волне не превышает нескольких процентов.
3. Для случая скользящего падения предсказано существование углов Брюстера, при которых коэффициент отражения одной из волн достигает 100%, а также критического угла среза, при превышении которого наблюдается только одна отраженная волна. Найдено, что значение критического угла увеличивается с ростом анизотропии материала, причем в соединениях теллура и ртути критический угол достигает рекордной величины $\alpha_c = 20^\circ - 24^\circ$, тогда как в известных слабоанизотропных материалах он не превышает нескольких градусов.
4. Рассмотрен случай наклонного падения акустической волны на границу раздела в кристалле парателлурита. Показано, что при наклонном падении реализуется отражение энергии волны строго в обратном направлении. Найдены режимы отражения, в которых энергетические потоки отраженных волн совпадают, в то время как, их волновые векторы направлены в разные стороны. Найдено, что энергия падающей волны может быть направлена по нормали к границе раздела, в то время как отраженные потоки лежат по разные стороны от исходной волны.
5. Рассчитаны энергетические коэффициенты отражения в случае наклонного падения звука на границу раздела в кристалле парателлурита. Обнаружено, что при обратном отражении, как и в случае скользящего падения, энергетический коэффициент отражения может быть близок к 100%. Найдены углы Брюстера, соответствующие 100% преобразованию энергии в обратно отраженную волну, а также критические углы, при которых существует только одна отраженная волна.
6. Показано, что необычное отражение акустических волн может быть использовано при создании новых оптоэлектронных и акустоэлектронных устройств на основе кристаллов TeO_2 , Hg_2Cl_2 , Hg_2Br_2 и Hg_2I_2 . Предложены новые конфигурации акустооптических ячеек и фильтров с квазиколлинеарным режимом дифракции, в которых используется явление отражения упругой волны от границы раздела кристалл-вакуум. Доказано, что применение кристаллов с большой

акустической анизотропией позволяет снизить управляющую акустическую мощность, повысить эффективность дифракции, упростить ввод и вывод светового излучения из ячеек фильтров, а также уменьшить габариты устройств.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Поликарпова Н.В.** Распространение и Отражение Упругих Волн в Плоскости XY Парателлурифта и Каломели. // *Тез. докл. Межд. конф. "Ломоносов-2002"*, МГУ, Москва, Россия, с.117-118, 2002.
2. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Elastic Properties of Anisotropic Acousto-Optic Crystals Tellurium Dioxide and Calomel. // *Preliminary Program and Abstracts "16-th European Frequency and Time Forum EFTF'02"*, St.-Petersburg, Russia, p. 85, 2002.
3. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Elastic Properties of Anisotropic Acousto-Optic Crystals Tellurium Dioxide and Calomel. // *Proc. of EFTF'02 16-th European Frequency and Time Forum*, St.-Petersburg, Russia, p. C-134 – C-137, 2002.
4. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Bulk Acoustic Waves Backward Reflection in Acousto-Optic Materials Paratellurite and Calomel. // *Abstracts 16-th Int. Symp. on Nonlinear Acoustics*, Moscow, Russia, p. 200, 2002.
5. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Bulk Acoustic Waves Backward Reflection in Acousto-Optic Materials Paratellurite and Calomel. - in *"Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21- th Century"*. / Ed. by Rudenko O.V., Moscow State Univ., Moscow, Russia, v.2, p. 889-892, 2002.
6. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Close to Collinear Acousto-Optic Filters Applying Elastic Anisotropy of Paratellurite Single Crystal. // *Тез. Докл. Межд. Опт. конгресса "Оптика XXI-века"*, Сборник трудов, Санкт-Петербург, Россия, с.143-144, 2002.
7. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Collinear Tunable Acousto-Optic Filters Applying Acoustically Anisotropic Material Tellurium Dioxide. // *Journal of Molecular and Quantum Acoustics*, v. 24, p.225-235, 2003.
8. **Voloshinov V.B. and Polikarpova N.V.** Application of Acousto-Optic Interactions in Anisotropic Media for Control of Light Radiation. // *Acustica-Acta Acustica*, v. 89, p. 930-935, 2003.

9. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Reflection of Plane Elastic Waves in Acousto-Optic Crystal Tellurium Dioxide. // *Abstracts 5-th World Congress on Ultrasonics WCU 2003*, Paris, France, p. 8, 2003.
10. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Reflection of Plane Elastic Waves in Acousto-Optic Crystal Tellurium Dioxide. // *Proc. 5-th World Congress on Ultrasonics WCU 2003*, Paris, France, p. 9-12, 2003.
11. **Blomme E., Voloshinov V., Polikarpova N. and Tchernyatin A.** Intermediate Regime of Light Diffraction in Crystals with Strong Elastic Anisotropy. // *Abstracts 5-th World Congress on Ultrasonics WCU 2003*, Paris, France, p. 45-46, 2003.
12. **Blomme E., Voloshinov V., Polikarpova N. and Tchernyatin A.** Intermediate Regime of Light Diffraction in Crystals with Strong Elastic Anisotropy. // *Proc. 5-th World Congress on Ultrasonics WCU 2003*, Paris, France, p. 333-336, 2003.
13. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Intensity of Reflected Acoustic Waves in Acousto-Optic Crystal Tellurium Dioxide. // *Archives of Acoustics, Warszawa, Poland*, v.29, N 3, p.508, 2004.
14. **Zakharov A.V., Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Calculation of Light Intensities in Intermediate Regime of Light Diffraction. // *Preliminary Program and Abstracts of the VII International Conference for Young Researchers Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems*, St.-Petersburg, Russia, p. 20-21, 2004.
15. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Peculiarities of Reflection of Quasi-Shear and Quasi-Longitudinal Elastic Waves in Tellurium Dioxide Single Crystal. // *Preliminary Program and Abstracts of the VII International Conference for Young Researchers Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems*, St.-Petersburg, Russia, p. 107-108, 2004.
16. **Polikarpova N.V. and Voloshinov V.B.** Intensity of Reflected Acoustic Waves in Acousto-Optic Crystal Tellurium Dioxide. // *Proc. SPIE*, v. 5828, p. 25-36, 2004.
17. **Волошинов В.Б., Макаров О.Ю., Поликарпова Н.В.** Близкое к обратному отражение упругих волн в акустооптическом кристалле парателлурита. // *Письма в ЖТФ*, том 31, № 8, с. 79-87, 2005.
18. **Polikarpova N.V., Voloshinov V.B.** Glancing Incidence and Back Reflection of Elastic Waves in Tetragonal Crystals. // *Abstracts of International Congress on Optics and Optoelectronics*, Warsaw, Poland, p.116, 2005.

19. **Zakharov A.V., Polikarpova N.V. and Blomme E.** Intermediate Regime of Light Diffraction in Media with Strong Elastic Anisotropy. // *Abstracts of International Congress on Optics and Optoelectronics*, Warsaw, Poland, p.116, 2005.
20. **Polikarpova N.V., Voloshinov V.B.** Glancing Incidence and Back Reflection of Elastic Waves in Tetragonal Crystals. // *Proc. SPIE*, v. 5953, p. 0C1-0C12, 2005.
21. **Zakharov A.V., Polikarpova N.V., Blomme E.** Intermediate Regime of Light Diffraction in Media with Strong Elastic Anisotropy. // *Proc. SPIE*, v. 5953, p. 0D1-0D10, 2005.
22. **Declercq N.F., Polikarpova N.V., Voloshinov V.B.** Enhanced Anisotropy in Paratellurite for Inhomogeneous Waves and its Possible Importance in the Future Developments of Acousto-Optic Devices. // *Program and Paper Abstracts of World Congress on Ultrasonics - Ultrasonics International*, Beijing, China, p.100, 2005.
23. **Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В., Можяев В.Г.** Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в сильно анизотропных кристаллах. // *Акустика неоднородных сред, Ежегодник Российского акустического общества, Сборник трудов научной школы проф. С.А.Рыбака, выпуск 6*, с. 61-68, 2005.
24. **Polikarpova N.V.** Inclined Incidence of Acoustic Waves on a Free Boundary in Acousto-Optic Crystal Paratellurite. // *Abstracts of 35-th Winter School on Wave and Quantum Acoustics*, Ustorn, Poland, p.53, 2006.
25. **Polikarpova N.V.** Inclined Incidence of Acoustic Waves on a Free Boundary in Acousto-Optic Crystal Paratellurite. // *Archives of Acoustics*, Warszawa, Poland, v.31, N 1, p.130, 2006.
26. **Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В., Можяев В.Г.** Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в сильно анизотропных кристаллах. // *Сборник тезисов докладов, научная конференция "Ломоносовские чтения"*, МГУ, Москва, Россия, с. 49-51, 2006.
27. **Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В., Можяев В.Г.** Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в кристалле парателлурита. // *Акустический журнал*, т. 52, №3, с.1-9, 2006.
28. **Поликарпова Н.В., Волошинов В.Б.** Распространение и отражение объемных акустических волн в сильно анизотропных кристаллах. //

Труды школы-семинара “Волны-2006”, Звенигород, Россия, с. 30-32, 2006.

29. **Polikarpova N.V., Voloshinov V.B.** Inclined Incidence and Reflection of Acoustic Waves in Crystals with Strong Anisotropy. // *Сборник докладов, IX международной конференции для молодых исследователей*, Санкт-Петербург, Россия, с. 36, 2006.
30. **Polikarpova N.V., Declercq N.F.** Inclined Incidence and Back Reflection of Bulk Acoustic Waves in Crystals // *Abstracts 36-th Winter School on Wave and Quantum Acoustics*, Gliwice, Poland, 2007.