

На правах рукописи

БОДРОВ Сергей Борисович

**ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ДВИЖУЩИМИСЯ
СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

01.04.03 – радиофизика
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 – 2006

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

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
с.н.с. В.Я. Алешкин
кандидат физико-математических наук
доцент А.П. Шкуринов

Ведущая организация: Институт спектроскопии РАН

Защита состоится “_____” _____ 2006 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. 4, ауд. 201.

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

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

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

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Освоение терагерцового (ТГц) диапазона частот – одно из наиболее “горячих” и бурно развивающихся направлений современной прикладной физики. Терагерцовый бум, охвативший многие исследовательские группы в различных странах мира, обусловлен перспективами широких практических приложений ТГц излучения (Т-лучей). В терагерцовом диапазоне лежат спектры многих важных органических молекул, включая белки и ДНК, а также фононные резонансы кристаллических решеток, что позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых образцов (Smye S.W. et al, *Phys. Med. Biol.* **46**, R101 (2001), Huber R. et al., *Nature* **414**, 286 (2001)). С помощью терагерцового излучения можно управлять химическими реакциями (Dudovich N. et al., *Nature* **418**, 512 (2002)) и манипулировать электронными состояниями в квантовых ямах (Cole B.E. et al., *Nature* **410**, 60 (2001)). В отличие от рентгена Т-лучи позволяют проводить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов (Fitzgerald A.J. et al., *Phys. Med. Biol.* **47**, R67 (2002)). Перспективны такие применения ТГц излучения, как беспроводная коммуникация компьютеров и периферийных устройств внутри зданий, разработка систем безопасности на основе терагерцового видения (Zandonella C. *Nature* **424**, 721 (2003)) и др.

Наиболее сложной проблемой в освоении терагерцового диапазона является разработка эффективных методов генерации когерентного ТГц излучения. В этом диапазоне, расположенном на оси частот между инфракрасным и микроволновым диапазонами, не применимы хорошо разработанные за последние полвека физические принципы генерации оптического и СВЧ излучений.

Существенный прогресс в области создания компактных источников когерентного терагерцового излучения произошел в 90-е годы 20-го века в связи с появлением мощных фемтосекундных лазеров. Излучение таких лазеров способно наводить в веществе всплески поляризации (или тока) субпикосекундной длительности, которые и являются источником терагерцового излучения. Физические механизмы создания всплеска поляризации (тока) могут быть как нелинейными (пандеромоторная сила в плазме, нелинейно-оптическое выпрямление в электрооптических средах), так и линейными (фотоионизация в полупроводниках). В настоящее время взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с электрооптическими и полупроводниковыми средами стало наиболее распространенным способом генерации терагерцового излучения (Wynne K. et. al., *Opt. Communication*, **256**, 400 (2005)). Оптико-терагерцовые преобразователи на основе таких сред сравнительно дешевы, компактны и могут генерировать мощности до несколько кВт (Ахмеджанов Р.А. и др., *Изв. Вузов. Радиофизика*, **48**, 939 (2005)). Их основным недостатком является малый коэффициент преобразования по энергии – порядка 10^{-5} – 10^{-6} , так что «поиск эффективных источников терагерцового излучения продолжается» (Koch M. *Laser Focus World* **41**, 97 (2005)).

Все применяемые в настоящее время методы оптико-терагерцовой конверсии направлены на генерацию объемных терагерцевых волн, распространяющихся от области конверсии в виде свободного излучения. В диссертации выдвигается идея генерации терагерцевых волн, направляемых поверхностью полупроводника, и предлагаются методы генерации таких волн движущимися вдоль поверхности светоиндуцированными нелинейными источниками. Исследование проведено на примере поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), которые могут направляться поверхностью легированного полупроводника благодаря вкладу свободных носителей в диэлектрическую проницаемость.

Генерация поверхностных терагерцевых волн имеет ряд преимуществ перед генерацией свободного терагерцевого излучения. При этом удается избежать ограничений на мощность оптической накачки, связанных с двухфотонным поглощением. Действительно, для генерации поверхностных волн не требуется проникновения накачки вглубь полупроводника – важно создать нелинейный источник в узком приповерхностном слое, где локализованы поля поверхностной волны. Для поверхностных волн менее существенным, чем для генерируемого в объеме кристалла свободного излучения, является и фактор линейного поглощения на терагерцевых частотах. Наиболее же важное в прикладном отношении обстоятельство состоит в следующем.

Из-за сильной локализации поверхностных волн вблизи волноведущей поверхности такие волны очень чувствительны к состоянию поверхности. В связи с этим поверхностные плазмон-поляритоны оптического и инфракрасного диапазонов, направляемые поверхностями металлов (Ag, Au), широко используются для различных приложений – в биосенсорике (Liedberg V. et al., *Biosens. Bioelectron.* **10**, i (1995)), для обнаружения малых поверхностных загрязнений (Bussjager R.J., Macleod H.A. *Appl. Opt.* **35**, 5044 (1996)) и т.д. Аналогично терагерцевые поверхностные волны могут быть использованы для поверхностной спектроскопии в терагерцевом диапазоне. При этом, однако, поверхности металлов не подходят в качестве волноведущих поверхностей, т.к. терагерцевые ППП на металлических поверхностях слабо локализованы и, вследствие этого, не чувствительны к наличию на этих поверхностях тонких пленок. Представляется естественным использовать полупроводниковые поверхности, электромагнитные свойства которых в терагерцевом диапазоне аналогичны свойствам металлических поверхностей в оптическом диапазоне.

В диссертации предложено возбуждать ТГц поверхностные волны фемтосекундными оптическими импульсами непосредственно на поверхности полупроводников. При этом поверхность выполняет сразу две роли: во-первых, обладает необходимой для оптико-терагерцовой конверсии нелинейностью и, во-вторых, направляет возбуждаемую поверхностную волну. Предложены и исследованы две схемы генерации терагерцевых ППП – черенковское излучение поверхностных волн светоиндуцированным источником, движущимся вдоль поверхности полупроводника со сверхсветовой скоростью, и синхронизованное возбуждение досветовым источником.

В качестве примера, демонстрирующего возможности применения терагерцовых ППП для целей сверхбыстрой поверхностной спектроскопии, в диссертации рассмотрена задача о трансформации терагерцового ППП, направляемого поверхностью металла, при быстрой фотогенерации носителей в нанесенном на эту поверхность тонком полупроводниковом слое.

Привлекательной средой для оптико-терагерцовой конверсии является газовая плазма, позволяющая использовать высокие интенсивности лазерного излучения и, следовательно, генерировать терагерцовое излучение большой мощности. Известно, что распространяющийся в однородной плазме мощный фемтосекундный лазерный импульс может оставлять за собой ленгмюровские колебания большой амплитуды (с напряженностью электрического поля порядка ГВ/см) – так называемую кильватерную волну (Tajima T., Dawson J.M. *Phys. Rev. Lett.* **43**, 267 (1979)). Исследование кильватерных волн в целях создания компактных лазерных ускорителей частиц активно ведется уже более 25 лет (см., например, обзор Bingham R. et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **46**, R1 (2004)). В экспериментах концентрация плазмы составляет обычно около 10^{16} см⁻³, при этом плазменная частота лежит как раз в терагерцовом диапазоне. Однако использовать интенсивные плазменные колебания в качестве источника терагерцового излучения непосредственно нельзя – их групповая скорость равна нулю (или мала при учете теплового движения в плазме), и, следовательно, они не могут высвечиваться из плазмы в вакуум. Предложенная в работе Yoshii J. et al., *Phys. Rev. Lett.* **79**, 4194 (1997) идея состоит в наложении на плазму внешнего магнитного поля. В магнитоактивной плазме терагерцовая кильватерная волна приобретает конечную групповую скорость и, следовательно, может высвечиваться из плазмы в вакуум. Простые оценки в рамках одномерной модели предсказывают высокую мощность излучения (до МВт) (Yoshii J. et al., *Phys. Rev. Lett.* **79**, 4194 (1997)), но расходятся с результатами экспериментов (см., например, Yugami N. et al., *Phys. Rev. Lett.* **89**, 065003 (2002)), в которых для достижения высокой интенсивности оптического излучения используют сильно сфокусированные лазерные пучки. Для исследования роли поперечного размера лазерного пучка и объяснения имеющихся экспериментальных данных в диссертации построена двумерная теория возбуждения терагерцовых волн оптическими импульсами в магнитоактивной плазме.

Цель диссертации

Целью диссертации является разработка методов генерации терагерцовых поверхностных волн при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами высокой интенсивности на поверхность полупроводника и построение теории генерации объемного терагерцового излучения при распространении мощных лазерных импульсов в газовой магнитоактивной плазме.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые выдвинута идея генерации терагерцовых поверхностных волн движущимися по поверхности полупроводника светоиндуцированными источниками.
2. Предложены две схемы генерации терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов – черенковское излучение сфокусированным световым пятном, движущимся по поверхности полупроводника со сверхсветовой скоростью, и синхронизованное возбуждение световой полоской, движущейся с досветовой скоростью. Сверхсветовой источник предлагается создавать путем наклонного освещения поверхности фемтосекундным лазерным импульсом, сфокусированным цилиндрической линзой в поперечном по отношению к плоскости падения направлении. Досветовой источник – путем освещения поверхности по нормали слабо сфокусированным лазерным импульсом со скошенным (по отношению к фазовым фронтам) фронтом интенсивности.
3. Классическая теория черенковского излучения электромагнитных волн движущимся источником развита на случай излучения поверхностных волн.
4. Впервые поставлена и решена задача о трансформации поверхностного плазмона, направляемого поверхностью металла, при быстрой фотогенерации носителей в нанесенном на эту поверхность тонком полупроводниковом слое. Обнаружены интересные для целей сверхбыстрой спектроскопии эффекты возникновения биений полей поверхностного плазмона и его сильного высвечивания в виде свободного излучения в случае, когда плазменная частота созданных в слое носителей близка к частоте поверхностного плазмона.
5. В теории генерации необыкновенных волн терагерцовой частоты лазерными импульсами в магнитоактивной плазме впервые сделан выход за рамки простейшей одномерной модели. Построена двумерная теория, которая учитывает конечность поперечного размера лазерного пучка и позволяет объяснить экспериментальные данные.

Практическая значимость работы

Предложенные в работе методы генерации терагерцовых поверхностных волн движущимися по поверхности полупроводника нелинейными светоиндуцированными источниками могут служить основой для развития поверхностной терагерцовой спектроскопии. Сделанные оценки предсказывают высокие значения эффективности конверсии для схемы синхронизованного возбуждения.

Построенная теория генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в магнитоактивной плазме содержит конкретные рекомендации по оптимизации параметров оптической накачки, которые могут быть использованы в экспериментах для повышения эффективности оптико-терагерцовой конверсии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. При воздействии на поверхность полупроводника фемтосекундными лазерными импульсами специальной геометрии (цилиндрически сфокусированными, со скошенным фронтом интенсивности) можно создавать движущиеся по поверхности световые пятна, которые генерируют поверхностные терагерцовые волны. Источником волн является нелинейная поляризация, наводимая в области светового пятна за счет оптического выпрямления лазерного импульса.
2. При сверхсветовом движении сфокусированного светового пятна по поверхности легированного полупроводника генерируется континуум поверхностных плазмон-поляритонов в пределах черенковского конуса (клина). В зависимости от ориентации нелинейной поляризации картина поля излучения может быть как симметричной относительно траектории движения пятна, так и асимметричной. Спектральная плотность энергии излучения имеет максимум, положение и ширина которого зависят от степени фокусировки и длительности лазерного импульса, а также от скорости движения светового пятна по поверхности (угла падения лазерного пучка). При интенсивности излучения титан-сапфирового ($\lambda = 0,8$ мкм) лазера 50 ГВт/см^2 напряженность терагерцового электрического поля на поверхности *n*-GaAs оценивается как $0,2 \text{ кВ/см}$.
3. При досветовом движении по поверхности полупроводника светового пятна в виде полоски достигается фазовый синхронизм с квазиплоской поверхностной волной определенной (терагерцовой) частоты, что повышает эффективность оптико-терагерцовой конверсии. Частоту генерируемой волны (плазмон-поляритона) можно перестраивать, изменяя скорость движения световой полоски и степень легирования полупроводника. В случае, когда энергия кванта оптической накачки меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, энергетическая эффективность конверсии может быть на порядок больше, чем при энергии кванта, превышающей ширину запрещенной зоны, и на поверхности *n*-GaAs может достигать 10^{-6} при интенсивности оптического ($\lambda = 1,56$ мкм) излучения 2 ГВт/см^2 .
4. Быстрая фотогенерация носителей в тонком полупроводниковом слое на поверхности металла, направляющей терагерцовый поверхностный плазмон, приводит к эффекту периодического обмена энергией между поверхностным плазмоном и плазменными колебаниями в слое при условии, что плазменная частота созданных носителей близка к частоте поверхностного плазмона. При малом замедлении поверхностного плазмона значительная часть его энергии после фотоионизации высвечивается в вакуум.
5. Энергетические и частотно-угловые характеристики терагерцового черенковского излучения, возбуждаемого фемтосекундным лазерным импульсом в магнитоактивной плазме, сильно зависят от ширины (степени фокусировки) лазерного пучка. При уменьшении ширины импульса энергия излучения (с единицы длины пробега импульса) растет, однако, в основном за счет гармоник с малой групповой скоростью,

затухающих вблизи области генерации и поэтому не представляющих практического интереса. Существует интервал значений ширины пучка, оптимизирующих энергию и спектральный состав излучения. Мощность терагерцового излучения вперед (в направлении распространения лазерного импульса) слабо зависит от степени фокусировки оптического излучения в практически интересном интервале значений и сильно (кубично) зависит от плазменной частоты.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах и 11 работ в трудах конференций.

Основные результаты докладывались на Международных конференциях по лазерам, электрооптике и квантовой электронике CLEO/IQEC-2004 (Сан-Франциско, США, 2004) и CLEO/QELS-2005 (Балтимор, США, 2005), 28-й и 29-й Международных конференциях по инфракрасному излучению и миллиметровым волнам (Оцу, Япония, 2003, Карлсруэ, Германия, 2004), Международной конференции "Photonics West" (Сан-Хосе, США, 2006), 8-ой Международной рабочей группе по нелинейной оптике и кинетике возбуждений в полупроводниках (Мюнстер, Германия, 2006), Международных симпозиумах по актуальным проблемам нелинейной волновой физики (Нижний Новгород-Москва-Нижний Новгород, 2003, Санкт-Петербург-Нижний Новгород, 2005), 4-ом Международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (Новосибирск, 2004), Российско-немецком лазерном симпозиуме (Нижний Новгород, 2005), а также на 4-й и 8-й Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2000, 2004), 10-й Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2005), семинарах в Институте прикладной физики РАН и Институте физики микроструктур РАН. Часть результатов включена в итоговый отчет РАН за 2005 год.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно выполнены аналитические и численные расчеты. Постановка задач и анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем Бакуновым М.И.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ по диссертации. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, включая 47 рисунков на 30 страницах, список литературы из 127 наименований на 12 страницах, список работ по диссертации из 16 наименований на 3 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе предложен и исследован метод черенковского возбуждения терагерцовых поверхностных волн светоиндуцированным нелинейным источником, движущимся вдоль поверхности полупроводника со сверхсветовой скоростью.

В п. 1.1 дано описание схемы возбуждения (рис. 1), в которой поверхность полупроводника наклонно освещается фемтосекундным лазерным импульсом, сфокусированным цилиндрической линзой в поперечном по отношению к плоскости падения направлении. Показано выполнение кинематического условия фазового синхронизма между движущимся источником и парциальной поверхностной волной в пределах черенковского конуса. Рассмотрение ведется применительно к поверхностным волнам определенного типа – поверхностным плазмон-поляритонам, направляемым поверхностью легированного полупроводника.

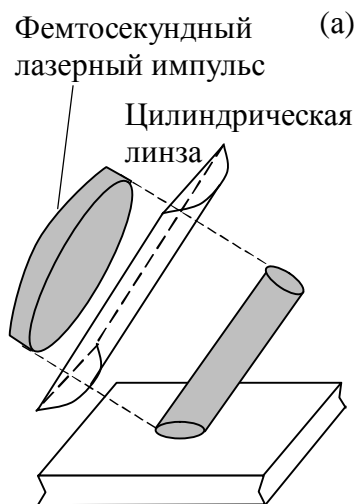
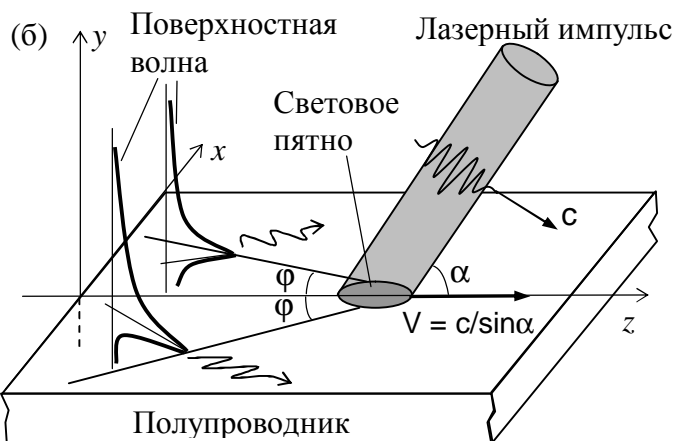


Рис. 1. Формирование лазерного импульса цилиндрической формы (а) и схема черенковского возбуждения терагерцовых поверхностных волн сверхсветовым источником (б).



В п. 1.2 записаны исходные уравнения для расчета полей возбуждаемых терагерцовых волн – уравнения Максвелла и уравнение движения свободных носителей (электронов). В уравнения Максвелла в качестве источника входит нелинейная поляризация, наводимая в полупроводнике в результате выпрямления лазерного импульса. Предполагается, что энергия оптического кванта превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, и лазерный импульс поглощается в тонком приповерхностном слое. Это соответствует типичным экспериментальным условиям возбуждения GaAs излучением титан-сапфирового лазера. Применяя преобразование Фурье к исходным уравнениям и сшивая решения полученных в результате уравнений на границе полупроводника, рассчитаны Фурье-образы электромагнитных полей в вакууме и полупроводнике.

В п. 1.3 с помощью применения техники контурного интегрирования к обратному Фурье-преобразованию из общего поля излучения выделены поверхностные волны. Построена картина поля излучения поверхностных волн. Обнаружено, что в зависимости от направления нелинейной поляризации картина поля может быть как симметричной относительно траектории движения светового пятна, так и асимметричной, что дает возможность управлять направлением эмиссии терагерцовых поверхностных волн путем изменения кристаллографической ориентации полупроводника. Исследовано влияние ширины и длительности лазерного импульса на картину поля.

В п. 1.4 исследовано спектральное распределение энергии излучения в поверхностные волны. Показано, что спектральная плотность энергии излучения имеет максимум, положение и ширина которого зависят от степени фокусировки и длительности лазерного импульса, а также от скорости движения светового пятна по поверхности. Сделан вывод, что сравнительно длинные и широкие световые пятна возбуждают в основном низкочастотные поверхностные волны, которые быстро уходят от траектории светового пятна. Именно такие “быстрые” волны являются наиболее подходящими для целей спектроскопии. Найдены значения параметров лазерного импульса (ширина, длительность, угол падения на поверхность), обеспечивающие максимальную энергию излучения в нужном спектральном интервале. Установлено, что z -компонента нелинейной поляризации наиболее эффективно возбуждает поверхностные волны. В качестве примера рассмотрено возбуждение ППП на (110)-поверхности n -GaAs при ее облучении фемтосекундным лазерным импульсом титан-сапфирового лазера. Показано, что при угле $\theta \approx 55^\circ$ между траекторией светового пятна и кристаллографическим направлением [001] достигается максимум энергии поверхностных волн, а при $\theta \approx 75^\circ$ – наиболее сильная асимметрия картины поля излучения. Приведены оценки, которые показывают, что при пиковой интенсивности оптического импульса 50 ГВт/см^2 , длительности импульса 70 фс, ширине светового пятна 100 мкм и угле падения $\alpha = 78^\circ$ генерируется терагерцовое поле с напряженностью на поверхности $\sim 200 \text{ В/см}$ на расстоянии 0,5 мм от траектории светового пятна. Энергетическая эффективность оптико-терагерцового преобразования составляет $\sim 10^{-8}$.

В п. 1.5 кратко исследовано возбуждение сверхсветовым источником уходящего в вакуум объемного терагерцового излучения. Построена полная картина терагерцового поля с учетом как поверхностных, так и объемных волн, а также ближнего поля источника. Исследовано соотношение между энергиями излучения в поверхностные и объемные волны в зависимости от угла падения лазерного импульса на поверхность. Показано, что при скользящих углах падения энергия излучения в поверхностные волны становится сравнимой с энергией объемного излучения и даже может превосходить ее.

В п. 1.6 сделаны выводы по первой главе.

Во второй главе предложен и исследован метод синхронизованного возбуждения квазиплоской терагерцовой поверхностной волны световым пятном в виде полоски, движущейся по поверхности полупроводника с досветовой скоростью. Рассмотрены два случая – когда энергия оптического

кванта превышает ширину запрещенной зоны полупроводника (лазерный импульс поглощается в приповерхностном слое) и когда энергия кванта меньше ширины запрещенной зоны (лазерный импульс распространяется в полупроводнике).

В п. 2.1 приведена схема освещения, позволяющая обеспечить движение светового пятна по поверхности с досветовой скоростью. В этой схеме (рис. 2) предлагается использовать слабосфокусированные оптические импульсы со скошенным (по отношению к фазовым фронтам) фронтом интенсивности. При нормальном падении такого импульса на поверхности создается пятно в виде полоски, скорость движения которой V зависит от угла скоса g и при $g > 45^\circ$ становится меньше скорости света ($V < c$). Это позволяет обеспечить фазовый синхронизм между квазиплоской поверхностной волной и нелинейным источником, наводимым в области светового пятна. Выражение для нелинейной поляризации записано в предположении, что энергия оптического кванта превышает ширину запрещенной зоны полупроводника и поляризация сосредоточена в тонком приповерхностном слое. Ввиду слабой фокусировки лазерного импульса используется двумерная модель с однородной вдоль оси x нелинейной поляризацией (рис. 2).

В п. 2.2 записаны исходные уравнения (уравнения Максвелла и уравнение движения свободных носителей) и получено их решение в Фурье-представлении.

В п. 2.3 исследованы кинематические свойства возбуждаемого поверхностного плазмон-поляритона: получены и проанализированы формулы для частоты и групповой скорости ППП. Показано, что оптимальные углы скоса оптического импульса, отвечающие возбуждению поверхностных волн с близкой к скорости света групповой скоростью, лежат в узком интервале, лишь на несколько градусов превышающем 45° . Рассчитано выражение для поля ППП. Построены и объяснены картины полного терагерцового поля, включающего поверхностную волну, свободное излучение в полупроводнике и ближнее поле нелинейного источника.

В п. 2.4 получены и исследованы выражения для мощности и энергии поверхностного плазмон-поляритона. Показано, что ППП наиболее эффективно возбуждается z -компонентой нелинейной поляризации (рис. 2). Приведены оценки энергетической эффективности оптико-терагерцовой конверсии для оптимальной ориентации n -GaAs (рис. 2) при облучении фемтосекундными

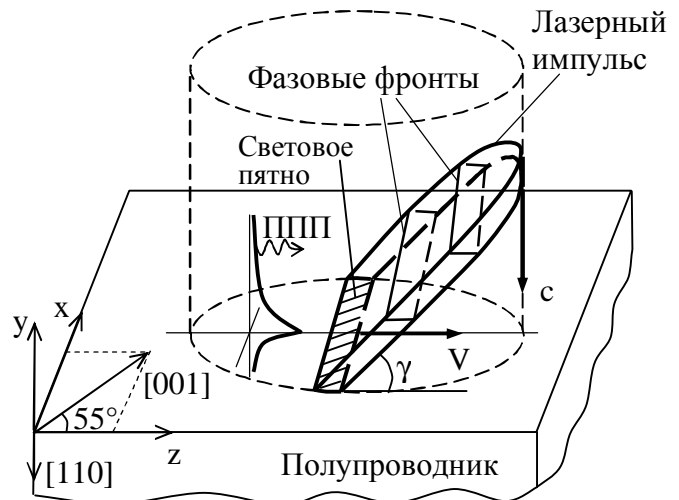


Рис. 2. Схема синхронизованного возбуждения терагерцового поверхностного плазмон-поляритона оптическим импульсом со скошенным фронтом интенсивности.

лазерными импульсами титан-сапфирового лазера. При интенсивности оптического импульса 2 ГВт/см^2 , длительности 120 фс и угле скоса фронта интенсивности $g = 45,2^\circ$ мощность (на единицу длины световой полоски) возбуждаемого ППП с частотой 3 ТГц составляет 30 Вт/см а коэффициент оптико-терагерцового преобразования $\sim 10^{-7}$.

Параграф 2.5 посвящен исследованию случая, когда энергия оптического кванта меньше ширины запрещенной зоны полупроводника. В этом случае, оптический импульс, преломляясь на границе, распространяется в полупроводнике, формируя движущуюся объемную нелинейную поляризацию. Рассчитаны картины поля терагерцового излучения. Показано, что при определенных условиях возможно синхронизованное возбуждение объемного плазмон-поляритона. Конверсия же в поверхностный плазмон-поляритон может быть на порядок более эффективной, чем в случае, когда энергия оптического кванта больше ширины запрещенной зоны.

В п. 2.6 сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена исследованию трансформации терагерцового поверхностного плазмона, направляемого поверхностью металла, при быстрой фотогенерации носителей в нанесенном на эту поверхность тонком полупроводниковом слое.

В п. 3.1 сформулирована постановка задачи и записаны основные уравнения – уравнения Максвелла и уравнение движения электронов.

В п. 3.2 получено решение основных уравнений в лапласовском представлении. На основе анализа лапласовских образов рассмотрена временная динамика перестройки электромагнитного поля в системе после фотоионизации. Показано, что при $t \rightarrow \infty$ электромагнитное поле может быть представлено в виде установившегося решения, включающего четыре поверхностные волны и постоянные токи в полупроводниковом слое, и переходного излучения (преимущественно в вакуум).

В п. 3.3 найдены выражения для частот и амплитуд поверхностных волн, возбуждаемых после ионизации полупроводникового слоя. Показано, что в случае близости плазменной частоты фотоиндуцированных носителей к частоте исходного поверхностного плазмона, происходит сильная трансформация плазмона – поля возбуждаемых поверхностных волн, имеющих близкие частоты, испытывают биения, сопровождающиеся периодической перекачкой энергии из вакуума к плазменным колебаниям в слое.

В п. 3.4 показано, что при слабом замедлении исходного поверхностного плазмона и выполнении условия плазменного резонанса в полупроводниковом слое происходит сильное высвечивание плазмона в вакуум. Рассчитано угловое распределение энергии излучения.

В п. 3.5 сделаны выводы по третьей главе.

В четвертой главе диссертации построена двумерная теория генерации терагерцового излучения в магнитоактивной плазме при распространении в ней мощного фемтосекундного оптического импульса.

В п. 4.1 рассмотрена кинематика возбуждения оптическим импульсом терагерцового излучения в виде континуума парциальных плоских волн

медленной необыкновенной моды магнитоактивной плазмы. Показано, что спектр генерируемого излучения расположен в узком интервале от плазменной частоты до верхнегибридной. Дана интерпретация эффекта с точки зрения черенковского излучения. Показано, что оценки мощности терагерцового излучения на основе ранее предложенной одномерной модели не согласуются с экспериментальными данными.

В п. 4.2 сформулирована двумерная модель, учитывающая конечную ширину оптического импульса. Записаны исходные уравнения – уравнения Максвелла и уравнение движения электронов с пондеромоторной силой.

В п. 4.3 получено решение исходных уравнений в Фурье-представлении и записаны обратные интегральные преобразования. Получено выражение для магнитного поля возбуждаемого терагерцового излучения в виде интеграла по парциальным плоским волнам. На основе этого выражения рассчитаны пространственные картины излучения для узкого и широкого оптических импульсов. Обнаружено наличие биений поля излучения внутри черенковского конуса. Дано объяснение эффекта.

В п. 4.4 рассматриваются энергетические характеристики возбуждаемого терагерцового поля. Получены выражения для спектральной и угловой плотности энергии излучения. Проведен анализ динамики высвечивания излучения из приосевой области. Показано, что, хотя узкие оптические пучки генерируют большую суммарную энергию (с единицы длины пробега лазерного импульса), мощность излучения слабо зависит от ширины пучка в сравнительно широком интервале степеней фокусировки оптического импульса. Получена практически удобная формула для мощности терагерцового излучения в направлении распространения лазерного импульса, из которой следует кубическая зависимость мощности от плазменной частоты. Полученные на основе этой формулы оценки неплохо согласуются с экспериментальными данными.

В п. 4.5 сделаны выводы по четвертой главе.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен метод генерации терагерцовых поверхностных волн сфокусированным световым пятном, движущимся по поверхности полупроводника со сверхсветовой скоростью. Механизм генерации – черенковское излучение от нелинейной поляризации, наводимой в области светового пятна в результате оптического выпрямления фемтосекундного лазерного импульса. Рассчитаны поля генерируемых терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на поверхности легированного полупроводника с решеткой типа цинковой обманки (n -GaAs). Показано, что направлением эмиссии поверхностных волн можно управлять путем изменения кристаллографической ориентации полупроводника. На основе

анализа спектральной плотности энергии излучения найдены значения параметров лазерного импульса (ширины, длительности, угла падения на поверхность), обеспечивающие максимальную энергию излучения в нужном спектральном интервале. Сделаны оценки для типичных экспериментальных условий - возбуждения поверхности *n*-GaAs излучением титан-сапфирового ($\lambda = 0,8$ мкм) лазера, которые предсказывают напряженность терагерцового электрического поля на поверхности порядка $0,2$ кВ/см при интенсивности лазерного излучения 50 ГВт/см².

2. Предложен метод синхронизованного возбуждения квазиплоской терагерцовой поверхностной волны световым пятном в виде полоски, движущейся по поверхности полупроводника с досветовой скоростью. Указан способ реализации досветового движения путем освещения поверхности фемтосекундным оптическим импульсом со скошенным фронтом интенсивности. Показано, что частота генерируемого терагерцового поверхностного плазмон-поляритона может перестраиваться за счет изменения угла скоса импульса и степени легирования полупроводника. Рассчитана амплитуда поверхностной волны, переносимая волной мощность и энергия волнового пакета. Сделаны оценки для типичных экспериментальных параметров (*n*-GaAs, титан-сапфировый лазер), которые предсказывают эффективность конверсии в 3 ТГц поверхностную волну порядка 10^{-7} при пиковой интенсивности лазерного излучения 2 ГВт/см².
3. Показано, что использование оптических импульсов с энергией кванта, меньшей ширины запрещенной зоны полупроводника (*n*-GaAs, $\lambda = 1,56$ мкм), позволяет на порядок повысить эффективность оптико-терагерцовой конверсии в поверхностные волны (до 10^{-6} при пиковой интенсивности 2 ГВт/см²).
4. Исследована трансформация терагерцового поверхностного плазмона, направляемого поверхностью металла, при быстрой фотогенерации носителей в нанесенном на эту поверхность тонком полупроводниковом слое. Обнаружен эффект периодической перекачки энергии от поверхностного плазмона к плазменным колебаниям в слое и обратно. Показано, что при малом замедлении поверхностного плазмона значительная часть его энергии после фотоионизации высвечивается в вакуум.
5. Построена двухмерная теория генерации терагерцового излучения при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в газовой магнитоактивной плазме. Предсказаны и объяснены пространственно-временные биения поля излучения внутри черенковского конуса. Установлено сильное влияние поперечного размера лазерного импульса на энергию излучения (с единицы длины пробега импульса) и на спектрально-угловое распределение энергии излучения. Показано, что возрастание энергии излучения с уменьшением ширины оптического импульса происходит, в основном, за счет гармоник с малой групповой скоростью, затухающих вблизи области генерации и поэтому не представляющих практического интереса. Указан интервал оптимальных значений ширины пучка. Получена практически удобная формула для мощности терагерцового

излучения в направлении распространения лазерного импульса. Сделанные на основе этой формулы оценки объясняют результаты предшествующих экспериментов.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Splitting and radiation of a surface plasmon by resonant ionization in a thin semiconductor coating // Journal of the Optical Society of America B. 2001. V. 18. № 8. P. 1180-1188.
2. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Maslov A.V., Sergeev A.M. Two-dimensional theory of Cherenkov radiation from short laser pulses in a magnetized plasma // Physical Review E. 2004. V. 70, 016401.
3. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Phase-matched generation of terahertz surface wave by a subluminal optical strip // Journal of Applied Physics. 2005. V.98. 033101.
4. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Cherenkov radiation of terahertz surface plasmon-polaritons from a superluminal optical spot // Physical Review B. 2005. V.72. 195336.
5. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Optical-to-terahertz conversion for plasmon-polariton surface spectroscopy // Optics&Photonics News, special issue "Optics in 2005". 2005. V. 16. P. 29.
6. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Dorranean D., Yugami N., Nishida Y. Terahertz radiation from magnetized wakes induced by short laser pulses // Proceedings of the International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Waves Physics". Nizhny Novgorod, Sept. 6-12, 2003. P. 155-156.
7. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Dorranean D., Yugami N., Nishida Y. 2D theory of THz radiation from magnetized plasma wakes // Conference Digest: The 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Otsu, Japan, Sept. 29 - Oct. 2, 2003. P. 363.
8. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B., Sergeev A.M. Theory of high intensity THz-field generation from Cherenkov wakes excited by a short laser pulse in a magnetized plasma // Conference on Lasers and Electro-Optics / International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC-2004), San Francisco, USA, May 16-21, 2004. P. 71.
9. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B., Sergeev A.M. 2D theory of high intensity THz-field generation from Cherenkov wakes excited by a short laser

- pulse in a magnetized plasma // Proceedings of the 4th International Symposium “Modern Problems of Laser Physics”, Novosibirsk, August 22-27, 2004. P. 226-227.
10. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B., Hangyo M. Generation of THz Surface Waves by a Superluminous Optical Spot // Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics, Karlsruhe, Germany, September 27 - October 1, 2004. P. 357-358.
 11. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B., Hangyo M. Generation of THz surface plasmon-polaritons by a superluminous optical spot // Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications, Systems and Technologies 2005, Baltimore, USA, May 22-27: Abstracts, Washington, 2005. P. 107.
 12. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Maslov A.V. Cherenkov radiation of terahertz surface waves by a superluminal optical spot // International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics: High-Field Laser Physics”: Proceedings. St.-Petersburg-Nizhny Novgorod, 2005. P. 15-16.
 13. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Maslov A.V. Phase-matched generation of a terahertz surface wave by a subluminal strip-like optical spot // International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics: High-Field Laser Physics”: Proceedings. St.-Petersburg-Nizhny Novgorod, 2005. P. 17-18.
 14. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Generation of terahertz surface waves with optical spots moving along semiconductor surfaces // Technical Digest of the Russian-German Laser Symposium, Nizhny Novgorod, Russia, October 1-4, 2005. P. 23-24.
 15. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Phase-matched optical-to-terahertz conversion via excitation of a surface plasmon polariton // Technical program “Photonics west”, San Jose, California USA, 21-26 January, 2006. P. 174.
 16. Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. Emission of terahertz surface plasmon-polaritons from optical spots moving along semiconductor surface // Program and Abstracts “8th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors”, Munster, Germany, 20-24 February, 2006. Tu 2-5.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Черенковское излучение терагерцовых поверхностных волн движущимся по поверхности полупроводника сверхсветовым источником

- 1.1. Схема оптико-терагерцовой конверсии
- 1.2. Основные уравнения. Решение в Фурье-представлении
- 1.3. Расчет полей поверхностных терагерцовых волн
- 1.4. Энергетика конверсии. Оптимальные параметры
- 1.5. Объемное терагерцовое излучение
- 1.6. Выводы

Глава 2. Схронизованное возбуждение терагерцовой поверхностной волны досветовым источником

- 2.1. Схема оптико-терагерцовой конверсии
- 2.2. Основные уравнения. Решение в Фурье-представлении
- 2.3. Характеристики возбуждаемой поверхностной волны
- 2.4. Энергетическая эффективность конверсии
- 2.5. Особенности конверсии при энергии оптического кванта меньше ширины запрещенной зоны полупроводника
- 2.6. Выводы

Глава 3. Трансформация поверхностного плазмона при быстрой фотогенерации носителей в тонком полупроводниковом слое на поверхности металла

- 3.1. Постановка задачи и основные уравнения
- 3.2. Решение в представлении Лапласа
- 3.3. Временная динамика поверхностного плазмона
- 3.4. Переходное излучение
- 3.5. Выводы

Глава 4. Генерация терагерцовых кильватерных волн мощными оптическими импульсами в магнитоактивной плазме

- 4.1. Механизм генерации. Одномерная модель
- 4.2. Двухмерная модель. Основные уравнения
- 4.3. Расчет и анализ поля излучения
- 4.4. Энергетика излучения. Сравнение с экспериментальными данными
- 4.5. Выводы

Заключение

Литература

Список работ по диссертации