

На правах рукописи

ГЕРАСИМОВ Василий Валерьевич

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
С ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

КНЯЗЕВ – доктор физико-математических наук, профессор,
Борис Александрович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПОЛОСАТКИН – кандидат физико-математических наук,
Сергей Викторович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, старший научный сотрудник.

ПОТАТУРКИН – доктор технических наук, профессор, Федеральное
Олег Иосифович государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заместитель директора института.

ВЕДУЩАЯ – Московский государственный университет
ОРГАНИЗАЦИЯ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2013 г. в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В спектре электромагнитного излучения терагерцовое (субмиллиметровое) излучение условно относят к диапазону длин волн от 30 мкм до 300 мкм, или по шкале частот от 1 ТГц до 10 ТГц. Энергия фотонов с такой частотой составляет десятки мэВ и не способна вызывать ионизацию атомов и молекул. Терагерцовый (ТГц) диапазон интересен тем, что он содержит резонансные частоты колебаний как простых, так и сложных биологических молекул. Многие из них имеют индивидуальные пики поглощения, несущие информацию о структуре, конформации и динамике молекулы во внешней среде. Поэтому спектроскопия в терагерцовом диапазоне широко применяется в биологии, молекулярном анализе, медицинской диагностике и в системах безопасности.

Терагерцовая область частот мало исследовалась в течение многих лет из-за отсутствия подходящих источников и детекторов излучения. Появление источников, основанных на преобразовании фемтосекундных лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона в импульс широкополосного ТГц излучения, резко активизировало исследования этой спектральной области. Новые возможности для ТГц спектроскопии открылись с созданием лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) – плавно перестраиваемых источников мощного когерентного излучения. Использование монохроматического излучения ЛСЭ оправдано высоким отношением сигнал/шум и спектральным разрешением. К тому же, длительность импульса излучения ЛСЭ может быть меньше времени релаксации молекул, что позволяет контролировать химические процессы с участием выделенных связей в молекуле.

Большинство биологических субстанций находятся в конденсированной фазе, например, в растворах или порошках, и имеют высокий коэффициент поглощения в терагерцовом диапазоне. Последнее обстоятельство, наряду с сильным влиянием френелевского отражения, а в ряде случаев – рассеяния, затрудняет использование стандартной абсорбционной спектроскопии. В этом случае оптимальными методами оказываются спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и спектроскопия с использованием поверхностных плазмон-поляритонов (ППП).

Во многих биомедицинских задачах важно знать распределение оптических характеристик на поверхности объектов, для чего требуется получать двумерные изображения. В терагерцовой области частот появляются первые работы со сканированием поверхности объектов в режиме НПВО с использованием широкополосных источников излучения. В зависимости от площади сканирования время записи изображения может составлять десятки минут. Используя мощное излучение ЛСЭ, можно получить широкий пучок и запи-

сывать с помощью матричных детекторов спектрально-селективные изображения в реальном времени. Подобных работ ранее не было, поэтому создание терагерцового изображающего спектрометра НПВО является актуальной задачей.

Эванесцентное поле поверхностных плазмон-поляритонов локализовано вблизи поверхности проводника и обладает высокой чувствительностью к диэлектрическим свойствам поверхностного слоя, что используется в спектроскопии. В оптическом и среднем ИК-диапазонах поверхностные плазмон-поляритоны достаточно хорошо изучены и широко применяются. В терагерцовой области частот ППП мало изучены из-за отсутствия до недавнего времени подходящих источников и детекторов ТГц излучения. Для экспериментальных исследований требуется разработка новых методов захвата, управления и диагностики плазмонов. Изучение ППП важно, как для фундаментальных исследований, так и для потенциального их применения для исследования металлических поверхностей, в спектроскопии тонких слоев, биологических объектов, в терагерцовых системах передачи и обработки информации.

Целью работы являлась разработка методов исследования поверхностей, тонких слоев и конденсированных сред, с помощью перестраиваемого источника монохроматического терагерцового излучения в режимах нарушенного полного внутреннего отражения и генерации поверхностных плазмон-поляритонов, а также реализация данных методов с использованием мощного терагерцового излучения лазера на свободных электронах.

Личный вклад автора

Автором предложен и реализован метод терагерцовой изображающей спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения с использованием монохроматического излучения. Найден оптимальный метод определения комплексного показателя преломления при фиксированной длине волны. Выполнены исследования чувствительности матричного микроболометрического приемника в зависимости от угла падения излучения. Проведены теоретические расчеты и эксперименты по исследованию поверхностных плазмонов в ТГц диапазоне.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично, либо с его определяющим участием.

Научная новизна

Впервые предложен и реализован метод изображающей спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения в терагерцовом диапазоне с регистрацией изображений в реальном времени.

Предложен оптимальный метод определения комплексного показателя преломления исследуемого вещества методом НПВО при фиксированной длине волны.

Разработаны и применены диагностические методы для исследования поверхностных плазмонов в терагерцовом диапазоне с получением изображений дифрагированной на проводящем крае образца поверхностной волны.

Впервые показано количественное соответствие теоретических расчетов дифракции на проводящем крае поверхностной волны с экспериментом в терагерцовом диапазоне.

Экспериментально установлена сильная зависимость распределения дифрагированной волны от толщины тонкого диэлектрического слоя на поверхности металла.

Научная и практическая ценность

Разработанный метод изображающей терагерцовой спектроскопии НПВО позволяет исследовать конденсированные среды и тонкие слои в реальном времени, что имеет потенциальное применение в биологии и медицинской диагностике.

Результаты исследований дифракции поверхностных плазмонов на проводящем крае позволят продвинуться в понимании процессов распространения поверхностных волн вдоль плоских и искривленных проводящих поверхностей, а также прохождения плазмонов через воздушные зазоры. Данные процессы имеют важное практическое значение для дальнейшего развития методов исследования поверхностей, а также для создания терагерцовых коммуникационных устройств.

Обнаружена узкая диаграмма направленности дифрагированного на проводящем крае поверхностного плазмона, что может быть использовано для создания терагерцовых радаров.

Сильная зависимость длины распространения плазмона от толщины диэлектрического слоя на поверхности металла позволяет исследовать спектры пленок микронной и субмикронной толщины в терагерцовом диапазоне.

Основные положения, выносимые на защиту

Метод изображающей спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения с использованием монохроматического перестраиваемого излучения терагерцового диапазона для исследования конденсированных сред и тонких слоев.

Оптимальный способ определения комплексного показателя преломления сильно поглощающих веществ при фиксированной длине волны методом нарушенного полного внутреннего отражения.

Методы для исследования тонких диэлектрических слоев на плоской и искривленной металлической поверхности с помощью поверхностных плазмон-поляритонов в терагерцовом диапазоне.

Надежные и информативные измерительные системы для невозмущающей диагностики поверхностных плазмон-поляритонов.

Распределения интенсивности дифрагированной на проводящем крае образца волны: теория и эксперимент.

Длина распространения поверхностного плазмон-поляритона вдоль плоской границы металл-диэлектрик.

Зависимость чувствительности неохлаждаемого матричного микроболометрического приемника от угла падения.

Апробация диссертации

Результаты работы докладывались и обсуждались: на VIII Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн в 2011 году (Нижний Новгород); на Международном симпозиуме «Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications» в 2011 году (Нижний Новгород – Санкт Петербург); на Международных симпозиумах «Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications» в 2010 году (Новосибирск) и в 2012 году (Москва); на Международных конференциях «Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves» в 2011 году (Хьюстон, США) и в 2012 году (Воллонгонг, Австралия).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения. Объем диссертации составляет 152 страницы, включая 64 рисунка, 9 таблиц и список литературы из 149 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена история развития спектроскопии в терагерцовом диапазоне, ее особенности и применения. Обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи проводимых исследований.

В первой главе выполнен краткий обзор методов генерации и детектирования терагерцового излучения, перечислены основные типы современных источников и детекторов, приведены их характеристики. Рассмотрены методы генерации и детектирования широкополосного ТГц излучения на полупроводниковых антеннах и нелинейных кристаллах с использованием фемтосекундных лазеров, а также схема терагерцовой импульсной спектроскопии во временной области. Описан принцип действия лазеров на свободных электронах и приведены характеристики излучения Новосибирского ЛСЭ.

Во второй главе диссертации на основе решения уравнения теплового баланса рассмотрен принцип работы тепловых приемников. Описаны устройства детекторов, которые использовались в работе: оптикоакустического преобразователя (ячейка Голея), криогенного сверхпроводникового болометра на горячих электронах и неохлаждаемого матричного микроболометрического приемника (ММБП). Данные приемники имеют: высокую

чувствительность ($NEP \sim 10^{-9} - 10^{-11}$ Вт/Гц^{1/2}) к терагерцовому излучению, которую можно повысить в десятки и тысячи раз, используя синхронное детектирование или улучшая параметры чувствительного слоя; широкий динамический диапазон; быстроедействие от десятков миллисекунд (ячейка Голея) до 50 пикосекунд (болометр на горячих электронах). Высокое временное разрешение сверхпроводящего болометра позволяет регистрировать отдельные импульсы излучения ЛСЭ.

Значительная часть третьей главы посвящена исследованию характеристик матричного приемника в терагерцовом диапазоне с использованием излучения ЛСЭ. Чувствительный слой матрицы имеет 320×240 элементов с общим размером $16,36 \times 12,24$ мм². Средняя пороговая мощность одного болометра, измеренная при длине волны 130 мкм, составила 33 нВт/элемент, а эквивалентная мощность шума $2 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}. Пространственное разрешение получаемых изображений близко к волновому пределу.

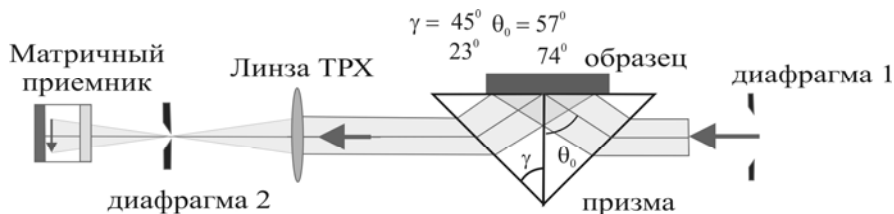
При регистрации матричным приемником пучка ЛСЭ, обладающего малой расходимостью, многолучевая интерференция во входном окне и зазоре между матрицей и окном приводит к сильным вариациям эффективной чувствительности и сильно искажает изображение, что подтверждают и эксперименты, и численные расчеты. При регистрации излучения с использованием фокусирующих линз интерференционные в значительной степени усредняются, и качество изображений существенно улучшается.

В третьей главе описаны эксперименты по спектроскопии НПВО в терагерцовом диапазоне. Приведены спектры отражения нескольких жидких и порошкообразных веществ, измеренных с помощью фурье-спектрометров фирмы Bruker в режиме НПВО. По спектрам отражения был вычислен комплексный показатель преломления с использованием преобразования Крамерса-Кронига.

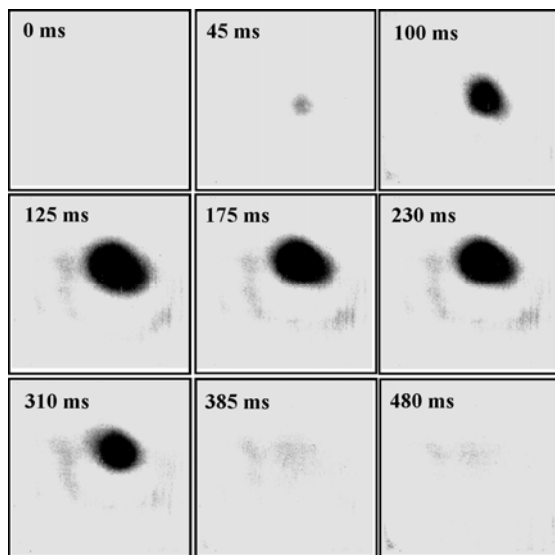
Использование монохроматического перестраиваемого излучения позволяет значительно улучшить отношение сигнал/шум и спектральное разрешение. Теоретический анализ показал, что оптимальным способом определения комплексного показателя преломления при фиксированной длине волны являются измерения при двух углах падения и *p*-поляризации излучения.

В следующем разделе описан разработанный нами метод изображающей спектроскопии НПВО и представлен первый макетный образец терагерцового изображающего спектрометра (см. [рис. 1](#)), использующий НЛСЭ в качестве источника излучения. Элементами НПВО служат две сменные кремниевые призмы с углами при вершине $\gamma = 45$ и 23 градуса, у которых соответствующие углы полного внутреннего отражения равны $\theta_0 = 57$ и 74 градуса. Рабочее поле на поверхности призмы имеет площадь 40×20 мм². Область поверхности раздела призма–образец отображается линзой из ТРХ на матричный микроболометрический приемник. Спектрометр может работать в двух режимах. Для статических объектов, плавно меняя длину волны излучения

лазера, можно получить серию спектрально-селективных изображений. Во втором режиме длина волны лазера фиксируется, и последовательные изображения объекта регистрируются матрицей микроболометров в реальном времени. Процесс растворения капли этанола в воде был записан на изображающем спектрометре в виде “терагерцового видеофильма”, кадры из которого показаны на [рис. 2](#).



[Рис. 1](#). Принципиальная схема изображающего НПВО-спектрометра.



[Рис. 2](#). Растворения капли этанола в кювете с водой ($\lambda = 130$ мкм, $\theta_0 = 57^\circ$).

В четвертой главе сделан обзор предыдущих работ и приведены результаты наших исследований поверхностных плазмон-поляритонов в терагерцовом диапазоне.

В теоретической части даны основные определения и характеристики ППП на границе проводник-диэлектрик. Рассмотрены методы захвата плазмонов, особое внимание уделено дифракционному методу на плоском откры-

том волноводе, который использовался в экспериментах. Показано, что золото (как и некоторые другие металлы) проявляет слабый аномальный скин-эффект в ТГц диапазоне, однако, согласно литературным данным, теория проводимости Друде для золота выполняется. Далее приведены характеристики поверхностных плазмонов (глубина проникновения в металл и воздух, длина распространения) в ТГц диапазоне, вычисленные по модели Друде для золота и золота с диэлектрическими покрытиями. Показано, что нанесение на золотую поверхность тонкого ($\sim 1/500$ длины волны) слоя сульфида цинка (ZnS) сильно меняет характеристики ППП.

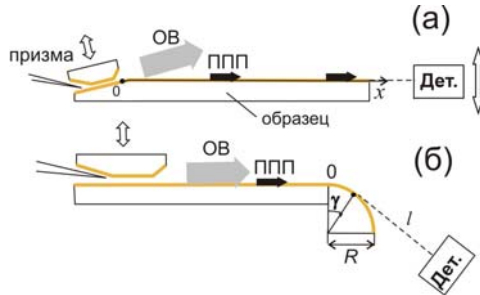


Рис. 3. Схемы экспериментов по исследованию распространения ППП.

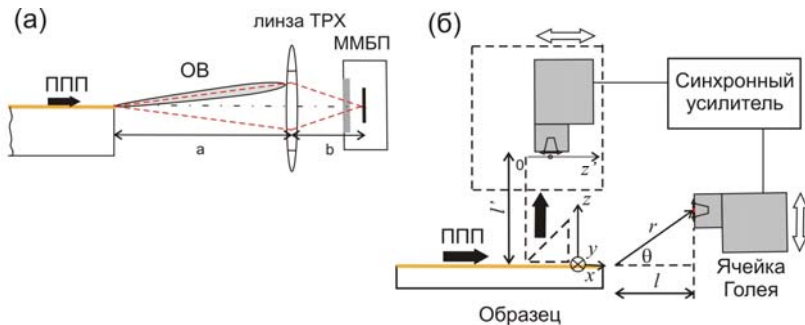


Рис. 4. Системы детектирования поверхностных плазмонов.

Далее описаны эксперименты с использованием излучения НЛСЭ (см. рис. 3). Образец представлял собой стеклянную пластинку со скошенной гранью, над которой помещалась призма, образуя плоский полый открытый волновод. Поверхность призмы и образца были покрыты слоем золота толщиной 1 мкм. Плазмоны захватывались на выходном срезе волновода, распространялись вдоль поверхности образца и дифрагировали на краю. Изображение интенсивности поля дифрагированной волны регистрировалось на торце с помощью матричного микроболометрического приемника и линзы ТРХ (рис. 4,а). На рис. 5 представлены изображения, снятые при длине волны 140 мкм для золота (а) и золота, покрытого слоем ZnS толщиной 0,25 мкм (б)

и 0,75 мкм (в). Профиль интенсивности дифрагировавшей волны спадает не монотонно, но его характерная ширина качественно совпадает с глубиной проникновения эванесцентной волны (пунктир) поверхностного плазмона. Для золота с диэлектриком распределение более узкое, чем для непокрытого золота, причем с увеличением толщины слоя ZnS, оно смещается ближе к поверхности образца.

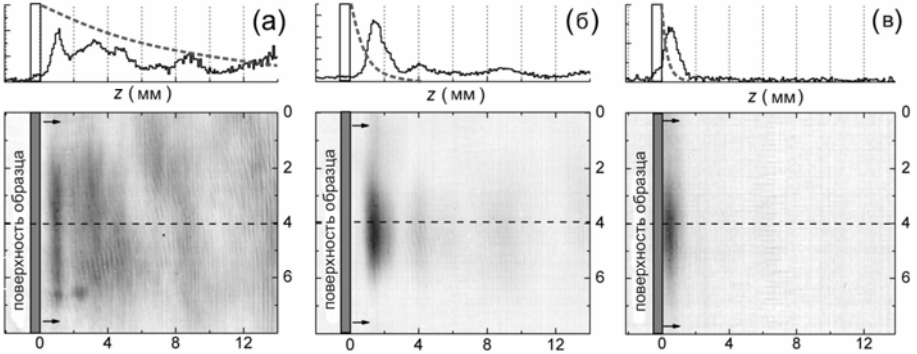


Рис. 5. Изображения дифрагированной волны на торце образца.

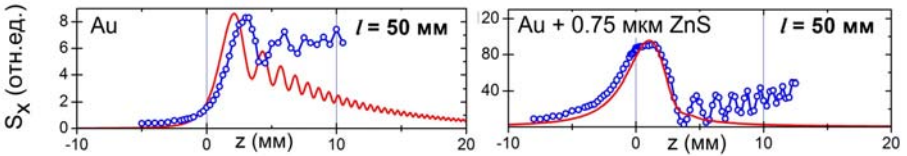


Рис. 6. Зависимости интенсивности от z : эксперимент (точки), теория (линии).

С помощью ячейки Голя с входной щелью шириной 0,2 мм и синхронного усилителя SR-830 (рис. 5,б) измерялась интенсивность поля в зависимости от смещения z по нормали к поверхности образца на расстоянии l от его торца. На рис. 6 точками показаны зависимости, измеренные на расстоянии $l = 50$ мм, для золота и золота с покрытием ZnS толщиной 0,75 мкм. Сплошными линиями показаны теоретические расчеты x -компоненты вектора Пойтинга дифрагированной поверхностной волны. Видно, что при небольших значениях z для обоих образцов эксперимент хорошо согласуется с теорией.

Для измерения длины распространения поверхностных плазмонов использовалось подвижное 45-градусное зеркало с золотым покрытием (показано пунктиром на рис. 4,б) и детектор Голя. Для образцов с субмикронным слоем диэлектрика длина распространения была меньше в несколько раз по сравнению с непокрытым золотом. На основании этого предлагается использовать спектроскопию на поверхностных плазмонах для исследования тонких диэлектрических слоев. Теоретические значения L для тех же образ-

цов на 2-3 порядка больше экспериментальных. Одной из причин данного расхождения могут быть радиационные потери на неоднородностях проводящей поверхности. Предложена экспериментальная схема по измерению радиационных потерь на плоской поверхности.

Далее представлены результаты экспериментов по исследованию срыва поверхностных плазмонов с цилиндрической поверхности (см. рис. 3,б). С помощью сверхпроводникового болометра на горячих электронах измерялись зависимости интенсивности волны, сорвавшейся с цилиндрической поверхности, от угловой координаты γ . Длина распространения ППП вдоль цилиндрической поверхности, покрытой золотом со слоем ZnS толщиной 0,2 и 1 мкм, составили около 4 мм.

Глава 4 заканчивается разделом по измерению прохождения поверхностными плазмонами воздушных промежутков между проводящими поверхностями. В завершении главы приведены обобщающие выводы.

В заключении приведены основные результаты работы.

Разработаны методы исследования поверхностей, тонких слоев и конденсированных сред с помощью перестраиваемого источника монохроматического терагерцового излучения в режимах нарушенного полного внутреннего отражения и генерации поверхностных плазмон-поляритонов.

Впервые разработан метод изображающей спектроскопии НПВО и создан макетный образец изображающего спектрометра с Новосибирским ЛСЭ в качестве источника излучения. Продемонстрирована возможность регистрировать изображения объектов, в том числе в реальном времени.

Предложен оптимальный способ определения комплексного показателя преломления сильно поглощающих веществ при фиксированной длине волны методом нарушенного полного внутреннего отражения.

Зависимость чувствительности матричного микроболометрического приемника от угла падения возникает в результате многолучевой интерференцией на входном окне и вакуумном зазоре между окном и чувствительным слоем приемника.

Экспериментально и теоретически исследовано распространение поверхностных плазмонов вдоль плоской и цилиндрической границ золото-диэлектрик-воздух в терагерцовом диапазоне, а также их дифракция на краю образца. Для невозмущающей диагностики плазмонов использованы надежные и информативные измерительные системы.

Экспериментально наблюдаемые распределения интенсивности дифрагированной на крае образца поверхностной волны не монотонны: сначала интенсивность растет, а потом падает; при этом характерная ширина распределений коррелирует с глубиной проникновения поверхностной волны в воздух, вычисленной в рамках модели Друде.

Теоретические расчеты дифракции поверхностного плазмона на проводящем крае образца в двумерном приближении количественно согласуются с экспериментом на небольших расстояниях от края.

Нанесение на поверхность золота диэлектрического слоя ZnS субмикронной/микронной толщины заметно уменьшает поперечную ширину распределения потока электромагнитного поля дифрагировавшей поверхностной волны. Узкая диаграмма направленности дифрагировавшей волны может быть использована для создания терагерцовых радаров.

Измеренная длина распространения поверхностного плазмона вдоль плоской золотой поверхности чувствительна к наличию очень тонкого (порядка 1/500 длины волны) слоя диэлектрика. Это позволяет использовать плазмоны для спектроскопии тонких диэлектрических слоев в терагерцовом диапазоне.

В приложении представлены основные положения теории Друде.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, П.Д. Рудыч, В.С. Черкасский. Френелевское отражение в оптических элементах и детекторах для терагерцового диапазона. // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 103-108.
2. В.В. Герасимов, Б.А. Князев. Особенности спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения в терагерцовом диапазоне. // Вестник НГУ, сер. Физика. 2008. Т. 4. Вып. 4. С. 97-112.
3. М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, В.Н. Овсюк, Б.И. Фомин, И.В. Марчишин, В.Ш. Алиев, Б.А. Князев, В.В. Герасимов, Г.Н. Кулипанов, Н.А. Винокуров, В.И. Литвинцев. Разработка и применение неохлаждаемых матричных микроболометров для терагерцового диапазона. // Вестник НГУ, сер. Физика. 2010. Т. 5. № 4. С. 73-78.
4. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, А.К. Никитин, В.В. Никитин. Неинтерферометрические способы определения комплексного показателя преломления терагерцовых поверхностных плазмонов // Вестник НГУ, сер. Физика. 2010. Т. 5. № 4. С. 147-150.
5. V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, A.K. Nikitin. Terahertz dispersive spectroscopy thin-film study via surface-plasmon – bulk wave interference. // Вестник НГУ, сер. Физика. 2010. Т. 5. № 4. С. 158-161.
6. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, В.С. Черкасский. Получение спектрально-селективных изображений объектов в режиме нарушенного полного внутреннего отражения в реальном времени в видимом и терагерцовом диапазонах // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108. Вып. 6. С. 731-737.

7. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, В.С. Черкасский. Способ измерения распределения величины комплексного показателя преломления сильно поглощающих образцов. Патент РФ №2396547, приоритет 04.05.2009. Решение о выдаче 25.03.2010.
8. М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, И.В. Марчишин, В.Н. Овсяк, Б.И. Фомин, Б.А. Князев, В.В. Герасимов. Применение неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников для регистрации излучения терагерцового спектрального диапазона. // Автотметрия. 2011. Т. 47. № 5. С. 109-113.
9. V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, A.K. Nikitin, G.N. Zhizhin, A way to determine permittivity of real metal surfaces at terahertz frequencies. // Appl. Phys. Letters. V. 98. 2011. P. 171912 (3 pages).
10. B.A. Knyazev, V.S. Cherkassky, Y.Y. Choporova, V.V. Gerasimov, M.G. Vlasenko, M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application. // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2011. V. 32. Is. 10. Page 1207-1222.
11. А.К. Никитин; В.В. Герасимов; Г.Н. Жижин, Б.А. Князев. Способ преобразования монохроматического инфракрасного излучения в поверхностную электромагнитную волну. Патент на изобретение РФ №2411467, приоритет 11.03.2010. Опубликовано 10.02.2011.
12. В.В. Герасимов, Г.Н. Жижин, Б.А. Князев, И.А. Котельников, Н.А. Митина, А.К. Никитин. Диагностический комплекс для исследования терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 9. (в печати).
13. И.А. Kotelnikov, V.V. Gerasimov and B.A. Knyazev, Diffraction of surface wave on conducting rectangular wedge. // Phys. Rev. A. 2013. V. 87. P. 023828.
14. В.В. Герасимов, Г.Н. Жижин, Б.А. Князев, И.А. Котельников, А.К. Никитин, В.С. Черкасский. Исследование дифракции поверхностных плазмон-поляритонов на прямоугольном крае границы металл-диэлектрик в терагерцовом диапазоне. // Вестник НГУ, сер. Физика. 2013. Т. 8. Вып. 1. Стр. 6-15.

ГЕРАСИМОВ Василий Валерьевич

**Методы исследования поверхностей
с помощью терагерцового излучения
лазера на свободных электронах**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 23.05. 2013 г.

Подписано в печать 27.05. 2013 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11