На правах рукописи

Никитин Павел Алексеевич

ОСОБЕННОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

Специальность 01.04.03 —
«радиофизика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Научный руководитель: **Волошинов Виталий Борисович**
к.ф.-м.н., доцент кафедры физики колебаний физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **Котов Владимир Михайлович,**
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории быстропротекающих оптических явлений в твердотельных структурах Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Перчик Алексей Вячеславович,
к.т.н., доцент кафедры РЛ-2 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Защита состоится «___» _____ 2017 года в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.67 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2, физический факультет, центральная физическая аудитория им. Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова и на сайте физического факультета на странице диссертационного совета Д 501.001.67
http://www.phys.msu.ru/rus/research/disser/sovet-D501-001-67/

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 501.001.67,
к.ф.-м.н., доцент Королёв Анатолий Фёдорович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Акустооптическое (АО) взаимодействие широко применяется для управления такими параметрами электромагнитного излучения, как направление распространения, интенсивность, поляризация, частота и фаза. Благодаря простоте управления, компактности, малой потребляемой мощности и высокому быстродействию АО устройства используются в спектроскопии, оптической связи, системах обработки изображений, лазерной технике для модуляции, фильтрации и управляемого отклонения световых пучков [**1**–**4**]. К настоящему времени разработаны АО устройства, эффективно работающие на длинах волн не более 10-20 мкм [**5**]. Использование подобных устройств в терагерцевом (ТГц) диапазоне сопряжено с трудностями, поскольку эффективность АО взаимодействия обратно пропорциональна квадрату длины волны электромагнитного излучения. На сегодняшний день большинство АО приборов создаётся на основе кристаллов парателлурита (TeO_2) [**6**]. Однако практически все используемые в АО монокристаллические среды, а также жидкости, характеризуются в ТГц диапазоне большим коэффициентом поглощения электромагнитного излучения. Обзор литературных данных показал, что наиболее прозрачными в ТГц диапазоне средами являются полупроводники и неполярные жидкости [**7**, **8**]. Проведённый в работе анализ показывает, что использование ТГц излучения позволит наблюдать трудно реализуемые в видимом диапазоне эффекты, такие как брэгговское отражение, полуколлинеарная дифракция, высокочастотное широкоапертурное взаимодействие и т.д. [**9**,**10**]. Таким образом, изучение АО взаимодействия в ТГц диапазоне с целью создания эффективных электронно управляемых АО устройств является одним из перспективных направлений исследований.

Одним из важных параметров, характеризующим эффективность АО взаимодействия, является коэффициент АО качества M_2 [**9**]. Он определяется лишь материальными параметрами среды и является принципиально анизотропным [**11**–**15**]. Поэтому актуальной представляется задача поиска условий, при которых АО качество максимально.

Поскольку в ТГц диапазоне многие среды слабо прозрачны, то необходимо учесть наличие поглощения электромагнитного излучения в среде. Отметим, что подобный математический аппарат разработан и использовался во многих работах, посвящённых дифракции электромагнитного излучения на голографических решётках [**16**–**20**]. Поскольку голографическая решётка является стационарной структурой, то использованные теории не позволяют оценить некоторые эффекты, наблюдаемые при АО взаимодействии (например, доплеровский сдвиг частоты дифрагированного

излучения, затухание акустической волны и её расходимость, неоднородность звукового поля и др.). Таким образом, в настоящее время остаётся актуальной задача об одновременном учёте влияния поглощения электромагнитного излучения и структуры акустического поля на характеристики АО взаимодействия в приложении к ТГц и микроволновому диапазонам электромагнитного спектра.

Степень разработанности проблемы

Количество работ, посвящённых АО взаимодействию в дальнем ИК, ТГц и субмиллиметровом диапазонах, чрезвычайно мало, несмотря на исключительно большой интерес исследователей к данным спектральным интервалам электромагнитного излучения [**21**–**24**]. В работе [**21**] описаны результаты экспериментов по наблюдению дифракции субмиллиметрового излучения на волнах электронной концентрации в антимониде индия (n-InSb). В работе [**22**] было предложено использовать АО ячейку, изготовленную из ТРХ пластика, для калибровки установки, использующей излучение с длиной волны $\lambda = 447$ мкм.

Важным с практической точки зрения является изучение АО дифракции ТГц излучения ($\lambda = 119$ мкм) на продольной акустической волне в монокристалле германия, распространяющейся в направлении кристаллографической оси [100] [**23**]. Эффективность дифракции достигала 1.5%, а угол разведения лучей составлял 7°. Столь высокие значения эффективности дифракции были достигнуты благодаря использованию стоячей акустической волны. Недостатком подобного режима является то, что он реализуется лишь на отдельных фиксированных частотах звука F.

В работе [**24**] проведено исследование АО дифракции излучения с длиной волны $\lambda = 119$ мкм на ультразвуке с мощностью порядка $P_{\mathrm{a}} = 150$ Вт. При использовании ТРХ пластика, полиэтилена и германия величина отношения интенсивностей дифрагированного и падающего на АО ячейку излучения составила $I_1/I_0^{(*)} = 0.07\%$. Кроме этого, АО дифракция была реализована в неполярных жидкостях. Величина $I_1/I_0^{(*)}$ в тетрахлорметане и циклогексане достигала значения 0.5%.

Математический аппарат, описывающей дифракцию электромагнитного излучения на голографической решётке, может быть модифицирован для корректного описания АО взаимодействия. Аргументом в пользу этого может служить тот факт, что голографическая решётка и периодическая структура, создаваемая акустическим полем, являются фазовыми объектами и, как следствие, описываются схожими уравнениями. В известных работах [**16**–**20**] вводятся допущения, существенно ограничивающие область применения полученных соотношений. К сожалению, известные теории не позволяют объяснить эффекты, связанные с поляризацией излучения, а также с затуханием акустической волны. В работе [**25**] рассмотрена ди-

фракция пучка электромагнитного излучения на произвольном акустическом поле лишь в оптически анизотропной прозрачной среде.

Для простых сингоний предложен ряд методов анализа анизотропии АО качества M_2. При анализе в [**11**–**13**] рассматривался поворот тензора фотоупругости $\hat{p}$. Однако, как показано в работе [**14**], данный метод может быть использован, например, для описания продольного пьезоэлектрического эффекта, но не для акустооптического. Авторами предложен более строгий метод анализа [**15**]. Указанный метод имеет существенный недостаток – он не учитывает направление волнового вектора и поляризацию дифрагированной электромагнитной волны. Расчёты, основанные на перечисленных методах, позволяют в неявном виде получить значение АО качества как функцию многих переменных. Поэтому ни один из них не позволяет напрямую определить оптимальные параметры АО взаимодействия, при которых M_2 достигает своего максимального значения.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы состояла в теоретическом и экспериментальном исследовании особенностей АО взаимодействия в ТГц диапазоне. Особое внимание уделено выявлению новых закономерностей, а также созданию прототипов АО устройств, реализующих управляемое отклонение и модуляцию пучка ТГц излучения. Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка метода расчёта максимального значения коэффициента АО качества монокристаллов кубической сингонии, прозрачных в ТГц диапазоне.
2. Построение модели, описывающей АО дифракцию электромагнитного излучения в произвольном акустическом поле в оптически изотропной среде и учитывающей влияние поглощения электромагнитного излучения.
3. Численное моделирование брэгговского АО взаимодействия в кубических кристаллах. Детальное рассмотрение коллинеарной и квазиортогональной геометрии АО взаимодействия с учётом затухания акустической волны и поглощения электромагнитного излучения.
4. Экспериментальное исследование АО дифракции ТГц излучения в монокристаллах кубической сингонии, а также в неполярных жидкостях. Создание прототипа АО устройства для управляемого отклонения и модуляции пучка ТГц излучения.
5. Первая экспериментальная реализация АО взаимодействия в ТГц диапазоне с использованием пучка электромагнитного излучения с орбитальным угловым моментом (“закрученный” пучок).

Научная новизна диссертационной работы

1. Предложена методика расчёта максимального значения коэффициента АО качества кубических монокристаллов, позволяющая определять

оптимальную геометрию АО дифракции и параметры взаимодействующих волн.

2. Разработана математическая модель АО дифракции в оптически изотропной среде, учитывающая не только затухание акустической волны, но и поглощение ТГц излучения в среде.

3. Получено аналитическое решение задачи АО взаимодействия для квазиортогональной, прямой и обратной коллинеарной дифракции при соблюдении и нарушении условия брэгговского синхронизма.

4. Предсказан невзаимный эффект в случае обратной коллинеарной АО дифракции ТГц излучения, обусловленный различными условиями взаимодействия из-за поглощения электромагнитной и акустической энергии.

5. Проведено экспериментальное исследование АО дифракции ТГц излучения в монокристалле германия. Впервые определена углочастотная характеристика, а также угловой и частотный диапазоны АО взаимодействия. Разработан первый прототип АО дефлектора ТГц излучения с максимальным числом разрешаемых элементов $N = 7$.

6. Экспериментально установлено, что явление АО взаимодействия в ТГц диапазоне эффективно реализуется в неполярных жидкостях. В них впервые наблюдалась дифракция ТГц излучения, обладающего орбитальным угловым моментом, на акустической волне.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и реализации нового метода поиска максимального значения коэффициента АО качества произвольного монокристалла кубической сингонии. Предложена математическая модель АО взаимодействия, позволившая выявить закономерности АО дифракции на затухающей акустической волне с учётом поглощения электромагнитного излучения в среде.

Практическая значимость работы состоит в экспериментальном доказательстве возможности применения АО взаимодействия в ТГц диапазоне: 1) создан первый прототип АО дефлектора; 2) реализована модуляция ТГц излучения, в том числе обладающего орбитальным угловым моментом. Практическую ценность имеют и предложенные методики расчёта характеристик АО взаимодействия в ТГц диапазоне.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика определения максимальных значений коэффициента акустооптического качества кубических кристаллов для продольных и сдвиговых акустических волн, распространяющихся в произвольных направлениях относительно кристаллографических осей.

2. Теория брэгговской дифракции электромагнитного излучения на акустическом поле в оптически изотропной поглощающей среде.

3. Формулы для расчёта эффективности дифракции и полосы акустооптического взаимодействия с учётом поглощения излучения и затухания акустической волны.

4. Акустооптическое отклонение и модуляция излучения, в том числе пучков с орбитальным угловым моментом, впервые экспериментально наблюдаемое в терагерцевом диапазоне.

Достоверность полученных результатов определяется адекватностью использованных математических моделей в рамках наложенных на них ограничений, а также соответствием численных расчётов и экспериментальных данных.

Методология теоретического исследования основана на использовании уравнений Максвелла для возмущённой акустической волной среды. Широко использовались компьютерные методы расчёта. В основе экспериментального исследования лежали классические методы оптики и акустооптики в приложении к ТГц диапазону электромагнитного спектра.

Личный вклад автора

Все результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены либо лично автором, либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации, причём вклад диссертанта был определяющим.

Апробация диссертационной работы

По материалам диссертации опубликованы 36 работ, в том числе 10 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, 3 статьи в трудах всероссийских и международных конференций, а также 23 тезиса докладов. Материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах имени академика В.В.Мигулина кафедры физики колебаний физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, а также на семинарах имени профессора В.Н.Парыгина лаборатории “Акустооптика и оптическая обработка информации” кафедры. Полый перечень публикаций приведён в отдельном списке работ автора в конце автореферата [**A1**–**A36**].

Объем и структура диссертационной работы

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии, списка литературы и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 159 страниц текста, включая 68 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 139 наименований.

Содержание работы

Во **введении** содержится обоснование актуальности темы исследований, сформулирована цель работы и перечислены задачи исследований, приводится краткое содержание работы, отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются положения, выносимые на защиту, а также приводятся сведения об апробации результатов работы.

Поскольку в ТГц диапазоне большинство двулучепреломляющих материалов непрозрачны, работа посвящена исследованию АО взаимодействия в жидкостях и кубических кристаллах. В **главе 1** предложена теоретическая модель, позволяющая определить анизотропию коэффициента АО качества оптически изотропных сред. Для расчёта АО качества необходимо: 1) выбрать одну из трёх акустических мод; 2) задать направление её волнового вектора через сферические координаты φ и θ относительно кристаллографической системы координат; 3) определить поляризацию излучения, при которой достигаются экстремальные значения фотоупругой постоянной p_{eff}:

$$p_{\text{eff}} \propto \overrightarrow{e^{(0)}}\widehat{\Delta B}\overrightarrow{e^{(1)}},$$

$\overrightarrow{e^{(0)}}$ и $\overrightarrow{e^{(0)}}$ – поляризация падающего и дифрагированного излучения, а $\widehat{\Delta B}$ – симметричный тензор, характеризующий возмущение диэлектрической непроницаемости акустической волной. Таким образом, максимальное значение АО качества M_2 можно непосредственно определить из полученных двумерных зависимостей $M_2(\varphi, \theta)$.

Непосредственным вычислением свёртки $\overrightarrow{e^{(0)}}\widehat{\Delta B}\overrightarrow{e^{(1)}}$ в работе показано, что экстремальное значение эффективной фотоупругой постоянной достигается, когда падающее и дифрагированное излучение поляризовано вдоль одной из главных осей возмущённой акустической волной оптической индикатрисы (см. рис. 1 а)). Этот режим может быть реализован при квазиортогональной АО дифракции в оптически изотропной среде. Заданным векторам поляризации падающего и дифрагированного излучения, например, $\overrightarrow{e^{(3)}}$, соответствуют волновые вектора $\vec{k}^{(0,1)}$, лежащие в ортогональной плоскости (окрашенной в серый цвет), в общем случае не содержащей волновой вектор звука $\vec{K}$. На рис. 1 б) серым цветом обозначены возможные положения вектора $\vec{K}$, совокупность которых представляет собой кольцо с пренебрежимо малой толщиной. Пересечение указанных кольца и плоскости обозначено чёрными точками и определяет искомое направление волновых векторов $\vec{k}^{(0,1)}$.

Установлено, что при коллинеарной дифракции значение эффективной фотоупругой постоянной максимально, если падающее и дифрагированное излучение поляризовано вдоль одной их осей эллипса, являющего

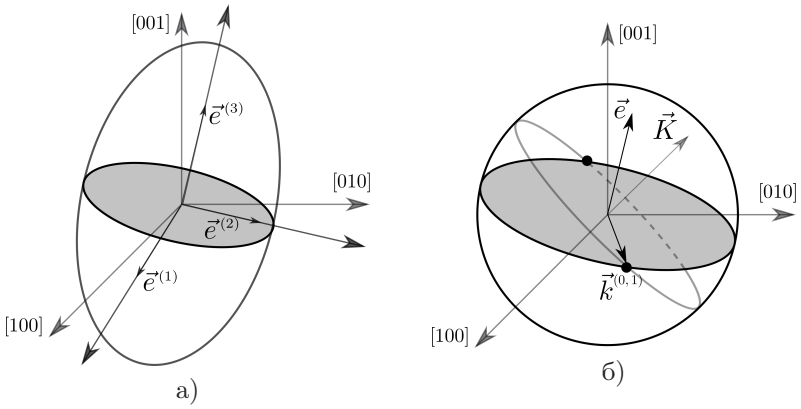


Рис. 1 — Векторная диаграмма: а) поляризация $\vec{e}$ соответствует экстремумам p_{eff}; б) условие брэгговского синхронизма

сечением возмущённой индикатрисы плоскостью, ортогональной волновому вектору звука (см. рис. 2). Для произвольного тензора $\widehat{\Delta B}$, соответствующему акустической волне с заданным направлением волнового вектора $\vec{K}$, получены аналитические выражения для оптимальных направлений векторов напряжённости излучения и соответствующие им экстремальные значения эффективной фотоупругой постоянной.

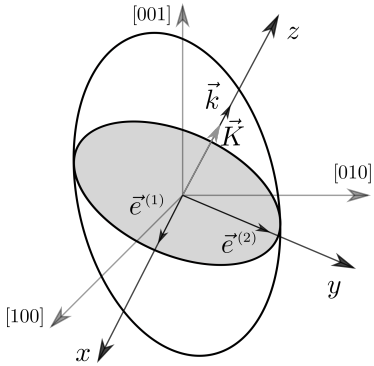


Рис. 2 — Векторная диаграмма, соответствующая коллинеарной дифракции

С помощью предложенной методики получены соотношения для оптимального направления акустического волнового вектора $\vec{K}$. Например, при коллинеарной АО дифракции в плоскости (001) кубического кристалла на квазипоперечной акустической волне, поляризованной в этой же плоскости, оптимальное направление $\vec{K}$ задаётся углом φ:

$$\varphi_m = \frac{\pi}{8} - \frac{3}{64}\Delta_{12} + \frac{1}{8}\Delta_{11}, \quad \Delta_{11} = \frac{c_{11} - c_{12} - 2c_{44}}{c_{11} - c_{44}}, \quad \Delta_{12} = \frac{c_{11} - c_{12} - 2c_{44}}{c_{44}},$$

где Δ_{11} и Δ_{12} параметры акустической анизотропии, а c_{ji} – упругие постоянные.

Глава 2 посвящена разработке математического аппарата для описания АО дифракции с учётом поглощения электромагнитного излучения. При анализе предполагалось, что собственные электромагнитные волны среды линейно поляризованы и их амплитуда экспоненциально затухает в некотором направлении $\vec{\alpha}$:

$$\vec{E}(\vec{r},t) \propto \vec{e} e^{-\vec{\alpha}\vec{r}/2} e^{i(\vec{k}\vec{r}-\omega t)}.$$

Как следует из дисперсионных уравнений, это направление определяется мнимой частью тензора диэлектрической проницаемости $\widehat{\varepsilon''}$ и зависит от направления волнового вектора $\vec{k}$ и поляризации $\vec{e}$ излучения.

Полное электромагнитное поле в возмущённой среде выражалось как сумма полей во всех дифракционных порядках p с медленно меняющимися комплексными амплитудами C и ортогональными векторами поляризациями $\vec{e}_p^{\,||}$ и $\vec{e}_p^{\,\perp}$, причём $\vec{e}_p^{\,\perp} = \vec{e}_{p-1}^{\,\perp} \equiv \vec{e}^{\,\perp}$ для любого номера порядка p:

$$\vec{E} = \sum_p \left(\vec{e}^{\,\perp} \frac{C_p^{\perp}(x,y)}{\sqrt{n^{\perp}}} e^{i(\vec{k}_p^{\perp}\vec{r}-\omega_p t)} + \vec{e}_p^{\,||} \frac{C_p^{||}(x,y)}{\sqrt{n_p^{||}\cos\beta_p}} e^{i(\vec{k}_p^{||}\vec{r}-\omega_p t)} \right),$$

где n – показатель преломления, β_p – угол между волновым вектором $\vec{k}_p^{||}$ и лучевым вектором $\vec{S}_p^{||}$, соответствующим поляризации $\vec{e}_p^{\,||}$ (для поляризации $\vec{e}_p^{\,\perp}$ этот угол равен нулю), ω_p – угловая частота.

Получены дифференциальные уравнения, которые связывают комплексные амплитуды C_p электромагнитных волн в соседних дифракционных порядках p при произвольной структуре акустического поля:

$$\begin{aligned}
(\vec{m}_p^{\perp}\vec{\nabla}C_p^{\perp}) &= i\frac{q^{\perp}}{2}\left(C_{p-1}^{\perp}e^{-i\vec{\eta}_{p-1}^{\perp}\vec{r}} + C_{p+1}^{\perp}e^{i\vec{\eta}_p^{\perp}\vec{r}}\right) + \\
&+ i\frac{q_{p-1}^{A}}{2}C_{p-1}^{||}e^{-i\vec{\eta}_{p-1}^{||\perp}\vec{r}} + i\frac{q_{p+1}^{A}}{2}C_{p+1}^{||}e^{i\vec{\eta}_p^{\perp||}\vec{r}} - \frac{(\vec{m}_p^{\perp}\vec{\alpha}_p^{\perp})}{2}C_p^{\perp}, \\
(\vec{s}_p^{\,||}\vec{\nabla}C_p^{||}) &= i\frac{q_{p-1}^{||}}{2}C_{p-1}^{||}e^{-i\vec{\eta}_{p-1}^{||}\vec{r}} + i\frac{q_p^{||}}{2}C_{p+1}^{||}e^{i\vec{\eta}_p^{||}\vec{r}} + \\
&+ i\frac{q_p^{A}}{2}\left(C_{p-1}^{\perp}e^{-i\vec{\eta}_{p-1}^{\perp||}\vec{r}} + C_{p+1}^{\perp}e^{i\vec{\eta}_p^{||\perp}\vec{r}}\right) - \frac{(\vec{s}_p^{\,||}\vec{\alpha}_p^{||})}{2}C_p^{||},
\end{aligned}$$

где $\vec{m}$ и $\vec{s}$ – единичный волновой и лучевой векторы, q – коэффициент связи, а $\vec{\eta}$ – вектор расстройки.

Выведенные соотношения совпадают по форме с известными двумерными уравнениями связанных мод для прозрачной двулучепреломляющей среды. Последние слагаемые в правых частях полученных дифференциальных уравнений учитывают поглощение электромагнитной волны в среде. Поскольку полученные уравнения являются двумерными, их можно использовать и для описания АО взаимодействия с большими углами отклонения дифрагированного излучения, что особенно актуально для анализа дифракции в ТГц диапазоне.

В данной главе основное внимание уделяется аналитическому решению уравнений связанных мод в частных случаях квазиортогональной и коллинеарной геометрий АО дифракции. В этом режиме уравнения связанных мод являются одномерными, что позволило получить аналитические соотношения для интенсивности излучения при брэгговском синхронизме, а также – для полосы и оптимальной длины АО взаимодействия.

При квазиортогональной дифракции на акустической волне с заданной мощностью коэффициент связи $q = A/\sqrt{L}$, где A – константа. Поэтому для анализа решения уравнений связанных мод были использованы безразмерные переменные:

$$X_{\text{ort}} = \alpha/A^2, \qquad Y_{\text{ort}} = A^2 L, \qquad Z_{\text{ort}} = \eta/A^2, \qquad \xi = z/L,$$

где Y_{ort} – безразмерная длина АО взаимодействия, X_{ort} – безразмерный коэффициент поглощения, Z_{ort} – безразмерная расстройка и ξ – безразмерная координата.

Были получены выражения для интенсивности I_1 дифрагированного излучения, а также для полосы ΔZ_{ort} и оптимальной длины $Y_{\text{ort}}^{\text{opt}}$ АО взаимодействия (при которой значение I_1 максимально):

$$I_1 = \frac{Y_{\text{ort}}}{4}\text{sinc}^2\left[\frac{\sqrt{Y_{\text{ort}}(1+Z_{\text{ort}}^2 Y_{\text{ort}})}}{2}\right]\exp(-X_{\text{ort}}Y_{\text{ort}}),$$

$$Y_{\text{ort}}^{\text{opt}} = \frac{\pi^2}{1+\pi^2 X_{\text{ort}}}, \quad \Delta Z_{\text{ort}} = \frac{0.88\pi}{Y_{\text{ort}}}.$$

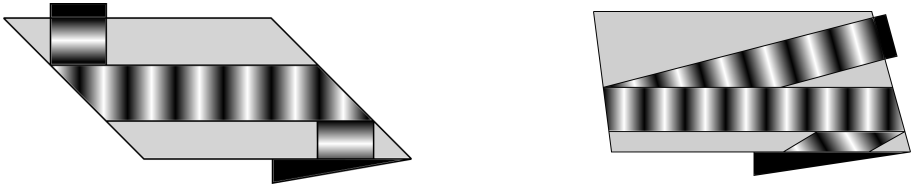
Поскольку в коллинеарном режиме при заданной мощности P_{a} акустической волны коэффициент связи q не зависит от длины АО взаимодействия L и является постоянной величиной, удобно использовать следующие безразмерные переменные:

$$X = \alpha/q, \qquad Y = qL, \qquad Z = \eta/q, \qquad W = \alpha_s/q,$$

где α_s – коэффициент затухания акустической волны ($P_{\text{a}} \propto \exp(-\alpha_s x)$).

В работе были рассмотрены две конфигурации возможного распространения акустической волны в зависимости от угла падения ψ_{s} на боковую грань кристалла: 1) $\psi_{\text{s}} \gtrapprox 1$; 2) $\psi_{\text{s}} \ll 1$ (см. рис. 3). Для первой конфигурации путь, проходимый акустической волной от возбудителя звука

до боковой грани, минимален и затуханием акустической волны на указанном участке можно пренебречь, а для второй конфигурации – нельзя. Для каждой конфигурации анализ был проведён для двух случаев, когда волновые вектора акустической и электромагнитной волны нулевого дифракционного порядка сонаправлены $\vec{k}_0 \uparrow\uparrow \vec{K}$ или противоположно направлены $\vec{k}_0 \uparrow\downarrow \vec{K}$.



а) б)

Рис. 3 — Распространение акустической волны в АО ячейке при различных углах падения: а) $\psi_\mathrm{s} \gtrapprox 1$; б) $\psi_\mathrm{s} \ll 1$

При **прямой коллинеарной АО дифракции** падающий на звуковую решётку и дифрагированные пучки электромагнитного излучение распространяются в одном направлении. Для этого режима АО взаимодействия получены следующие аналитические выражения для интенсивности I_1 при брэгговском синхронизме, полосы ΔZ и оптимальной длины Y^opt:

1)$\psi_\mathrm{s} \gtrapprox 1, \quad \vec{k}_0 \uparrow\uparrow \vec{K}, \quad \vec{k}_0 \uparrow\downarrow \vec{K}$:

$$I_1 = \exp(-XY)\sin^2\left\{\frac{1}{W}\left[1-\exp\left(-\frac{1}{2}WY\right)\right]\right\},$$

$$Y^\mathrm{opt} = \frac{2}{W}\ln\left(1+\frac{W}{X}\right), \quad \Delta Z = \sqrt[4]{\left(\frac{W}{2}\right)^4 + \left(\frac{0.88\pi}{Y}\right)^4}.$$

2)$\psi_\mathrm{s} \ll 1, \quad \vec{k}_0 \uparrow\uparrow \vec{K}, \quad \vec{k}_0 \uparrow\downarrow \vec{K}$:

$$I_1 = \exp(-XY)\sin^2\left\{\frac{1}{W}\left[\exp(-WY)-\exp\left(-\frac{WY}{2}\right)\right]\right\},$$

$$Y^\mathrm{opt} = \frac{2}{W}\ln\left(1+\frac{W}{X+W}\right), \quad \Delta Z = \sqrt[4]{\left(\frac{W}{2}\right)^4 + \left(\frac{0.88\pi}{Y}\right)^4}.$$

Таким образом, установлено, что при квазиортогональной и прямой коллинеарной дифракции поглощение излучения не влияет на полосу АО взаимодействия, однако приводит к тому, что интенсивность дифрагированного излучения максимальна при некоторой оптимальной длине взаимодействия. Показано, что при дифракции на затухающей звуковой волне полоса АО взаимодействия будет больше, а оптимальная длина – наоборот, меньше.

При **обратной коллинеарной АО дифракции** падающий на звуковую решётку и дифрагированные пучки электромагнитного излучение распространяются в противоположных направлениях. Для этого режима АО взаимодействия аналитические выражения для I_1, ΔZ и $Y^{\rm opt}$ имеют вид:

1)$\psi_{\rm s} \gtrapprox 1, \quad \vec{k}_0 \uparrow\uparrow \vec{K}$:

$$\text{а) } \nu \le \frac{1}{2}: \quad I_1 = \left[\frac{I_{\nu+\frac{1}{2}}(x_2)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1) - I_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_2)}{I_{\nu-\frac{1}{2}}(x_2)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1) + I_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1)K_{-\nu+\frac{1}{2}}(x_2)}\right]^2,$$

$$\text{б) } \nu > \frac{1}{2}: \quad I_1 = \left[\frac{I_{-\nu-\frac{1}{2}}(x_2)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1) - I_{-\nu-\frac{1}{2}}(x_1)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_2)}{I_{-\nu-\frac{1}{2}}(x_1)K_{-\nu+\frac{1}{2}}(x_2) + I_{-\nu+\frac{1}{2}}(x_2)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1)}\right]^2,$$

$$Y^{\rm opt} = \infty, \quad \Delta Z = \sqrt[4]{\left(X + \frac{W}{2}\right)^4 + \left[\left(\frac{0.28\pi^2}{Y}\right)^2 + 1.1^2\right]^2},$$

где введены следующие обозначения:

$$\nu = \frac{X}{W}, \qquad x_1 = \frac{1}{W}\exp\left(-\frac{1}{2}WY\right), \qquad x_2 = \frac{1}{W},$$

а $I_\nu(x)$ и $K_\nu(x)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода соответственно.

2)$\psi_{\rm s} \gtrapprox 1, \quad \vec{k}_0 \uparrow\downarrow \vec{K}$:

$$I_1 = \left[\frac{I_{\nu-\frac{1}{2}}(x_2)K_{-\nu+\frac{1}{2}}(x_1) - I_{\nu-\frac{1}{2}}(x_1)K_{-\nu+\frac{1}{2}}(x_2)}{I_{\nu-\frac{1}{2}}(x_2)K_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1) + I_{\nu+\frac{1}{2}}(x_1)K_{-\nu+\frac{1}{2}}(x_2)}\right]^2,$$

$$Y^{\rm opt} = \frac{1}{W/2 - X}\ln\left(\frac{W}{2X}\right), \quad \Delta Z = \sqrt[4]{\left(X - \frac{W}{2}\right)^4 + \left[\left(\frac{0.28\pi^2}{Y}\right)^2 + 1.1^2\right]^2}.$$

Аналогично были рассмотрены варианты дифракции и получены аналитические выражения для интенсивности дифрагированного излучения и полосы АО взаимодействия при условии $\psi_s \ll 1$ для $\vec{k} \uparrow\uparrow \vec{K}$ и $\vec{k} \uparrow\downarrow \vec{K}$. Приведённые выражения для оптимальной длины $Y^{\rm opt}$ АО взаимодействия справедливы при малой эффективности дифракции $I_1 \ll 1$. Расчёт показал, что в области $X \ge 3, W \ge 0.06$ относительная погрешность составляет менее 5%. Для случая, когда неравенство $I_1 \ll 1$ нарушается, было выполнено численное моделирование и построены зависимости $Y^{\rm opt}(X,W)$. Установлено, что относительная погрешность при использовании формул для полосы АО взаимодействия составляет не более 6%.

Таким образом, доказано, что в режиме обратной коллинеарной дифракции при повороте АО ячейки на 180° относительно падающего излучения полоса АО взаимодействия и интенсивность дифрагированного

излучения изменяются. Установлено, что этот невзаимный эффект проявляется только, когда нельзя пренебречь поглощением излучения и затуханием звука. Проведённый анализ показал, что при малой эффективности АО взаимодействия выражения для интенсивности I_1 и полосы ΔZ при условии $\vec{k}_0 \uparrow\downarrow \vec{K}$ зависят от комбинации параметров $(X - W/2)$, в то время как при условии $\vec{k}_0 \uparrow\uparrow \vec{K}$ – от комбинации $(X + W/2)$.

В **главе 3** сформулированы критерии к материалу АО ячейки. Показано, что наиболее пригодными средами являются полупроводники и неполярные жидкости. Для наблюдения обратной коллинеарной дифракции в ТГц диапазоне, в качестве материала АО ячейки был выбран монокристаллический германий, как относительно прозрачный, обладающий высоким значением коэффициента АО качества и хорошо изученный в ИК диапазоне. Расчёт показал, что интенсивность дифрагированного излучения должна составлять одну сотую процента от интенсивности падающего излучения, при этом при повороте АО ячейки на 180° эффективность дифракции должна измениться на 10%.

Предложена и опробована экспериментальная установка для реализации обратной коллинеарной АО дифракции (см. рис. 4). В силу малости эффективности дифракции в работе использовалось мощное монохроматическое ТГц излучение новосибирского лазера на свободных электронах 1. В качестве приёмника ТГц излучения использовался оптоакустический преобразователь (ячейка Голея), требующий амплитудной модуляции излучения с частотой 10–15 Гц. Приёмник 9 регистрировал малую часть ТГц пучка, модулированную механическим прерывателем 8, и использовался для контроля интенсивности. ТГц пучок ограничивался диафрагмой 3 и падал на АО ячейку 5, положение которой контролировалось с помощью видимого излучения лазера 7, соосного с ТГц пучком. Дифрагированное излучение, распространяющееся навстречу падающему, выделялось с использованием делительной пластины 4. Сигнал регистрировался приёмником 10, положение которого определялось с помощью лазера 7. Для модуляции дифрагированного излучения на АО ячейку подавался электрический сигнал с высокочастотного генератора, работающего в импульсном режиме, а выделение сигнала с ячейки Голея осуществлялось за счёт синхронного детектирования. При выполнении цикла данных экспериментов дифрагированное излучение зарегистрировать не удалось даже при использовании 20 Вт усилителя электрического сигнала. Одной из предполагаемых причин этого является узкая полоса АО взаимодействия, которая на порядок меньше ширины линии ТГц излучения. Другой возможной причиной являются шумы рассеянного излучения, а также предел чувствительности приёмника.

Впервые выполнена систематизация свойств жидкостей в ТГц диапазоне. Показано, что для реализации обратной коллинеарной дифракции наиболее пригодным является гексан. Установлено, что ожидаемая эффек-

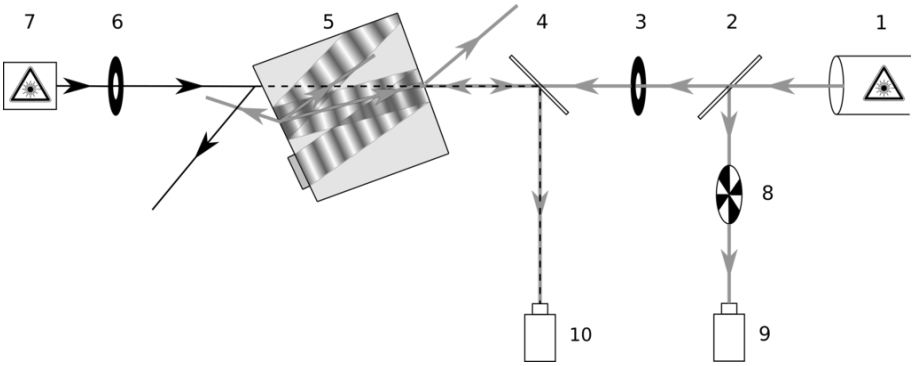


Рис. 4 — Схема установки для наблюдения обратной коллинеарной дифракции: 1 – лазер на свободных электронах; 2,4 – делительная платина; 3,6 – диафрагма; 5 – АО ячейка; 7 – лазер ($\lambda = 632$ нм); 8 – механический прерыватель; 9,10 – приёмник излучения

тивность дифракции при его использовании на порядок больше, чем в германии. Для эксперимента была изготовлена АО ячейка, представляющая собой кювету из нержавеющей стали. В устройстве для возбуждения звука пьезопреобразователь находился в акустическом контакте с кварцевым буфером. Калибровка АО ячейки проводилась с использованием излучения гелий-неонового лазера с длиной волны 632 нм. Эксперимент показал, что эффективность дифракции на порядок меньше ожидаемой величины. Данный результат, вероятно, связан с несовершенством цепи электрического согласования, а также с акустическими потерями в склейке пьезопреобразователя и кварцевого буфера. Поэтому эксперимент в ТГц диапазоне не дал ожидаемого результата. Причиной этому, по-видимому, явилось то, что к сложности юстировки добавилась неудовлетворительная работа устройства для возбуждения звука. С другой стороны, в режиме поперечной дифракции в ТГц диапазоне важные данные удалось получить.

Описаны результаты экспериментального исследования квазиортогонального АО взаимодействия в ТГц диапазоне. В этом режиме дифрагированное и прошедшее излучение пространственно разделяется, что позволило использовать в установке меньшее число оптических элементов (см. рис. 5). Приведены впервые экспериментально измеренные зависимости угла Брэгга от частоты в монокристаллическом германии в ТГц диапазоне (см. рис. 6). Точки на графике соответствуют максимальной эффективности дифракции, а треугольники – уменьшению интенсивности в 2 раза, пунктирная кривая – теоретическая зависимость, построенная на основании литературных данных. Таким образом, в ТГц диапазоне была впервые определена угловая и частотная полоса АО взаимодействия. В работе реализовано отклонение дифрагированного излучения на значительные углы порядка 50 градусов. Установлено, что изготовленное АО устройство мо-

жет быть использовано в качестве дефлектора ТГц излучения с числом разрешимых элементов равным 7.

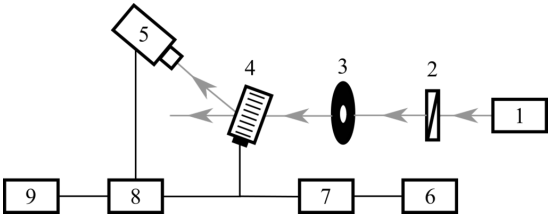


Рис. 5 — Схема установки для наблюдения квазиортогональной дифракции: 1 – лазер на свободных электронах; 2 – поляризатор; 3 – диафрагма; 4 – АО ячейка; 5 – приёмник излучения; 6 – генератор импульсов; 7 – высокочастотный генератор; 8 – синхронный детектор; 9 – персональный компьютер

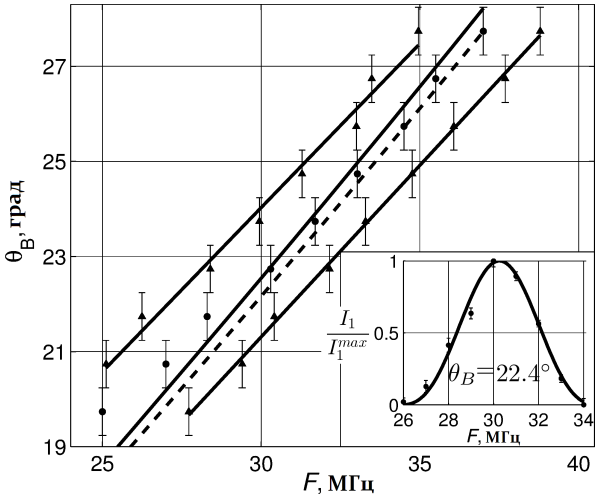


Рис. 6 — Зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука

Также в работе приведены результаты цикла исследований с использованием ряда неполярных жидкостей. Достигнутая эффективность дифракции составляла около сотой доли процента. Экспериментально установлено, что в ТГц диапазоне циклогексан, гексан, гексадекан и уайт-спирит имеют примерно одинаковое значение коэффициента АО качества $M_2 = (170 \pm 30) \cdot 10^{-15}$ с^3/кг. Найденное значение АО качества тетрахлорметана $M_2 = (270 \pm 20) \cdot 10^{-15}$ с^3/кг оказалось в несколько раз больше, что в пределах ошибки совпало с теоретическим расчётом. В тоже время, АО качество керосина $M_2 = (5.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-15}$ с^3/кг оказалось на два

порядка меньше ожидаемой величины, что, вероятно, связано с большим количеством примесей. Установлено, наибольшая эффективность дифракции наблюдается в циклогексане, как наиболее прозрачной жидкости.

Впервые выполнены эксперименты по наблюдению АО дифракции "закрученного" ТГц излучения с напряжённостью электромагнитного поля $\vec{E} \propto \exp(il\phi)$, имеющего орбитальный угловой момент l. Впервые проведённое экспериментальное исследование с использованием неполярных жидкостей показало, что эффективности дифракции закрученных пучков ТГц излучения с $l = \pm 1$ и $l = \pm 2$ совпадают в пределах ошибки эксперимента с эффективностью дифракции излучения с нулевым орбитальным угловым моментом $l = 0$. Впервые реализованы углы отклонения закрученного излучения на десятки градусов за счёт использования относительно низких частот ультразвука ($F = 3$ МГц).

Основные результаты и выводы

1. Рассмотрена акустооптическая дифракция в оптически изотропных средах. Показано, что глобальные экстремумы коэффициента акустооптического качества наблюдаются, когда подающее и дифрагированное излучение поляризовано вдоль одной из полуосей индикатрисы, возмущённой акустической волной. Определены условия, при которых коэффициент акустооптического качества максимален для квазиортогональной и коллинеарной геометрий взаимодействия. Приведены результаты расчёта коэффициента акустооптического качества в том случае, когда волновые вектора взаимодействующих волн лежат в плоскостях (001) и $(1\bar{1}0)$ кубического кристалла.

2. Получена система уравнений, описывающая акустооптическое взаимодействие и связывающая комплексные амплитуды электромагнитных волн в соседних дифракционных порядках в случае поглощения электромагнитных волн. При выводе основных соотношений рассмотрена дифракция электромагнитного излучения на акустическом поле с произвольной пространственной структурой при учёте поляризационных эффектов.

3. Проведён анализ решения уравнения связанных мод в брэгговском режиме при дифракции на затухающей акустической волне. Исследована квазиортогональная, прямая и обратная коллинеарная дифракция. Доказано влияние затухания акустической волны и поглощения электромагнитных волн на эффективность и полосу акустооптического взаимодействия. Определены условия, при которых в режиме обратной коллинеарной дифракции в условиях фазового синхронизма может наблюдаться невзаимный эффект.

4. Экспериментальное исследование квазиортогонального акустооптического взаимодействия в терагерцевом диапазоне проведено с использова-

нием монокристаллического германия. Определена углочастотная характеристика, а также измерена полоса акустооптического взаимодействия для ряда углов Брэгга. Впервые созданное акустооптическое устройство было использовано в качестве дефлектора терагерцевого излучения с максимальным числом разрешимых элементов $N = 7$.

5. Впервые проведена систематизация параметров жидкостей, пригодных для работы в терагерцевом диапазоне. Исследована акустооптическая дифракция в неполярных жидкостях и определена величина коэффициентов их акустооптического качества. Установлено, что для наблюдения квазиортогональной дифракции целесообразно использовать циклогексан, в то время как для реализации прямой и обратной коллинеарной дифракции предпочтительнее гексан.

6. Выполнен первый цикл экспериментов по изучению акустооптической дифракции закрученного терагерцевого излучения. Показано, что эффективность акустооптического взаимодействия не зависит от значения орбитального углового момента электромагнитного излучения. Проведённое исследование доказывает перспективность разработки устройств, использующих акустооптическое управление параметрами закрученного терагерцевого излучения.

Авторские публикации

A1. *Дьяконов Е.А., Никитин П.А.* Оптическое невзаимное устройство на основе коллинеарного акустооптического фильтра // Сборник трудов научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов физического факультета МГУ”. — Москва, Россия: 2009. — С. 56–57.

A2. Laser setup for observation of acousto-optic non-reciprocity / E. Djakonov, P. Nikitin, Yu. Dobrolenskiy, V. Voloshinov // Preliminary program and abstracts of 12-th international conference “Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems”. — St.Petersburg, Russia: 2009. — P. 20.

A3. *Никитин П.А., Дьяконов Е.А.* Невзаимный эффект при коллинеарной дифракции в кристаллах сапфира и ниобата лития // Сборник тезисов 16-ой международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов – 2009”. — Москва, Россия: 2009. — С. 168–169.

A4. *Djakonov E.A., Nikitin P., Dobrolenskiy Y.S.* Magnitude of acousto-optic non-reciprocal effect in birefringent materials // Preliminary program and abstracts of 13-th international conference for young researchers “Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems”. — St.Petersburg, Russia: 2010. — P. 13.

A5. *Трушин А.С., Волошинов В.Б., Никитин П.А.* Поверхностное возбуждение объёмных волн в кристалле парателлурита // Материалы 6-ой

межрегиональной школы физиков и молодых учёных “ЛМШФ-6”. — Екатеринбург, Россия: 2010. — С. 126–127.

A6. *Никитин П.А., Трушин А.С.* Возбуждение объемных акустических волн с поверхности кристалла парателлурита // Труды 13-ой всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” имени А.П.Сухорукова (“Волны-2011”). — Т. 7. — Звенигород, Россия: 2011. — С. 46–49.

A7. *Трушин А.С., Никитин П.А.* Возбуждение объёмной акустической волны с поверхности кристалла парателлурита // Материалы “17-ой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ – 17)”. — Т. 15. — Екатеринбург, Россия: 2011. — С. 505–506.

A8. Акустооптическая ячейка на кристалле парателлурита с поверхностным возбуждением объёмных акустических волн / В.Б. Волошинов, П.А. Никитин, А.С. Трушин, Л.Н. Магдич // *Письма в журнал технической физики.* — 2011. — Т. 37, № 16. — С. 22–28.

A9. *Дъяконов Е.А., Волошинов В.Б., Никитин П.А.* Невзаимный эффект при низкочастотном и высокочастотном коллинеарном акустооптическом взаимодействии // *Оптика и спектроскопия.* — 2012. — Т. 113, № 6. — С. 701–711.

A10. *Trushin A.S., Nikitin P.A., Muromets A.V.* Acousto-optic interaction in TeO2 and LiNbO3 devices with surface generation of bulk acoustic waves // *AIP Conf. Proc.* — 2012. — Vol. 1433, no. 1. — Pp. 102–105.

A11. *Nikitin P.A., Voloshinov V.B., Knyazev B.A.* Deflection of laser teraherz radiation in germanium crystal by acousto-optic methods // Preliminary program and abstracts of XVI international conference “Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems”. — St.Petersburg, Russia: 2013. — P. 21.

A12. Исследования по акустооптике на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова / А.С. Трушин, А.В. Муромец, П.А. Никитин, В.А. Чекалина // Сбоник трудов “XIX всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ – 19”. — Екатеринбург, Россия: 2013. — С. 422–423.

A13. Отклонение монохроматического терагерцового излучения методами акустооптики / В.Б. Волошинов, П.А. Никитин, В.В. Герасимов и др. // *Квантовая электроника.* — 2013. — Т. 43, № 12. — С. 1139–1142.

A14. *Волошинов В.Б., Князев Г.А., Никитин П.А.* Акустооптическое управление электромагнитным излучением дальнего инфракасного и терагерцового диапазона // Материалы 2-й международной конференции “Оптика и фотоника – 2013”. — Самарканд, Узбекистан: 2013. — С. 141–144.

A15. Акустооптическое управление электромагнитным излучением терагерцового диапазона / В.Б. Волошинов, П.А. Никитин, В.В. Герасимов и др. // Сборник трудов XIV всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн”. — 9. — Можайск, Россия: 2013. — С. 12.

A16. Diffraction of monochromatic terahertz radiation by ultrasound in germanium crystal / V.B. Voloshinov, P.A. Nikitin, V.V. Gerasimov et al. // Techical digest of International conference on coherent and nonlinear optics / Conference on lasers, applications, and technologies “ICONO/LAT 2013”. — Moscow, Russia: 2013.

A17. Advances in the optics and photonics in the terahertz region at the SPIN workstation of Novosibirsk free electron laser facility / B.A. Knyazev, I.A. Azarov, V.S. Cherkassky, Yu.Yu. Choporova // Technical digest of VI international symposium “Modern problems of laser physics (MPLP’2013)”. — Novosibirsk, Russia, 2013. — Pp. 97–98.

A18. *Никитин П.А.* Двумерное описание акустооптического взаимодействия, учитывающее поглощение электромагнитных волн // Сборник статей XVIII международной молодежной научной школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”. — Казань, Россия: 2014. — С. 151–155.

A19. Regular trends of acousto-optic interaction in terahertz region of electromagnetic radiation / P. Nikitin, V. Voloshinov, V. Gerasimov, B. Knyazev // Abstract and programme book of “12-th school on acousto-optics and applications”. — Druskininkai, Lithuania: 2014. — Pp. 37–37.

A20. Regular trends of acousto-optic interaction in terahertz region of electromagnetic radiation / P. Nikitin, V. Voloshinov, V. Gerasimov, B. Knyazev // *Acta Physica Polonica A*. — 2015. — Vol. 127, no. 1. — Pp. 49–51.

A21. *Nikitin P.A., Voloshinov V.B.* Backward collinear acousto-optic interaction in germanium crystal in terahertz spectral range // *Physics Procedia*. — 2015. — Vol. 70. — Pp. 712 – 715.

A22. *Nikitin P.A., Voloshinov V.B.* Backward collinear acousto-optic interaction in germanium crystal in terahertz spectral range // Abstract book “2015 ICU international congress on ultrasonics”. — Metz, France, 2015. — Pp. 85–85.

A23. *Никитин П.А.* Особенности акустооптического взаимодействия с учётом поглощения электромагнитных волн и поляризационных эффектов // Труды 15-ой всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн” имени А.П.Сухорукова (“Волны – 2015”). — Красновидово, Россия: 2015.

A24. Infrared and terahertz transmission properties of germanium single crystals / I.A. Kaplunov, P.A. Nikitin, V.B. Voloshinov et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 737, no. 1. — P. 012021.

A25. *Каплунов И.А., Никитин П.А., Волошинов В.Б.* Измерение пропускания германия в инфракрасном и терагерцовом диапазоне // Сборник научных трудов “V международной конференции по фотонике и информационной оптике”. — Москва, Россия: 2016. — С. 33–34.

A26. *Никитин П.А.* Метод определения максимального значения акустооптического качества в оптически изотропных средах // *Учёные записки физического факультета МГУ.* — 2016. — № 6. — С. 166602.

A27. Deflection of terahertz vortex beam in nonpolar liquids by means of acousto-optics / P.A. Nikitin, V.B. Voloshinov, V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev // *Physics Procedia.* — 2016. — Vol. 84. — Pp. 146–151.

A28. Acousto-optic interaction in non-polar liquids in terahetz region / P.A. Nikitin, V.B. Voloshinov, B.A. Knyazev, V.V. Gerasimov // Proceedings of the XIX international conference for young researchers “Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems”. — St.Petersburg, Russia: 2016. — Pp. 80–81.

A29. Deflection of THz vortex beam in non-polar liquids by means of acousto-optics / P. Nikitin, V.B. Voloshinov, B. Knyazev, V. Gerasiov // Book of abstracts of international conference “Synchrotron and free electron laser radiation: generation and application (SFR-2016)”. — Novosibirsk, Russia: 2016. — Pp. 23–23.

A30. *Nikitin P.A.* General method to determine optimal values of acousto-optic figure of merit in cubic crystals // Proceedings of “2016 IEEE international ultrasonics symposium”. — Tours, France: 2016. — Pp. 162–163.

A31. *Никитин П.А., Волошинов В.Б.* Квази-ортогональное и квази-коллинеарное акустооптическое взаимодействие в поглощающей среде // Труды 15-ой всероссийской школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах” имени А.П.Сухорукова (“Волны – 2015”). — Красновидово, Россия: 2016. — С. 20–23.

A32. *Никитин П.А.* Метод определения максимального значения акустооптического качества в оптически изотропных средах // Труды 15-ой всероссийской школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах” имени А.П.Сухорукова (“Волны – 2015”). — Красновидово, Россия: 2016. — С. 44–45.

A33. Influence of electromagnetic and acoustic absorption on properties of backward collinear acousto-optic interaction / D.L. Porokhovnichenko, E.A. Djakonov, P. A. Nikitin, V.B. Voloshinov // Preliminary program and abstracts of the XIX international conference for young researchers “Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems”. — St.Petersburg, Russia: 2016. — Pp. 71–74.

A34. *Никитин П.А., Волошинов В.Б.* Квази-ортогональное и квази-коллинеарное акустооптическое взаимодействие в поглощающей среде // *Ученые записки физического факультета МГУ.* — 2016. — № 6. — С. 166601.

A35. *Никитин П.А.* Метод расчета максимального значения акустооптического качества в оптически изотропных средах // *Известия РАН. Серия физическая.* — 2017. — Т. 81, № 1. — С. 93–97.
A36. *Никитин П.А.* Квазиортогональная акустооптическая дифракция на закрученном звуковом пучке // Сборник научных трудов “VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике”. — Москва, Россия: 2017. — С. 346–347.

Цитированная литература

1. *Задорин А.С.* Динамика акустооптического взаимодействия. — Томск: Томский гос. университет, 2004. — С. 352.
2. Акустооптические процессоры спектрального типа / Под ред. В.В. Проклов, В.Н. Ушаков. — М.: Изд. «Радиотехника», 2012. — С. 192.
3. Теория и практика современной акустооптики / В.Я. Молчанов, Ю.И. Китаев, А.И. Колесников и др. — М.: Изд. дом МИСиС, 2015. — С. 459.
4. *Котов В.М.* Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. — М.: Янус-К, 2016. — С. 286.
5. *Voloshinov V.B, Gupta N.* Ultraviole-visible imaging acousto-optic tunable filters in KDP // *Appl. Opt.* — 2004. — Vol. 43, no. 19. — Pp. 3901–3909.
6. *Wang P., Zhang Z.* Double-filtering method based on two acousto-optic tunable filters for hyperspectral imaging application // *Opt. Express.* — 2016. — Vol. 24, no. 9. — Pp. 9888–9895.
7. Handbook of Optical Constants of Solids / Ed. by E.D. Palik. — Orland Florida: Academic Press, 1985.
8. Terahertz Biomedical Science and Technology / Ed. by J.H. Son. — Boca Raton, FL.: CRC Press, 2014. — P. 377.
9. *Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. — М.: Радио и связь, 1985. — С. 289.
10. *Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В.* Полуколлинеарный режим дифракции света на ультразвуке в среде с сильной упругой анизотропией // *Оптика и спектроскопия.* — 2015. — Т. 118, № 1. — С. 172–181.
11. The indicative surfaces of the photoelastic effect in Cs_2HgCl_4 biaxial crystals / M.V. Kaidan, B.V. Tybinka, A.V. Zadorozhna et al. // *Optical Materials.* — 2007. — Vol. 29, no. 5. — Pp. 475–480.
12. *Mytsyk B.G., Demyanyshyn N.M., Sakharuk O.M.* Elasto-optic effect anisotropy in gallium phosphide crystals // *Appl. Opt.* — 2015. — Vol. 54, no. 28. — Pp. 8546–8553.
13. *Ahmad A.K., Majeed M.F.* Calculation of acousto-optic figure of merit for some of oxide crystals // *Int. J. Opt. and Appl.* — 2016. — Vol. 6, no. 1. — Pp. 1–6.

14. Anisotropy of acousto-optic figure of merit in optically isotropic media / O. Mys, M. Kostyrko, M. Smyk et al. // *Appl. Opt.* — 2014. — Vol. 53, no. 20. — Pp. 4616–4627.
15. *Mys O., Kostyrko M., Vlokh R.* Anisotropy of acousto-optic figure of merit for $LiNbO_3$ crystals: anisotropic diffraction // *Appl. Opt.* — 2016. — Vol. 55, no. 9. — Pp. 2439–2450.
16. *Kogelnik H.* Coupled wave theory for thik hologram gratings // *The Bell System Technical Journal.* — 1969. — Vol. 48, no. 9. — Pp. 2909–2847.
17. *Montemezzani G., Zgonik M.* Light diffraction at mixed phase and absorption gratings in anisotropic media for arbitrary geometries // *Phys. Rev. E.* — 1997. — Vol. 55, no. 1. — Pp. 1035–1047.
18. *Zakharyan G.G., Galstyan A.V.* Mixed phase and absorption thin gratings diffraction // *Opto-Electron. Rev.* — 2007. — Vol. 15, no. 1. — Pp. 20–26.
19. Influence of the absorption grating on the diffraction efficiency in thick photovoltaic media in transmission geometry under non linear regimes / L.M. Cervantes, A. Zuniga, L.F. Magana, J.G. Murillo // *Rev. Mex. Fis.* — 2010. — Vol. 56, no. 4. — Pp. 323–327.
20. Comparative study of the accuracy of the PSM and Kogelnik models of diffraction in reflection and transmission holographic gratings / D. Brotherton-Ratcliffe, L. Shi, A. Osanlou, P. Excell // *Opt. Express.* — 2014. — Vol. 22, no. 6. — Pp. 32384–32405.
21. Наблюдение эффективной дифракции субмиллиметрового излучения на волнах электронной концентрации в n-InSb / В.В. Проклов, В.И. Миргородский, Ушаткин Е.Ф. и др. // *Письма в ЖТФ.* — 1978. — Т. 4, № 23. — С. 1431–1434.
22. Far-infrared laser scattering studies of density fluctuations in tokamak fusion plasmas / P. Lee, N.C. Luhmann, H. Park et al. // *Appl. Opt.* — 1982. — Vol. 21, no. 10. — Pp. 1738–1744.
23. *Durr W., Schmidt W.* Measurement of acousto-optic interaction in germanium in the far infrared // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves.* — 1985. — Vol. 6, no. 10. — Pp. 1043–1049.
24. *Vogel T., Dodel G.* Acousto-optic modulation in the far-infrared // *Infrared Phys.* — 1985. — Vol. 25, no. 1-2. — Pp. 315–318.
25. *Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б.* Описание дифракции света на ультразвуке при помощи двумерного уравнения связанных мод // *Радиотехника и электроника.* — 2014. — Т. 59, № 5. — С. 498–509.