

На правах рукописи

Михайловский Ростислав Викторович

**ИЗЛУЧЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН
В СЭНДВИЧ-СТРУКТУРАХ И МЕТАМАТЕРИАЛАХ**

01.04.21 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Бакунов М.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Жаров А.А.
Институт физики микроструктур РАН

кандидат физико-математических наук
Введенский Н.В.
Институт прикладной физики РАН

Ведущая организация: Международный лазерный центр МГУ

Защита состоится “_____” _____ 2012 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. __, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан “_____” _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Освоение терагерцового диапазона электромагнитных волн – бурно развивающееся направление современной фотоники. Интерес к этому диапазону вызван перспективами широкого применения терагерцового излучения в фундаментальных исследованиях и практических приложениях. В терагерцовом диапазоне лежат резонансы многих сложных молекул – биологических конститuentов, взрывчатых и отравляющих веществ, что позволяет обнаруживать и идентифицировать подобные вещества в небольших концентрациях. С помощью короткоимпульсного терагерцового излучения удастся проводить так называемую спектроскопию во временной области, позволяющую практически мгновенно получать спектральные «отпечатки пальцев» различных веществ в широком спектральном диапазоне. Многие непрозрачные в оптическом диапазоне материалы (одежда, бумага, пластмасса и т.п.), имеют окна прозрачности в терагерцовом диапазоне, что дает возможность разрабатывать терагерцовые системы безопасности, системы контроля качества фармакологических препаратов и продуктов питания, проводить интроскопию предметов искусства и археологических артефактов.

Наиболее сложной проблемой в освоении терагерцового диапазона частот является разработка эффективных методов генерации терагерцового излучения и создание на этой основе компактных и достаточно мощных терагерцовых источников. В терагерцовом диапазоне, расположенном между инфракрасным и СВЧ диапазонами, не применимы хорошо разработанные в прошлом веке принципы генерации оптического и СВЧ излучений. За последние 20 лет, вследствие развития лазерной техники, произошел существенный прогресс в области создания компактных источников терагерцового излучения на основе оптико-терагерцового преобразования фемтосекундных лазерных импульсов. В отличие от таких громоздких установок по генерации мощного терагерцового излучения, как синхротроны, лазеры на свободных электронах и газовые лазеры, оптико-терагерцовые преобразователи уместаются на оптическом столе, а при использовании в качестве накачки фемтосекундных волоконных лазеров могут быть выполнены и в переносном варианте. В то же время, в отличие от квантовых каскадных лазеров, требующих для своей работы криогенных температур, оптико-терагерцовые преобразователи могут работать при комнатной температуре.

Распространенным «настольным» методом генерации терагерцового излучения стало воздействие фемтосекундными лазерными импульсами на фотопроводящие антенны [Smith P.R. et al. *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 255 (1988)], электрооптические [Auston, D.H. et al. *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1555

(1984)] и полупроводниковые [Zhang X.-C. et al. *Appl. Phys. Lett.* 56, 1011 (1990)] среды. Огромное число работ посвящено исследованию возможностей повышения эффективности оптико-терагерцового преобразования (см., например, монографию Sakai K., Ed., *Terahertz optoelectronics*. Springer, 2005). Однако эффективность преобразования остается пока низкой: рекордное на сегодня значение составляет 0,25% и достигается только при использовании мощных лазерных систем с энергией оптического импульса порядка 50 мДж [Fülöp J.A. et al. *Opt. Lett.* 37, 557 (2012)]. В типичных же для терагерцовой спектроскопии схемах оптико-терагерцового преобразования на основе лазеров малой мощности эффективность не превышает 10^{-5} - 10^{-6} .

Терагерцовая эмиссия с поверхности полупроводника, возбуждаемой фемтосекундными лазерными импульсами, – один из часто используемых методов оптико-терагерцового преобразования. Источником терагерцовых волн при этом является всплеск фототока (импульсный диполь), наводимый в приповерхностном слое полупроводника. Из-за ориентации диполя перпендикулярно поверхности и большого показателя преломления полупроводника основная часть излучения диполя испытывает полное отражение от границы. Для решения проблемы вывода излучения используют два основных способа – переориентацию диполя (за счет наложения на среду магнитного поля, частичного затенения пучка накачки и др.) и помещение на поверхность полупроводника согласующего элемента (линзы или призмы). В диссертации предложены схемы оптико-терагерцовых преобразователей, в которых эффективный вывод терагерцового излучения сочетается с оптимальным диэлектрическим окружением излучающего диполя. Идея состоит в использовании тонкого (в масштабе длины терагерцовой волны) полупроводникового слоя, одна из поверхностей которого металлизирована, а на другую помещена гиперполусферическая линза. Металлизация обеспечивает конструктивную интерференцию терагерцовых волн, излученных в линзу непосредственно от фотоиндуцированного диполя и после отражения от металлического покрытия. Гиперполусферическая линза обеспечивает вывод и коллимацию терагерцового излучения. В силу тонкости полупроводникового слоя условия интерференции не зависят от длины терагерцовой волны и направления эмиссии. В итоге предложенные в диссертации структуры обеспечивают значительное возрастание терагерцового выхода по сравнению с предшествующими схемами.

Еще одним распространенным методом оптико-терагерцового преобразования является нелинейное оптическое выпрямление ультракоротких лазерных импульсов в электрооптических кристаллах [Bass M. et al. *Phys. Rev. Lett.* 9, 446 (1962)]. В этом методе источником терагерцовых волн служит всплеск нелинейной поляризации, повторяющий временную огибающую оптической интенсивности и движущийся вместе с оптиче-

ским импульсом накачки с его групповой скоростью. В кристаллах, типа LiNbO_3 , у которых показатель преломления на терагерцовых частотах превышает оптический индекс группового запаздывания, движущаяся нелинейная поляризация излучает черенковский конус терагерцовых волн подобно релятивистскому диполю [Askar'yan G.A. *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2470 (1986)]. При этом наибольшей эффективности преобразования удастся достичь при использовании сэндвич-структур, в которых тонкий слой LiNbO_3 находится между отражающей терагерцовые волны подложкой и призмой из высокоомного кремния для вывода генерируемого излучения [Bodrov S.V. et al. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 201114 (2012)]. В диссертации впервые предложено использовать подобные сэндвич-структуры, но со слоем магнитооптического материала, для исследования явлений сверхбыстрого оптомагнетизма.

Сверхбыстрый оптомагнетизм – возникшее в самые последние годы направление исследования явлений, индуцируемых в магнитных материалах ультракороткими лазерными импульсами, см. Kirilyuk A. et al. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2731 (2010). Одно из наиболее важных оптомагнитных явлений – обратный эффект Фарадея, который является магнитным аналогом эффекта оптического выпрямления и состоит в наведении статической намагниченности циркулярно-поляризованным светом в магнитооптической среде. Предсказанный около 50 лет назад [Pershan P.S. *Phys. Rev.* **130**, 919 (1963)] и экспериментально подтвержденный для длинных (наносекундных) лазерных импульсов несколькими годами позже [van der Ziel J.P. et al. *Phys. Rev. Lett.* **15**, 190 (1965)] сверхбыстрый обратный эффект Фарадея был экспериментально продемонстрирован лишь совсем недавно [Kemel A.V. et al. *Nature* **435**, 655 (2005)]. Остается еще не вполне ясным механизм эффекта на фемтосекундных временных масштабах. В диссертации предложен новый метод изучения сверхбыстрого эффекта Фарадея, основанный на регистрации терагерцового черенковского излучения от релятивистки движущейся области намагниченности, создаваемой ультракоротким лазерным импульсом в сэндвич-структуре со слоем магнитооптического материала. Для сэндвич-структуры со слоем $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ предсказана амплитуда терагерцового поля, сравнимая с полями от стандартных фотопроводящих антенн.

Еще одним актуальным направлением современной прикладной физики является разработка и исследование метаматериалов – искусственных композитных сред с электромагнитными свойствами, не имеющими аналогов у природных материалов. Для метаматериалов предсказан теоретически и отчасти продемонстрирован экспериментально целый ряд необычных электродинамических эффектов [Smith D.R. *Science* **305**, 788 (2004)]. Одним из таких эффектов является обращенный эффект Черенкова в среде с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницае-

мостями. Предсказанный более 50 лет назад [Пафомов В.Е. *ЖЭТФ* **36**, 1853 (1959)] обращенный эффект Черенкова в последние годы привлекает пристальное внимание исследователей. Однако большинство работ носит абстрактно-теоретический характер. В диссертации предложена и теоретически исследована удобная для экспериментальной реализации схема исследования обращенного эффекта Черенкова в терагерцовом диапазоне частот на основе сэндвич-структуры с обкладками из метаматериала и сердцевинной из электрооптического кристалла, накачиваемого сфокусированными в линию ультракороткими лазерными импульсами. В прикладном отношении данная схема может быть использована для тестирования электродинамических свойств терагерцовых метаматериалов.

Применительно к важнейшей задаче разработки новых метаматериалов в диссертации предложена концепция магнетонного метаматериала, состоящего из ферромагнитных пленок в диэлектрической матрице и допускающего перестройку интервала частот, где магнитная проницаемость отрицательна, путем изменения внешнего магнитного поля.

Цель диссертации

Целью диссертационной работы является разработка эффективных методов преобразования ультракоротких лазерных импульсов в терагерцовое излучение на основе использования нелинейных и фотопроводящих слоистых (сэндвич) структур и исследование возможностей применения оптико-терагерцовых преобразований для изучения явлений сверхбыстрого оптомагнетизма и электродинамических эффектов в метаматериалах.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложены две оригинальные схемы оптико-терагерцовых преобразователей, обеспечивающие значительное (по порядку величины) возрастание терагерцового выхода с поверхности полупроводниковой среды под действием ультракоротких лазерных импульсов.
2. Предложен новый метод изучения сверхбыстрых оптомагнитных явлений, основанный на регистрации терагерцового черенковского излучения от релятивистки движущейся области намагниченности, создаваемой в слое магнитооптического материала ультракоротким лазерным импульсом.
3. В классической задаче о черенковском излучении магнитного диполя впервые исследован случай, когда диполь является не движущимся материальным объектом, а перемещающейся с групповой скоростью оптического импульса накачки областью намагниченности в неподвижном магнитооптическом материале.

4. Для экспериментального исследования обращённого эффекта Черенкова в левосторонних средах предложена и теоретически исследована оригинальная схема на основе сэндвич-структуры с обкладками из метаматериала и сердцевиной из электрооптического кристалла, накачиваемого сфокусированными в линию ультракороткими лазерными импульсами.
5. Впервые поставлена и решена задача о возбуждении переменным магнитным полем спиновых волн в тонких ферромагнитных плёнках с частичным закреплением спинов на поверхности. На основе полученного решения предложен новый тип метаматериала – магنونный метаматериал – в виде массива ферромагнитных пленок в диэлектрической матрице, обладающий отрицательными значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в субтерагерцовом диапазоне частот.

Практическая значимость работы

Предложенные в диссертации схемы эффективных оптико-терагерцовых преобразователей на всплесках фототока, не требующие для накачки лазерных импульсов большой энергии, могут найти широкое применение для целей спектроскопии, микроскопии, (био)сенсорики и имиджинга в терагерцовом диапазоне частот.

Для приложений к терагерцовой микроскопии и терагерцовой плазмонике важным достоинством предложенных оптико-терагерцовых преобразователей является радиальный характер поляризации генерируемого ими терагерцового излучения. Такое излучение, во-первых, допускает более сильную фокусировку по сравнению с линейно поляризованным излучением и, во-вторых, обеспечивает простоту ввода излучения в коаксиальные и проводные волноводы.

Предложенная в диссертации схема генерации обращенного черенковского излучения терагерцовых волн ультракоротким лазерным импульсом, распространяющимся в сэндвич-структуре с нелинейной сердцевиной и обкладками из метаматериала, может быть использована для экспериментального тестирования электродинамических свойств терагерцовых метаматериалов и, в частности, для определения частотных интервалов, где метаматериал обладает свойствами левосторонней среды. Предложенная схема имеет ряд преимуществ по сравнению с разрабатываемыми в настоящее время схемами реализации обращенного эффекта Черенкова на основе электронных пучков, в частности, она не требует для работы вакуума и допускает скэйлинг генерируемой терагерцовой энергии при повышении мощности накачки.

Предложенный в диссертации магنونный метаматериал обладает важным для практических приложений свойством перестройки частотного

интервала отрицательной магнитной проницаемости при изменении внешнего постоянного магнитного поля.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Терагерцовая эмиссия с поверхности полупроводника при воздействии ультракороткими лазерными импульсами может быть значительно увеличена путем оптимизации диэлектрического окружения области эмиссии. В сэндвич-структуре с тонким (по сравнению с длиной терагерцовой волны) полупроводниковым слоем, заключенным между металлической подложкой и элементом вывода излучения (гиперполусферической линзой), терагерцовый выход может быть на порядок больше, чем в традиционных схемах генерации. Предложенные структуры обеспечивают конструктивную интерференцию терагерцовых волн в широком частотном диапазоне, увеличивая, таким образом, терагерцовый выход. Генерируемое сэндвич-структурой терагерцовое излучение имеет радиальную поляризацию, предпочтительную для ряда приложений.
2. Распространяющийся в магнитооптической среде циркулярно-поляризованный фемтосекундный лазерный импульс индуцирует, за счет обратного эффекта Фарадея, импульс нелинейной намагниченности, который движется с групповой скоростью лазерного импульса и может генерировать черенковское излучение в терагерцовом диапазоне частот. Эффективный вывод излучения из среды в свободное пространство может быть осуществлен при использовании сэндвич-структуры в виде слоя магнитооптического материала, прикрепленного к согласующей призме. В сэндвич-структуре с кристаллом $Tb_3Ga_5O_{12}$ и призмой из высокоомного кремния возможна генерация терагерцовых полей, сравнимых с полями, получаемыми в стандартных оптико-терагерцовых преобразователях.
3. Сэндвич-структура с обкладками из метаматериала и сердцевиной из электрооптического кристалла, накачиваемого сфокусированными в линию ультракороткими лазерными импульсами, является удобной схемой для экспериментального исследования обращенного эффекта Черенкова в левосторонних средах. В результате нелинейного оптического выпрямления лазерного импульса в сердцевине наводится релятивистски движущийся импульс поляризации, генерирующий терагерцовое черенковское излучение в метаматериальных обкладках. В интервале частот, где метаматериал обладает свойствами левосторонней среды, черенковское излучение является обращенным (вектор Пойнтинга составляет тупой угол со скоростью импульса поляризации). Изменением толщины сердцевины и длительности импульса накачки можно управлять спектром обращенного черенковского излучения. Выбором формы метаматериальных обкладок можно обеспечить эффективный и

раздельный вывод в свободное пространство обычной (прямой) и обращённой компонент черенковского излучения. По сравнению с разрабатываемыми в настоящее время схемами реализации обращенного эффекта Черенкова на основе электронных пучков использование лазерного импульса в качестве источника излучения дает ряд преимуществ: повышение частоты излучения от гигагерц до терагерц увеличивает мощность излучения, фокусировка импульса накачки в линию обеспечивает возможность скэйлинга генерируемой терагерцовой энергии при повышении мощности накачки, спектр излучения допускает перестройку путем изменения длительности импульса накачки, предложенная схема не требует вакуума.

4. Эффект закрепления спинов на поверхностях тонкой ферромагнитной плёнки создает возможность возбуждения в пленке стоячих спиновых волн однородным переменным магнитным полем. Резонансные частоты этих волн значительно превосходят частоту ферромагнитного резонанса однородной среды. Для кобальт-железной плёнки толщиной несколько нанометров магнитный отклик, соответствующий низшей неоднородной спиновой моде, может быть достаточно сильным для обеспечения отрицательной эффективной магнитной проницаемости метаматериала из массива тонких пленок, разделенных диэлектриком. Поскольку на резонансных (субтерагерцовых) частотах спиновых волн диэлектрическая проницаемость (металлической) плёнки также отрицательна, такой метаматериал может обладать свойством левосторонности.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах и 3 работы в трудах конференций.

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах кафедры общей физики ННГУ и семинарах в университете Эксетер, Великобритания, а также на следующих конференциях:

3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2009), London, UK, August 31-September 3, 2009;

Magnonics: from Applications to Fundamentals, Dresden, Germany, August 2-8, 2009;

4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2010), Karlsruhe, Germany, September 13-16, 2010;

XII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород, 24-29 мая, 2010;

Moscow International Magnetism Symposium (MISM 2011), Moscow, Russia, August 22-25, 2011.

Личный вклад автора

Автором были самостоятельно выполнены аналитические выкладки. Постановка задач и анализ полученных результатов в главах 1-3 проводились совместно с научным руководителем Бакуновым М.И. Численные расчёты проводились совместно с к.ф.-м.н. Бодровым С.Б. Концепция магنونного материала, изложенная в главе 4, предложена автором совместно с Кругляком В.В. и Хендри Ю. Теоретическое описание предложенной магنونной структуры и все сопутствующие расчёты выполнены автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, включая 26 рисунков, список литературы из 153 наименований на 15 страницах и список публикаций по диссертации из 7 наименований на 2 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе предложены и исследованы две схемы высокоэффективных опико-терагерцовых преобразователей, основанных на возбуждении сверхбыстрых всплесков фототока при воздействии на поверхность полупроводника ультракороткими лазерными импульсами. Особенность новых схем – использование структур типа сэндвича с тонким (в масштабе длины терагерцовой волны) полупроводниковым слоем, заключенным между металлическим экраном и гиперполусферической линзой, что позволяет увеличить терагерцовый выход за счет интерференционных эффектов и оптимизации вывода излучения из полупроводника.

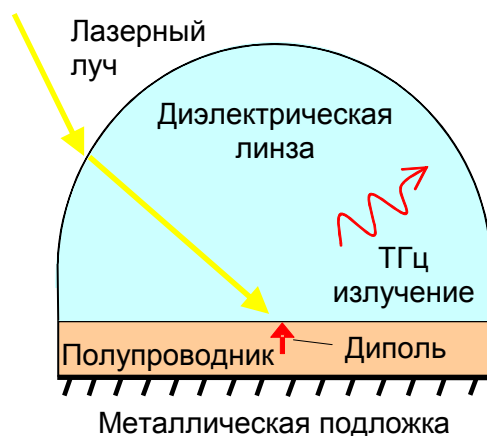


Рис. 1. Схема опико-терагерцового преобразователя отражательного типа.

В п. 1.1 предложена и теоретически исследована схема оптико-терагерцового преобразователя отражательного типа на основе структуры «диэлектрическая (MgO, сапфир) гиперполусферическая линза – тонкий слой полупроводника – металлическая подложка» (рис. 1). Лазерный импульс фокусируется на поверхность полупроводникового слоя через линзу и индуцирует в полупроводнике всплеск фототока, который и является источником терагерцовых волн. При отражении от металлической подложки тангенциальная компонента электрического поля терагерцовой волны испытывает фазовый сдвиг на 180° . Это обеспечивает конструктивную интерференцию терагерцовых волн, излученных в линзу непосредственно и после отражения от подложки. В силу тонкости полупроводникового слоя конструктивный характер интерференции сохраняется для широкого спектра терагерцовых частот. Линза обеспечивает вывод и коллимацию терагерцового излучения. В диссертации рассчитано угловое распределение мощности излучения в линзу из слоя InAs толщиной 500 нм на металлической подложке. Показано, что полная мощность излучения при этом существенно больше, чем в рассматривавшихся ранее структурах: в ~ 22 раза больше, чем в структуре «GaAs призма – тонкий слой InAs – воздух», и в ~ 7 раз больше, чем в структуре «MgO линза – InAs».

В п. 1.2. предложена и теоретически исследована удобная для практического применения схема с разделением оптического и терагерцового пучков на основе структуры типа «металлическое покрытие с микроотверстием – тонкий слой рабочего полупроводника – кремниевая подложка – кремниевая гиперполусферическая линза» (рис. 2). В качестве «рабочего» полупроводника рассматривается слой InAs толщиной 500 нм. В металлическом покрытии имеется отверстие диаметром ~ 10 –30 мкм, через которое происходит возбуждение поверхности InAs импульсами титан-сапфирового лазера. В силу малости диаметра отверстия по сравнению с длиной терагерцовой волны наличие отверстия практически не оказывает влияния на генерацию. Как и в отражательной схеме (п. 1.1) покрытие обеспечивает конструктивную интерференцию терагерцовых волн, излученных в кремниевую подложку непосредственно из слоя InAs и после отражения от покрытия. Гиперполусфе-



Рис. 2. Схема оптико-терагерцового преобразователя с разделением оптического и терагерцового пучков.

рическая линза обеспечивает вывод и коллимацию терагерцового излучения. В диссертации рассчитано угловое распределение мощности излучения в линзу из слоя InAs толщиной 500 нм на металлической подложке. Показано, что полная мощность излучения при этом существенно больше, чем в рассматривавшихся ранее структурах: в ~ 22 раза больше, чем в структуре «GaAs призма – тонкий слой InAs – воздух», и в ~ 7 раз больше, чем в структуре «MgO линза – InAs».

рическая линза обеспечивает вывод и коллимацию терагерцового излучения. В диссертации рассчитаны угловое распределение мощности излучения в линзу и полная мощность излучения. Разработан дизайн гиперполусферической линзы.

В п. 1.3 сделаны выводы по первой главе.

Во второй главе разработана теория генерации черенковского излучения терагерцовых волн релятивистски движущейся областью оптонамагниченности в сэндвич-структуре, состоящей из слоя магнитооптического материала и согласующей призмы (рис. 3). Фемтосекундный лазерный импульс круговой поляризации фокусируется цилиндрической линзой в линию и заводится в магнитооптический слой с торца. Распространяясь вдоль границы с согласующей призмой, лазерный импульс создает в слое, за счет обратного эффекта Фарадея, область намагниченности, которая движется с групповой скоростью лазерного импульса и излучает черенковский клин терагерцовых волн в призму.

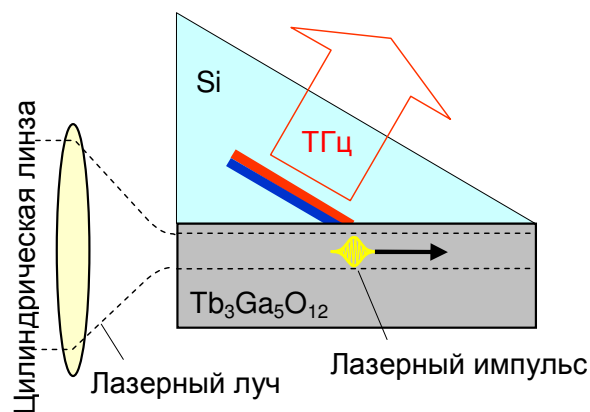


Рис. 3. Схема генерации терагерцового черенковского излучения релятивистски движущейся областью оптонамагниченности.

В п. 2.1 описана схема генерации (рис. 3), введена модель движущегося нелинейного источника (импульса намагниченности) с обсуждением ее применимости и записаны основные уравнения.

В п. 2.2 найдены выражения для полей черенковского излучения, генерируемых в магнитооптической сэндвич-структуре общего вида. Получено удобное для практических оценок приближённое выражение для максимального терагерцового поля в призме. Проведен анализ зависимости максимального поля от параметров структуры и импульса накачки.

В п. 2.3 общая теория, развитая в п. 2.2, применена к структуре, состоящей из кремниевой призмы и слоя тербиевого галлиевого гранта, накачиваемого импульсами титан-сапфирового лазера. Построена картина терагерцового поля в структуре, исследованы осциллограмма и спектр излучения, вышедшего в свободное пространство. Сделаны численные оценки максимального терагерцового поля и мощности излучения. Показана реализуемость детектирования излучения с помощью стандартной техники электрооптического стробирования.

В п. 2.4 сделаны выводы по второй главе.

В третьей главе предложена и проанализирована схема экспериментальной реализации обращенного эффекта Черенкова на основе сэндвич-структуры с обкладками из метаматериала и сердцевиной из электрооптического кристалла, накачиваемого ультракороткими лазерными импульсами (рис. 4). Фемтосекундный лазерный импульс линейной поляризации фокусируется цилиндрической линзой в линию и заводится в электрооптический слой с торца. Распространяясь в сердцевине в виде волноводной моды, лазерный импульс создает, за счет эффекта оптического выпрямления, движущийся импульс нелинейной поляризации, который и генерирует черенковское излучение в метаматериальных обкладках структуры. На частотах, где метаматериал обладает свойствами левосторонней среды, черенковское излучение является обращенным. Скошенные грани обкладок обеспечивают вывод прямой (с вектором Пойнтинга \mathbf{S}_d на рис. 4) и обращенной (с вектором Пойнтинга \mathbf{S}_r) компонент черенковского излучения в свободное пространство.

В п. 3.1 описана схема генерации (рис. 4), дано выражение для нелинейной поляризации и приведены основные уравнения.

В п. 3.2 получены выражения для терагерцовых полей, генерируемых в сэндвич-структуре общего вида, и для терагерцовой энергии, излученной с единицы площади границы раздела обкладка-серцевина.

В п. 3.3 на основе построенной общей теории рассмотрен пример сэндвич-структуры с сердцевиной из LiNbO_3 и обкладками из модельного метаматериала, диэлектрическая и магнитная проницаемости которого описываются формулами Друде-Лоренца. Накачка осуществляется импульсами титан-сапфирового лазера. Построена картина терагерцового поля в структуре. Рассчитано спектральное распределение терагерцового флюенса. Исследованы зависимости терагерцового флюенса и эффективности оптико-терагерцовой конверсии от толщины сердцевины структуры и длительности импульса накачки.

В п. 3.4 сделаны выводы по третьей главе.

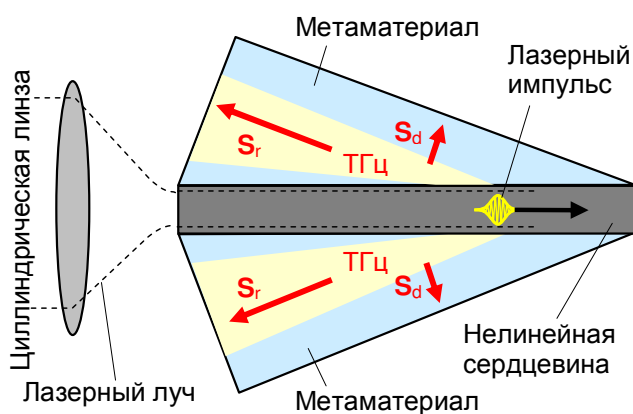


Рис. 4. Схема реализации обращенного эффекта Черенкова.

В четвёртой главе разработана теория эффективной магнитной восприимчивости многослойного метаматериала, состоящего из тонких ферромагнитных плёнок с закреплением намагниченности на одной из поверхностей пленки или на обеих ее поверхностях.

В п. 4.1 сформулирована постановка задачи и приведены основные уравнения, описывающие динамику намагниченности в тонкой ферромагнитной плёнке.

В п. 4.2 построена общая теория магнитного отклика тонкой ферромагнитной плёнки на приложенное однородное переменное магнитное поле при наличии постоянного поля подмагничивания. Рассматриваются два характерных случая: постоянное магнитное поле ориентировано в плоскости плёнки и перпендикулярно этой плоскости. Получено решение уравнения Ландау-Лифшица для намагниченности пленки при обменных граничных условиях общего вида. Проанализированы простые предельные случаи.

В п. 4.3 излагается метод нахождения тензора эффективной магнитной проницаемости рассматриваемого метаматериала. Показано, что в определённых случаях распространение нормальных волн можно описать в терминах скалярной эффективной магнитной проницаемости.

В п. 4.4 общая теория, разработанная в пп. 4.2 и 4.3, применена для описания магнитных свойств метаматериала, состоящего из плёнок сплава кобальт-железо толщиной в несколько нанометров. Исследована зависимость эффективной магнитной проницаемости от частоты, величины поля подмагничивания, параметра закрепления намагниченности на поверхности пленки и от толщины пленки. Обнаружено существование частотного интервала, где эффективная магнитная проницаемость отрицательна, и показано, что этот интервал можно двигать, изменяя поле подмагничивания.

В п. 4.5 сформулированы выводы по четвертой главе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложена схема эффективного оптико-терагерцового преобразователя отражательного типа на основе структуры типа «диэлектрическая гиперполусферическая линза – тонкий слой полупроводника – металлическая подложка». Фемтосекундный лазерный импульс фокусируется на поверхность полупроводникового слоя через гиперполусферическую линзу и индуцирует в полупроводнике всплеск фототока. Металлическая подложка обеспечивает конструктивную интерференцию терагерцовых волн, излученных фототоком в линзу непосредственно и после отражения от подложки. В силу тонкости полупроводникового слоя конструктивный характер интерференции сохраняется для широкого

спектра терагерцовых частот. Специально рассчитанная гиперполусферическая линза обеспечивает вывод и коллимацию терагерцового излучения. Показано, что в структуре со слоем InAs толщиной 500 нм терагерцовый выход значительно (на порядки величин) больше, чем в предшествующих схемах оптико-терагерцового преобразования на поверхности полупроводника.

2. Предложена схема эффективного оптико-терагерцового преобразователя на основе структуры типа «металлическое покрытие с микроотверстием – тонкий слой рабочего полупроводника – кремниевая подложка – гиперполусферическая линза», обеспечивающая удобное для практического использования пространственное разделение терагерцового и оптического пучков. Оптический импульс возбуждает поверхность полупроводника через отверстие в металлическом покрытии (диаметром ~10-30 мкм), а генерируемое терагерцовое излучение выводится через линзу с противоположной стороны структуры. Металлическое покрытие обеспечивает конструктивную интерференцию терагерцовых волн, излученных из полупроводникового слоя в кремниевую подложку непосредственно и после отражения от покрытия. Разработан дизайн гиперполусферической линзы для вывода и коллимации терагерцового излучения.
3. Предложен метод экспериментального исследования сверхбыстрых оптомагнитных явлений, основанный на регистрации терагерцового черенковского излучения от релятивистки движущейся области намагниченности, создаваемой в слое магнитооптического материала ультракоротким лазерным импульсом. Для реализации метода предложена сэндвич-структура, состоящая из слоя магнитооптического материала и согласующей призмы. Разработана теория генерации черенковского излучения в такой структуре фемтосекундным лазерным импульсом круговой поляризации за счет обратного эффекта Фарадея. Для структуры со слоем $Tb_3Ga_5O_{12}$ и призмой из высокоомного кремния предсказана возможность генерации терагерцовых полей, сравнимых по величине с полями от стандартных фотопроводящих антенн – порядка 20 В/см (без фокусировки) при накачке импульсами титан-сапфирового лазера длительностью 100 фс и энергией 100 мкДж.
4. Предложена удобная для практической реализации схема экспериментального исследования обращенного эффекта Черенкова в левосторонних средах на основе сэндвич-структуры с обкладками из метаматериала и сердцевиной из электрооптического кристалла, накачиваемого сфокусированными в линию ультракороткими лазерными импульсами. Разработана теория черенковского излучения терагерцовых волн в сэндвич-структуре с обкладками из модельного метаматериала, диэлектри-

ческая и магнитная проницаемости которого описываются общими формулами Друде-Лоренца. Показано, что путем изменения толщины сердцевины и длительности импульса накачки можно управлять спектром обращенного черенковского излучения. Предложена форма метаматериальных обкладок, обеспечивающая эффективный и отдельный вывод в свободное пространство обычной (прямой) и обращенной компонент черенковского излучения. Для сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития толщиной 40 мкм предсказана достаточно большая амплитуда электрического поля обращенного черенковского излучения – порядка нескольких кВ/см при накачке импульсами титан-сапфирового лазера длительностью 100 фс и умеренной пиковой интенсивностью ~ 40 ГВт/см².

5. Построена теория эффективной магнитной восприимчивости многослойного метаматериала, состоящего из массива тонких ферромагнитных плёнок с закреплением намагниченности на одной из поверхностей пленки или на обеих ее поверхностях. Показано, что благодаря закреплению намагниченности в пленке при наложении однородного переменного магнитного поля могут возбуждаться стоячие спиновые волны с частотами, превышающими частоту однородного ферромагнитного резонанса. Проанализировано, как частоты неоднородных спиновых мод зависят от силы закрепления спинов, толщины плёнки и других параметров. Установлено, что взаимодействие неоднородных магнитных мод с электромагнитным полем может быть достаточно сильным и приводить к отрицательным значениям эффективной магнитной проницаемости в массиве плёнок из сплава CoFe на субтерагерцовых частотах (порядка сотен гигагерц). Указаны способы повышения частоты резонанса и величины отрицательного магнитного отклика. Отмечено, что на резонансных (субтерагерцовых) частотах спиновых волн диэлектрическая проницаемость (металлических) плёнок также отрицательна, поэтому предложенный метаматериал может обладать свойством левосторонности.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Mikhaylovskiy R.V., Hendry E., Kruglyak V.V. Negative permeability due to exchange spin-wave resonances in thin magnetic films with surface pinning // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 195446.
2. Bakunov M.I., Mikhaylovskiy R.V., Tani M. Strong interference enhancement of terahertz emission from a photoexcited semiconductor surface // Optics Express. 2010. Vol. 18. P. 22406.
3. Bakunov M.I., Mikhaylovskiy R.V., Tani M., Que C.T. A structure for enhanced terahertz emission from a photoexcited semiconductor surface // Appl. Phys. B. 2010. Vol. 100. P. 695.
4. Bakunov M.I., Mikhaylovskiy R.V., Bodrov S.B., Luk'yanchuk B.S. Reversed Cherenkov emission of terahertz waves from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core and left-handed cladding // Optics Express. 2010. Vol. 18. P. 1684.
5. Mikhaylovskiy R.V., Dvornik M., Dmytriiev O., Kruglyak V.V. Magnonic meta-materials // Book of abstracts of Moscow International Magnetism Symposium (MISM 2011), Moscow, Russia, August 22-25, 2011. P. 590.
6. Mikhaylovskiy R.V., Hendry E., Kruglyak V.V. Negative permeability from high frequency spin wave resonances in thin ferromagnetic films // Proceedings of the Fourth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2010), Karlsruhe, Germany, September 13-16, 2010. P. 62-64.
7. Бакунов М.И., Михайловский Р.В. Обращённый эффект Черенкова в сэндвич-структуре с нелинейной сердцевиной и обкладками из метаматериала // Сборник трудов участников XII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород, 24-29 мая, 2010. Секция 7, с. 53-56.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Эффективные преобразователи ультракоротких лазерных импульсов в широкополосное терагерцовое излучение на всплесках фототока

- 1.1. Оптико-терагерцовый преобразователь отражательного типа
- 1.2. Оптико-терагерцовый преобразователь с разделением оптического и терагерцового пучков
- 1.3. Выводы

Глава 2. Черенковское излучение терагерцовых волн движущимися областями оптонамагниченности

- 2.1. Постановка задачи и основные уравнения
- 2.2. Общее решение для структуры типа магнитооптический слой - согласующая призма
- 2.3. Черенковское излучение в структуре $Tb_3Ga_5O_{12}-Si$
- 2.4. Выводы

Глава 3. Обращённый эффект Черенкова в сэндвич-структуре с нелинейной сердцевиной и обкладками из метаматериала

- 3.1. Схема генерации. Основные уравнения
- 3.2. Решение для сэндвич-структуры общего вида
- 3.3. Анализ полей и энергии излучения для структуры с сердцевиной из ниобата лития и обкладками из модельного метаматериала
- 3.4. Выводы

Глава 4. Отрицательная магнитная проницаемость для субтерагерцовой волны в многослойной структуре из ферромагнитных плёнок и диэлектрической матрицы

- 4.1. Геометрия задачи и основные уравнения
- 4.2. Общее решение для прецессии намагниченности
- 4.3. Тензор эффективной магнитной проницаемости
- 4.4. Магнитная проницаемость и показатель преломления массива тонких магнитных плёнок из сплава CoFe
- 4.5. Выводы

Заключение

Список работ по диссертации

Литература

Подписано в печать 18.09.12.Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тир. 100. Зак. 630.

Отпечатано в Центре цифровой печати РИУ
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
603950, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.