
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 535-14; 535.016; 535-45; 535.-7; 53.082.53
№ 01201002172 от 10.08.2010

УТВЕРЖДАЮ
Ректор НГУ,
д.ф.-м.н., профессор
М.П. Федорук

_____ “_____” сентября 2012 г.
подпись М.П.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

В рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры
инновационной России” на 2009-2013 годы

по теме:

ПЛАЗМОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МАТЕРИАЛОВ, МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ
И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Гос. контракт от 22 марта 2010г. № 02.740.11.0556

(заключительный, этап №6)

Наименование этапа: « Исследование субволновых объектов; прохождение
терагерцового излучения через СВС.»

«6.1. Исследование роли ППП при прохождении терагерцовых волн через
периодические структуры из субволновых отверстий (терагерцовый тальбот-
эффект). 6.2. Разработка программы внедрения результатов НИР в учебный
процесс. 6.3. Общий анализ результатов работы. Предложения по
использованию результатов работы.»

Руководитель НИР, д-р физ.мат. наук,
профессор, академик МАН ВШ

_____ Б.А. Князев
подпись, дата

Новосибирск 2012 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель, профессор, д. ф.-м. н.	_____	Б.А.Князев (раздел(ы) введение, заключение разделы 1,2,3)
	подпись, дата	
Исполнители		
профессор, д.т.н., доцент	_____	А.К. Никитин (раздел 1,3)
	подпись, дата	
профессор, д.ф.-м.н., профессор	_____	И.А. Котельников (раздел 3)
	подпись, дата	
профессор, к.т.н., доцент	_____	В.С. Черкасский (раздел 1,2,3)
	подпись, дата	
д.т.н., доцент	_____	А.Д.Хильченко (раздел 3)
	подпись, дата	
с.н.с., к.ф.-м.н	_____	Я.В. Ракшун (раздел 1)
	подпись, дата	
начальник отдела, к.т.н.	_____	В.В.Казаков (раздел 3)
	подпись, дата	
начальник отдела, к.ф.-м.н.	_____	О.В.Хитров (раздел 3)
	подпись, дата	
инженер	_____	С.А. Дубовцева (раздел 1)
	подпись, дата	
м.н.с.	_____	В.В. Герасимов (раздел 3)
	подпись, дата	
аспирант	_____	Я.В. Гетманов (раздел 3)
	подпись, дата	
аспирант	_____	М.Г. Власенко (раздел 1,3)
	подпись, дата	
аспирант	_____	Ю.Ю. Чопорова (раздел 1,3)
	подпись, дата	
студент	_____	А.А. Никитин (раздел 3)
	подпись, дата	
студент	_____	Д.Г. Родионов (раздел 3)
	подпись, дата	
студент	_____	Т.Н. Иргалин (раздел 3)
	подпись, дата	
студент	_____	Н.А. Митина (раздел 3)
	подпись, дата	
студент	_____	Д.А.Скорород (раздел 1)
	подпись, дата	

лаборант	_____	М.С.Митьков (раздел 1)
	подпись, дата	
Зав.отделом	_____	Н.А.Беляева (приложение 3)
	подпись, дата	
инженер	_____	Н.Н.Шмойлова (приложение 3)
	подпись, дата	
нормоконтролер	_____	Л.И.Кашникова
	подпись, дата	

РЕФЕРАТ

Отчет с. 116, рис. 56, табл 6, источников 24

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, ПОЛЯРИЗОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОНЫ, СУБВОЛНОВЫЕ СТРУКТУРЫ, ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Целью исследования являлись разработка физических основ плазмонной спектроскопии в терагерцовом диапазоне с использованием монохроматического перестраиваемого по частоте источника излучения, в качестве которого в данной работе используется лазер на свободных электронах (ЛСЭ), создание макетных образцов спектрометров для исследования поверхностей и исследование формирования и распространения поверхностных волн. На шестом этапе, согласно плана, были выполнены эксперименты по исследованию прохождения терагерцового излучения через регулярные решетки отверстий, включая субволновые отверстия. Впервые продемонстрировано, что эффект Тальбота, который имеет большие перспективы для метрологических приложений, существует даже при размерах отверстий менее длины волны падающего излучения. Описано использование результатов данного проекта в учебном процессе в НГУ. Приведен отчет по патентному поиску. Поданы четыре заявки на патенты, подготовленные по результатам работы. Результаты работы за шестой этап представлены в одной статье (принята в печать) и трех докладах на международных конференциях. Готовятся к публикации две статьи в международных журналах. Всего по результатам работы опубликовано и подано в печать 25 статей, сделано 36 докладов на научных конференциях. В заключение отчета подведены основные итоги работы за все этапы.

Содержание

РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1. ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ППП ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ИЗ СУБВОЛНОВЫХ ОТВЕРСТИЙ (ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ТАЛЬБОТ-ЭФФЕКТ).....	8
1.1. Эффект Тальбота (Talbot effect).....	8
1.1.1. Объяснение эффекта Тальбота.....	8
1.1.2. Строгая теория эффекта Тальбота	9
1.1.3. О качестве изображения для разных длин волн и численном моделировании эффекта Тальбота	13
1.2. Экспериментальная установка.....	15
1.3. Эффект Тальбота в видимом диапазоне	17
1.3.1. Демонстрация эффекта Тальбота в видимом диапазоне на расстоянии до 70 метров	17
1.3.2. Применение эффекта Тальбота для исследования турбулентности в атмосферном воздухе.....	18
1.4. Эффект Тальбота в терагерцовом диапазоне.....	21
1.4.1. Эффект Тальбота на амплитудных решетках	21
1.4.2. Эффект Тальбота на фазовых решетках	22
1.4.3. Применения эффекта Тальбота	24
1.4.4. Проверка пределов регистрации изображений решеток.....	26
1.5. Эффект Тальбота на щелях и решетках субволновых отверстий.....	27
1.5.1. Экспериментальная установка	27
1.5.1. Экспериментальные результаты	32
2. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС.....	41
2.1. Учебный курс «Излучение и вещество».....	41
2.1.1. Разработка программы учебного курса «Излучение и вещество»	41
2.1.2. Разработка электронного лекционного курса «Излучение и вещество».....	42
2.1.3. Учебный видеофильм «Сверхчувствительный сверхпроводниковый болометр на горячих электронах для регистрации терагерцового и миллиметрового излучения на Земле и в космосе: принцип действия и обучение работе с прибором»	43
2.1.4. Учебный видеофильм «Статический фурье-спектрометр».....	43
2.2. Учебный курс «Компьютерное моделирование физических процессов»	43
3. ОБЩИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	45
3.1. Общие замечания	45
3.2. Методы формирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в терагерцовом диапазоне.....	48
3.3. Методы регистрации ППП в терагерцовом диапазоне	49

3.3.1.	Особенности ППП в терагерцовом диапазоне	49
3.3.2.	Детекторы терагерцового излучения	49
3.4.	Дифракции ППП на торце образца	50
3.4.1.	Теория	50
3.4.2.	Сравнение с экспериментом	54
3.5.	Предложения по использованию результатов работы	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		58
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ		62
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПУБЛИКАЦИИ ПО ПРОЕКТУ		63
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПАТЕНТНЫЙ ПОИСК		71
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЗАЯВКИ НА ПАТЕНТЫ, ПОДАННЫЕ В 2012 ГОДУ		90
	Заявка №2012107059 от 27.02.2012. Способ определения набега фазы монохроматической поверхностной электромагнитной волны инфракрасного диапазона	90
	Заявка № 2012108258 от 21.02.2012. Способ определения глубины проникновения поля терагерцовых поверхностных плазмонов в окружающую среду	100
	Заявка № 2012107166 от 14.02.2012. Способ управления спектром пучка широкополосного терагерцового излучения	106
	Заявка, исх. № 2012128079 от 03.07.2012 Способ измерения длины распространения инфракрасных поверхностных плазмонов по реальной поверхности	111

ВВЕДЕНИЕ

Заключительный шестой этап проекта посвящен исследованию прохождения терагерцового излучения через решетки периодически расположенных отверстий (эффект Тальбота). Явление Тальбота до сих пор наблюдалось только в видимом и рентгеновском диапазонах, в терагерцовом диапазоне оно было впервые продемонстрировано нами. Этот эффект, согласно, исследованиям в видимом диапазоне, тесно связан с резонансными явлениями, определяемыми появлением поверхностных плазмонов. Исследования в терагерцовом диапазоне представляют особый интерес, поскольку большая по сравнению с видимым диапазоном длина волны позволяет легко изготовить решетки с субволновыми отверстиями. Мы впервые провели детальное исследование тальбот-эффекта, последовательно меняя диаметр отверстий в решетках от размеров в несколько длин волн, до долей длины волны. В заключение отчеты мы подвели его итоги и выработали предложения по использованию результатов работы как в учебном процессе, так и в дальнейших практических применениях.

1. Исследование роли ППП при прохождении терагерцовых волн через периодические структуры из субволновых отверстий (терагерцовый тальбот-эффект)

По материалам этой главы готовятся публикации и заявка на патент.

2. Разработка программы внедрения результатов НИР в учебный процесс

Одной из важных задач проекта было вовлечение студентов в научную деятельность и использование результатов работы в преподавании. Обе эти задачи выполнялись на протяжении всего проекта. В частности, мы создали новаторский курс экспериментальной физики «Излучение и вещество», в котором ежегодно участвуют 10 – 12 студентов. Кроме того, многие студенты, магистранты и аспиранты участвуют в работе над проектом. Кроме того, в течение сентября 2012 года планируется завершить подготовку двух учебных видеофильмов, а также создать и запустить в практикуме по электричеству и магнетизму новую лабораторную работу. В классе компьютерного моделирования созданы программы, моделирующие эффекты дифракции и интерференции терагерцового излучения. Ниже дается их краткое описание.

2.1. Учебный курс «Излучение и вещество»

2.1.1. Разработка программы учебного курса «Излучение и вещество»

Аннотация

Разработанный курс имеет своей целью освоение наиболее подготовленными студентами младших курсов принципов и методов проведения эксперимента в условиях реального научного исследования на примере конкретной физической задачи, соответствующей программе базового курса общей физики. Курс является факультативным и относится к **вариативной (факультативной) части профессионального цикла БЗ** и связан со следующими модулями базовой части профессионального цикла: **Молекулярная физика, Электричество и магнетизм, Оптика, Атомная физика**. Обучение студентов производится в рамках Научно-образовательного центра «Синхротронное и терагерцовое излучение и его применение» с использованием уникального оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения». В обучении студентов используются современные педагогические технологии – интерактивность, работа в малых группах, проектный подход и широкое использование информационных технологий. Курс является уникальным.

Программа курса подготовлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта третьего поколения.

Авторы: докт. физ.-мат. наук, проф. Князев Б.А., к.т.н., проф. КОФ. Черкасский В.С
Программа учебного курса подготовлена в рамках реализации Программы развития НИУ-НГУ на 2009–2018 г. г.

При подготовке программы использованы результаты, полученные при выполнении ГК № 02.740.11.0556 В рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы

© Новосибирский государственный университет, 2012

Дисциплина (курс) «**Излучение и вещество**» имеет своей целью освоение наиболее подготовленными студентами младших курсов принципов и методов проведения эксперимента в условиях реального научного исследования на примере конкретной физической задачи, соответствующей программе базового курса общей физики. Каждый студент, получая индивидуальную экспериментальную задачу, углубленно изучает один из избранных разделов физики, знакомясь с теорией, приборной базой, техникой эксперимента, методами обработки данных, численным моделированием явления или процесса, что позволяет значительно расширить его кругозор по сравнению со студентами, выполняющими только задания стандартных учебных курсов, и раскрыть творческие способности личности. Результаты экспериментов оформляются в виде научных отчетов, при работе над которыми студенты осваивают принципы и методы письменного представления научных результатов. Зачет проводится в форме научной презентации с демонстрацией в формате PowerPoint, что позволяет студентам освоить также принципы выступления на научных конференциях. Таким образом, курс ориентирован на обучение и воспитание физиков-исследователей, обладающих нестандартным мышлением, умеющих ставить и решать задачи, выходящие за рутинные рамки.

2.1.2. Разработка электронного лекционного курса «Излучение и вещество»

Электронная учебно-методическая разработка (электронный лекционный курс - мультимедийная презентация лекционного курса) состоит из 220 слайдов в формате PowerPoint и содержит более 10 анимаций. Основное внимание уделено терагерцовому излучению, лазеру на свободных электронах и экспериментах на НЛСЭ. Авторы: докт. физ.-мат. наук, проф. Князев Б.А. и к.т.н., проф. КОФ. Черкасский В.С.

2.1.3. Учебный видеофильм «Сверхчувствительный сверхпроводниковый болометр на горячих электронах для регистрации терагерцового и миллиметрового излучения на Земле и в космосе: принцип действия и обучение работе с прибором»

Методы регистрации излучения дальнего инфракрасного и терагерцового диапазонов играют очень важную роль в астрономии, космических исследованиях, лабораторных экспериментах. Особенно необходимыми являются детекторы с высокой чувствительностью и хорошим временным разрешением. В рамках НОЦ «Терагерцовое и синхротронное излучение» при поддержке Минобрнауки был приобретен уникальный криогенный сверхпроводниковый болометр «на горячих электронах» стоимостью 1 720 тыс. рублей (Разработка МГПУ, Москва), использованный в работе по данному проекту. Поскольку принцип работы болометра содержит информацию о сверхпроводниках, твердых телах и их взаимодействии с излучением, освоение этого прибора является существенным шагом в подготовке физиков-экспериментаторов высокого уровня. Многие студенты в процессе работы по курсу «Излучение и вещество» работают с данным болометром. Для обеспечения качественной и безопасной работы с устройством в настоящее время идет работа над учебным видеофильмом. Планируется его завершение к концу сентября.

2.1.4. Учебный видеофильм «Статический фурье-спектрометр»

Еще один учебный видеофильм будет посвящен фурье-спектроскопии. Он связан с исследованиями по данному проекту и модернизацией статического фурье-спектрометра нашей разработки, который установлен в лаборатории оптического практикума физфака НГУ. Этот прибор позволяет познакомить студентов с принципами современной фурье-оптики. Для лучшего усвоения материала мы ведем работу над созданием учебного видеофильма, посвященного данной теме.

2.2. Учебный курс «Компьютерное моделирование физических процессов»

Настоящая учебно-методическая разработка посвящена уникальному курсу, основы которого были заложены на ФФ НГУ более 30 лет назад. В настоящей реализации курс позволяет студенту быстро освоить язык программирования Matlab, который в настоящее время является одним из самых эффективных средств численного моделирования и графического представления результатов расчетов. Пособие состоит из презентационных материалов к 16 лекциям, которые с одной стороны позволяют студенту быстро разобраться

с базовыми возможностями языка программирования и правилами работы в системе, а с другой стороны освещают как физические задачи, так и приемы их алгоритмического решения. Пособие содержит также примеры решения задач в виде анимированных графиков и рисунков. В пособии большое внимание посвящено графическим возможностям системы.

3. **Общий анализ результатов работы. Предложения по использованию результатов работы**

3.1. **Общие замечания**

В настоящее время одним из важнейших направлений в оптике, материаловедении и биологии является разработка средств и методов измерений, использующих излучение терагерцового спектрального диапазона. Причиной такого интереса являются ожидания создания прорывных приложений в самых разнообразных областях науки и технологий. К таким областям относятся материаловедение, биология и медицина, обеспечение безопасности и борьба с терроризмом и др.

Если обратиться к истории использования излучения, то нужно отметить, что каждый раз создание новых источников и/или приемников излучения приводило к рывку в развитии новых приложений. Наиболее яркими примерами является рентгеноскопия и медицинская терапия рака после создания рентгеновских трубок и детекторов рентгеновского излучения, томография магнитного резонанса – после освоения радиочастотной области спектра, тончайшая обработка материалов и элементный анализ – после создания источников синхротронного излучения. Терагерцовый диапазон длительное время являлся единственной неиспользуемой областью спектра, своего рода спектральной *terra incognita*.

Почему от этого спектрального диапазона можно ожидать многого? Это связано с особенностями взаимодействия излучения с веществом. Известно, что атомно-молекулярные структуры имеют характерные энергии, связанные с переходами между квантовыми уровнями, между разными зонами в полупроводниках; имеются границы пропускания излучения, например, плазменная частота электронов в металлах. В сложных биологически важных молекулах существенную роль играют, например, конформационные переходы, определяющие, например, биологическую активность молекул. Длительное время только излучение видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов использовались для изучения веществ и воздействия на них. Это было возможно только для веществ, у которых резонансные или характерные энергии (частоты) процессов лежали в диапазоне 1 – 10 эВ. У многих же веществ и многоатомных молекул эти энергии соответствуют 0.01 – 0.1 эВ, то есть терагерцовой (или дальней инфракрасной) области спектра. Именно это обстоятельство и вызывает интерес к терагерцовому диапазону.

Мы уже говорили о роли источников и детекторов излучения в развитии исследований некоторого спектрального диапазона. Напомним основные этапы создания источников

терагерцового излучения. Оставим в стороне спорадические исследования в этой области в течение 19-го и начала 20-го столетий. Упомянем только молекулярные лазеры на вращательных переходах молекулярных газах (пары воды, метанола и т. п.), сыгравших важную, но ограниченную роль, в диагностике высокотемпературной плазмы [4]. Они были способны излучать на нескольких дискретных частотах и не получили широкого распространения.

Настоящим прорывом было создание источников широкополосного терагерцового излучения на основе фемтосекундных лазеров. Они использовали хорошо известное в оптике соотношение неопределенностей, из которого следует, что ограничение длительности импульса света приводит к уширению его спектрального состава. Хотя принцип был давно известен, его реализация для генерации терагерцового излучения стала возможной, во-первых, только после достижений в лазерной технике, обеспечивших генерацию импульсов длительностью около 10 фс. Во-вторых, нужно было найти способ создания суперкоротких импульсов электромагнитного излучения длительностью порядка одной пикосекунды, которые и являются «носителями» терагерцового спектра, начиная почти с нулевой частоты. Это стало возможным в результате создания фотопроводящих антенн [5] и альтернативного электрооптического метода [6]. Любопытно, что эти же устройства, «включенные наоборот» использовались и для детектирования излучения. Таким образом, в конце 1980-ых появились первые генераторы и детекторы терагерцового диапазона. Благодаря способу генерации все методы, основанные на этой технологии, называют термином “time-domain”: time-domain spectroscopy, time-domain imaging и тому подобное. В русском языке до настоящего времени нет соответствующего общеупотребительного термина, а его прямой перевод с английского по-русски «не звучит». Иногда говорят, «спектроскопия высокого временного разрешения», что, вообще говоря, искажает смысл методики, поскольку ее применение как раз требует очень большого времени для сканирования по временной задержке пробного импульса.

Time-domain технология достигла больших успехов в исследовании веществ, позволяя за счет малой длины импульса и применении специальных методов решения обратной задачи восстановления спектра по временной форме импульса, измерять, например, одновременно действительную и мнимую части показателя преломления исследуемого объекта, исследовать структуру образца с высоким пространственным разрешением по глубине. В то же время достоинства метода определяли и его недостатки: невозможность реализации режима реального времени, очень большую длительность одного измерения, необходимость сканирования протяженных образцов по поверхности, что еще на порядки увеличивало длительность измерений. Наконец, некоторые методы требуют

использования монохроматического излучения. Источники непрерывного излучения также разрабатывались, например параметрические генераторы [7], но они не нашли пока широкого применения.

Прорывом в технике генерации ТГц излучения явилось создание лазеров на свободных электронах [8], сначала, довольно маломощных. В 2004 году был запущен в эксплуатацию Новосибирский ЛСЭ (НЛСЭ), который сразу стал самым мощным источником терагерцового излучения в мире. Он генерирует монохроматическое излучение, и способен перестраивать частоту генерации в широких пределах практически по всему терагерцовому спектру. Естественно, он сразу стал использоваться для многих приложений, включая исследования в области спектроскопии различных материалов и биологических объектов.

Классическая спектроскопия начиналась с абсорбционной спектроскопии, т. е. с «просвечивания» веществ пучком света и измерения его ослабления на выходе. Эта методика оказалась неприменимой к сильно поглощающим и дисперсным веществам. Решение было найдено в использовании метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), при котором исследуемый объект (вещество) помещался на поверхность НПВО-элемента (например, стеклянной или кремниевой призмы), а пробное излучение падало при угле больше критического на внутреннюю поверхность элемента. В этом случае эванесцентная волна проникала на внешнюю поверхность призмы, частично теряла энергию в образце, и возвращалась обратно. По спектральной зависимости величины ослабления при двух углах падения или двух поляризациях можно легко и непосредственно (без решения обратной задачи, как это требуется в time-domain методике) вычислить действительную и мнимую части показателя преломления, иными словами, получить полную спектральную характеристику образца. *Принцип изображающей спектроскопии НПВО с использованием НЛСЭ был разработан нами в начале реализации данного проекта [9]. Этот метод представляется перспективным для исследования мелкоструктурных и малых объектов в режиме возбуждения локализованных плазмон-поляритонов [10], о чем мы скажем ниже.*

Другим перспективным методом исследования спектров поглощения тонких пленок, слоев жидкостей и дисперсных материалов является плазмон-поляритонная спектроскопия. Этот метод основан на исследовании изменения характеристик поверхностного плазмон-поляритона (ППП) при его распространении вдоль поверхности проводника, на которую нанесен слой исследуемого вещества. Эта технология достаточно широко применяется как в видимом [11], так и в терагерцовом [12] диапазонах. Результаты в ТГц диапазоне были ранее получены практически только методом time-domain. Они

очень не надежны и часто не согласуются друг с другом. Можно предположить, что в данном случае большая ширина спектра мешает выполнить корректные измерения. *Наши измерения практически впервые в терагерцовом диапазоне выполнены с мощным монохроматическим пучком. Это позволило разработать и применить новые оригинальные методы регистрации терагерцового излучения как такового, а также разработать новые способы исследования поверхностных плазмонов и свойств исследуемых объектов.*

3.2. Методы формирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в терагерцовом диапазоне

При реализации любых устройств, использующих поверхностные плазмон-поляритоны, первым шагом всегда является формирование поверхностного плазмона (поверхностной электромагнитной волны) на исследуемой поверхности. Этот шаг не является тривиальным, поскольку волновой вектор ППП больше волнового вектора свободной электромагнитной волны, и требуется использовать методы, позволяющие совершить такое преобразование. Это можно сделать, либо используя дифракцию свободной волны на препятствии, либо используя системы с нарушенным полным внутренним отражением.

Нами были использованы несколько методов формирования ППП (см. в списке публикаций по проекту, Приложение 2, работы [6, 17, 24, 25]). Было обнаружено экспериментально, что одним из наиболее эффективных методов является формирование ППП с помощью двусвязного волновода, состоящего из двух проводящих плоскостей с шириной зазора от полуволны до нескольких длин волн. При этом падающее излучение должно иметь p -поляризацию. Ранее этот метод был использован в работах группы Гришковского (США). В первых вариантах ППП-спектрометра мы использовали дифракцию на щели или НПВО методы захвата ППП, однако интенсивность сфокусированной волны была недостаточно велика. В последнем варианте макетного образца ППП-спектрометра мы использовали волноводный метод формирования ППП, что позволило в дальнейшем провести успешные эксперименты с ППП.

Таким образом, можно сделать вывод, что в устройствах формирования ППП волноводный метод является предпочтительным по сравнению с дифракцией на щели и методом НПВО.

3.3. Методы регистрации ППП в терагерцовом диапазоне

3.3.1. Особенности ППП в терагерцовом диапазоне

Техника плазмон-поляритонной спектроскопии поверхностей в видимом диапазоне существенно ограничивалась тем, что длина распространения ППП составляет в этом диапазоне микроны или десятки микрон. Поэтому непосредственное измерение длины распространения ППП было выполнено лишь в некоторых экзотических экспериментах (см., например, [13]). Обычно, факт появления ППП и его характеристики определялись косвенно по измерению угловой зависимости величины коэффициента отражения света от поверхности с образцом в режиме НПВО. Подробное описание подобного рода экспериментов можно найти в классической монографии [14].

В инфракрасном и терагерцовом диапазонах длина пробега плазмонов становится достаточно большой, достигая с ростом длины волны (как показали, в частности, наши эксперименты, описанные в Отчете за 5-ый этап) величин порядка сантиметров и десятков сантиметров (причем, теория предсказывает вообще метры и десятки метров), тогда как угловое распределение в отраженном свет становится настолько узким, что часто, используя реальные монохроматические источники с их спектральной шириной и расходимостью, пик поглощения очень трудно зарегистрировать. Отсюда ясно, что более подходящим методом исследования ППП в терагерцовом диапазоне является регистрация их длины распространения вдоль поверхности и глубины проникновения волны в диэлектрик. Кроме этих простейших экспериментов, большую информацию могут дать измерения интерференции двух ППП волн или ППП волны с остаточной объемной волной. *Нами были предложены новые методы измерений свойств поверхностных плазмонов, которые подробно изложены в поданных нами заявках на патенты (см. Приложение 4).*

3.3.2. Детекторы терагерцового излучения

Кроме методов, важным фактором в плазмонной спектроскопии являются устройства для регистрации терагерцового излучения. Если пироэлектрические детекторы и опто-акустические (детектор Голея - ДГ) детекторы ранее уже применялись в схемах терагерцовой плазмонной спектроскопии, то матричный микроболометрический приемник и криогенный сверхпроводниковый болометр «на горячих электронах» (БГЭ) были использованы нами впервые. При этом измерительный комплекс, состоящий из ММБП, ДГ и БГЭ, оказался комплексом дополняющих друг друга детекторов, использование которого позволило однозначно определить все характеристики плазмонов и свободных

волн, образующихся при достижении ППП торца образца. Детально характеристики детекторов описаны в отчетах №3 – 5, а также в статьях (Приложение 2) [1, 12, 15, 18, 20, 23, 25]. *Применение этих детекторов, особенно, матричного микроболометрического приемника, и разработка методов измерений с их использованием для ППП-спектроскопии является одним из самых больших достижений данной работы, не имеющим аналогов в мире.*

3.4. Дифракции ППП на торце образца

3.4.1. Теория

Еще одним достижением настоящей работы является создание корректной теории дифракции поверхностных плазмонов на краю образца.

Наблюдаемый нами в экспериментах вид распределения «сорвавшейся» волны не соответствовал известному (экспоненциально спадающему) распределению поля поверхностной волны, что понятно, поскольку мы наблюдаем не собственно ППП, а интенсивность излучения в пространстве за торцом образца. Нам известно несколько теоретических статей [15,16,17] по исследованию поля за прямоугольным клином. В работах [16, 17] проведен анализ дифракции поверхностной волны на проводящем крае с маленьким поверхностным импедансом методом Зоммерфельда-Малюжинца. Теория Малюжинца [15] была развита в 1950 году и успешно используется для точного решения различных задач оптики проводящей поверхности [18,19]. Численные расчеты, выполненные в работах [16,17] для медного клина, предсказывали профиль распределения интенсивности за торцом качественно похожий на профиль, наблюдаемый нами в экспериментах.

В упомянутых работах, однако, вычисления были не доведены до конечной формулы, которую можно было бы использовать при обработке экспериментальных данных. В отчете №5 описан подробно теоретический анализ дифракции ППП на проводящем клине методом Зоммерфельда-Малюжинца. Получено точное аналитическое выражение для распределения поля объемного излучения, порождаемого монохроматическими ППП при их дифракции на прямоугольном крае проводящего образца. Приведем здесь в сжатом виде теоретические результаты и сравним их с экспериментом .

Сначала, рассмотрим основные характеристики поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль плоской границы «металл-воздух» и структуры «металл-диэлектрик-воздух».

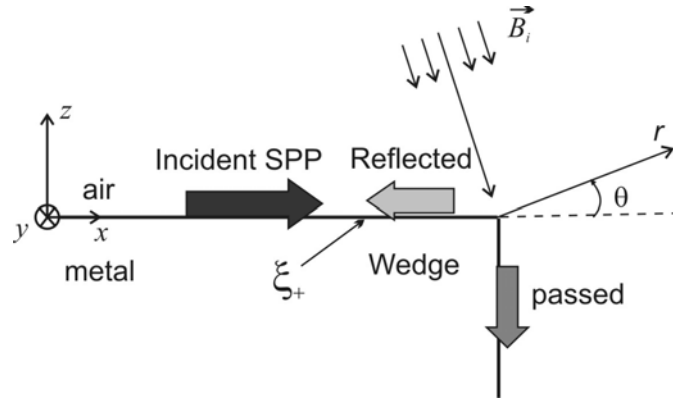


Рис. 48. Схема дифракции ППП на прямоугольном проводящем клине.

Пусть металл с комплексной диэлектрической проницаемостью ε занимает нижнюю половину пространства $z < 0$ (рис. 48), а p -поляризованная поверхностная электромагнитная волна (ППП), распространяется в верхнем полупространстве с $z > 0$ вдоль оси x :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{E}_0 \exp[-\varkappa z + i(k_s x - \omega t)], & \mathbf{E}_0 &= \{E_{0x}, 0, E_{0z}\}, \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{B}_0 \exp[-\varkappa z + i(k_s x - \omega t)], & \mathbf{B}_0 &= \{0, B_{0y}, 0\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Волна характеризуется круговой частотой ω , волновым вектором k_s и константой затухания \varkappa (с положительной реальной частью $\text{Re } \varkappa > 0$), которая связана с глубиной проникновения ППП в воздух выражением:

$$d_p = 1/\text{Re } \varkappa. \quad (21)$$

Аналогичные соотношения (с отрицательной константой затухания $\text{Re } \varkappa' < 0$) можно записать и для нижнего полупространства. Сопоставление (?) полей на границе металл-вакуум при $z=0$, позволяет получить закон дисперсии поверхностных волн [15]:

$$k_s = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}}, \quad k_s^2 - \varkappa^2 = k_0^2, \quad k_0 = \omega / c. \quad (22)$$

Уравнение (20) можно интерпретировать как плоскую волну, распространяющуюся под комплексным углом χ таким, что

$$k_x = k_0 \cos \chi = k_s, \quad k_z = -k_0 \sin \chi = i\varkappa, \quad \varkappa = ik_0 \sin \chi. \quad (23)$$

Используя дисперсионное соотношение (22), получаем

$$\cos \chi = \sqrt{\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}}, \quad \sin \chi = \sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}}. \quad (24)$$

В случае, когда ε вещественна, поверхностная волна существует при условии $\varepsilon < -1$. Для комплексного значения ε всегда имеется решение с

$$\operatorname{Im}\chi < 0, \quad (25)$$

которое экспоненциально уменьшается с расстоянием от границы металла. Тем не менее, имеет смысл говорить о поверхностных волнах, только если длина пробега ППП

$$L = 1 / \operatorname{Im}k_s \quad (26)$$

достаточно большая, то есть $|\operatorname{Im}k_s| \ll |\operatorname{Re}k_s|$. Это условие заведомо выполняется, если

$$|\varepsilon| \gg 1. \quad (27)$$

В ТГц диапазоне для большинства металлов условие (27) выполняется. Для золота на длине волны $\lambda = 140$ мкм, согласно модели Друде, $\varepsilon = -103260 + i \cdot 310810$ [15]. Тогда

$$\begin{aligned} \chi &= 0.001022 - i \cdot 0.001417, \\ k_s &= (44880 + i \cdot 0.065) \text{ м}^{-1}, \\ \varkappa &= (64 + i \cdot 46) \text{ м}^{-1}. \end{aligned} \quad (28)$$

Используя соотношения (21, 26, 28), находим длину пробега ППП вдоль границы «золото-воздух» $L \sim 15$ метров, и глубину проникновения в воздух $d_p \sim 16$ мм.

Поверхности проводников характеризуются величиной поверхностного импеданса ξ . Для поверхностной волны вида (20)

$$\xi = \sin \chi = \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon}}, \quad (29)$$

Величина ξ является ключевой при решении задачи о дифракции ППП на проводящем клине (см. следующий параграф). Считается, что ξ является функцией от частоты, и зависит только от проводимости материала. Для золотой поверхности при $\lambda=140$ мкм величина

$$\xi \approx 0.00102 - i \cdot 0.00142. \quad (30)$$

Нанесение диэлектрических слоев на металлические поверхности сильно влияет на характеристики поверхностной волны. Если на поверхность металла нанести слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε_d и толщиной $1/k_0\sqrt{|\varepsilon|} \ll d \ll \lambda$, то для поверхностной волны на границе металл-диэлектрик-воздух приближенно можно записать

$$\begin{aligned}
\chi' &\approx k_0 \left(\frac{1}{\sqrt{-\varepsilon}} + \frac{\varepsilon_d - 1}{\varepsilon_d} k_0 d \right), \\
k'_s &\approx k_0 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{-\varepsilon}} + \frac{\varepsilon_d - 1}{\varepsilon_d} k_0 d \right)^2 \right], \\
\xi' &\approx \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} - i \frac{\varepsilon_d - 1}{\varepsilon_d} k_0 d.
\end{aligned} \tag{31}$$

Для слоя ZnS толщиной $d = 0.75$ мкм с $\varepsilon_d = 8.7 + i \cdot 0.059$ [15] в ТГц диапазоне, из уравнения (31) получаем

$$\begin{aligned}
\chi' &= 0.001048 - i \cdot 0.031, \hat{u} \\
k'_s &= (44900 + i \cdot 0.00147) \text{ м}^{-1}, \\
\chi' &= (1400 + i \cdot 47) \text{ м}^{-1}.
\end{aligned} \tag{32}$$

Тогда согласно уравнениям (21, 26, 31) получаем

$$\begin{aligned}
L'_p &= 0.7 \hat{i}, \\
d'_p &= 0.7 \hat{i} \hat{i}, \\
\xi' &\approx 0.00109 - i \cdot 0.0336.
\end{aligned} \tag{33}$$

Заметим, что при такой малой толщине ZnS ($d \approx 1/200\lambda$) длина пробега и глубина проникновения поверхностной волны по сравнению с чистым золотом меньше почти в 20 раз, а поверхностный импеданс во столько же раз больше.

При решении задачи о дифракции ППП на прямоугольном проводящем клине в теории Зоммерфельда-Малюжинца рассматривается плоская электромагнитная волна \vec{B}_i , падающая на край клина (см. Рис. 48). Для p -компоненты волны (случай ППП) в полярных координатах (r, θ) решается уравнение Гельмгольца с граничными условиями на поверхности проводника. Подробное решение уравнения и его анализ можно найти в нашей статье [24]. В результате, получено аналитическое выражение, описывающее поле ОВ за ребром клина в окрестности угла $\theta = 0^\circ$, порождённое дифрагирующими на ребре ППП (см. выражение (52) в [24]):

$$\begin{aligned}
B(r, \theta) &= -\frac{1}{2} \exp(-s^2) [-1 + i \operatorname{erfi}(s)] e^{ik_0 r}, \\
\operatorname{erfi}(s) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s \exp(t^2) dt,
\end{aligned} \tag{34}$$

где $\operatorname{erfi}(s)$ – мнимая часть функции ошибок (imaginary error function), переменная $s = \frac{1+i}{2} (\theta + \chi_+) \sqrt{k_0 r}$, $\chi_+ = \arcsin(\xi_+)$ – комплексный угол, зависящий от поверхностного

импеданса верхней грани клина. Уравнение (34) описывает волну в пространстве за торцом образца. Оно справедливо для любого r , как для ближнего поля, так и для дальней волновой зоны. Этот результат получен впервые в мире.

3.4.2. Сравнение с экспериментом

В данном параграфе представлены результаты теоретического анализа задачи о дифракции ППП на проводящем клине [24] и сравнение их с экспериментом.

Во-первых, показано, что дифрагированная поверхностная волна полностью рассеивается в свободно распространяющуюся электромагнитную волну, и ни отраженная, ни прошедшая поверхностные волны не могут возбуждаться в случае положительной реальной части поверхностного импеданса верхней грани клина $\text{Re}(\xi_+) > 0$ (см. Рис. 48). В ТГц диапазоне величина ξ_+ для золота и золота с покрытием ZnS, согласно (30, 33), удовлетворяет данному условию. Этот вывод очень интересен, однако система регистрации, используемая в наших экспериментах, не позволяет проверить данное утверждение.

Во-вторых, согласно теории, для клина с малым поверхностным импедансом дальняя волновая зона, где дифрагированное поле ППП представляет собой свободно распространяющуюся электромагнитную волну, начинается с очень больших расстояний

$$k_0 r \gg |\text{Im}\chi_+|^{-2}. \quad (35)$$

Угловое распределение свободной волны в дальней зоне имеет лоренцевский контур (см. выражение (45) в [24].) с шириной $\Delta\theta = 2|\text{Im}\chi_+| \approx 2|\text{Im}\xi_+|$, зависящей от поверхностного импеданса. Золото и золото с ZnS в ТГц диапазоне имеют достаточно малую мнимую часть поверхностного импеданса $\text{Im}(\xi_+) \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$, что позволяет использовать данное приближение. Согласно (16), для золота при $\lambda=140$ мкм дальняя зона начинается на расстоянии $r \gg 10\lambda$ от ребра клина, а для золота со слоем ZnS – при $r \gg 20\lambda$. В эксперименте, при детектировании волнового фронта комплексом «линза – ММБП», линза располагалась на расстоянии $a = 175$ мм от края образца, которое соответствует дальней зоне для золота с ZnS. Поэтому, в апертуру линзы должна была попадать только свободная волна, порождённая ППП. Как было отмечено выше, в экспериментах мы наблюдали падающую на линзу волну с угловой шириной $\Delta\theta \sim (4 \pm 1)^\circ$. Теоретическая оценка для золота с покрытием ZnS согласно (30) дает $\Delta\theta \approx 4^\circ$. Таким образом, в дальней волновой зоне для золота с ZnS результаты анализа очень хорошо совпадают с экспериментом.

На чистом золоте, у которого значение поверхностного импеданса на порядок меньше, чем при наличии на металле диэлектрического покрытия (см. (33)), в дальней зоне

рассеянное излучение должно быть еще более узконаправленным. Теоретическая оценка дает $\Delta\theta \approx 0.2^\circ$, что на порядок меньше чем у золота с ZnS. Так как для золота без покрытия дальняя волновая зона начинается на очень больших расстояниях (порядка десятков метров), то мы не смогли проверить данный факт, однако из графиков на Рис. 49, которые будут подробно описаны ниже, видно, что уже при $r = 50$ мм ширина углового распределения интенсивности ОВ для чистого золота меньше, чем для золота с ZnS.

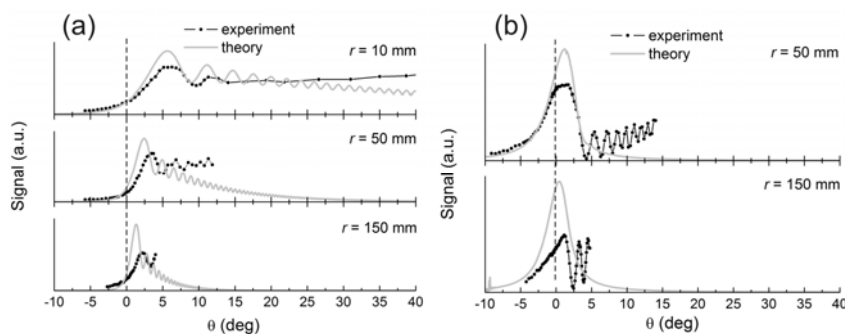


Рис. 49. Зависимости интенсивности поля от угла θ на разных расстояниях r от торца: золото без покрытия (а); золото с покрытием ZnS толщиной 0.75 мкм (б). Точками показаны экспериментальные данные, измеренные с помощью ячейки Голея, серые кривые – расчётные зависимости.

В-третьих, в соответствии с (15), зависимости интенсивности поля ОВ от угла θ при разных расстояниях r от ребра клина имеют вид, представленный на Рис. 49 (серые кривые). Графики слева получены для чистого золота при расстояниях $r = 10, 50$ и 150 мм от ребра клина, справа – для золота со слоем ZnS толщиной 0.75 мкм. На том же рисунке показаны соответствующие экспериментальные зависимости при разных расстояниях h , полученные с помощью ячейки Голея. В рассматриваемом диапазоне углов θ от -10 до 20 градусов различие между h и r пренебрежимо мало ($r = h/\cos(\theta) \approx h/l$). Из графиков видно, что распределение интенсивности регистрируемого излучения не соответствует экспоненциальному распределению интенсивности в поверхностной электромагнитной волне, а сначала растёт и только затем падает. В области небольших углов, где находится основной максимум, теоретические кривые по форме достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными. Небольшие расхождения наблюдаются на образце золотом без покрытия при $r = 50$ и 150 мм (Рис 49 (а)). Для золота с покрытием ZnS положение и форма максимумов теоретических и экспериментальных кривых практически совпадают. Заметим, что ширина $\Delta\theta$ профилей графиков для поверхностей с ZnS (Рис. 49 (б)) при $r = 50 \div 150$ мм (дальняя зона) примерно равна четырём градусам, что соответствует ранее приведенным данным.

В-четвертых, в соответствии, как с теорией, так и с экспериментом, с увеличением r для обоих образцов распределение интенсивности становится уже и смещается в область малых углов. Следовательно, с приближением к дальней волновой зоне рассеянные волны распространяются преимущественно вдоль направления поверхности образца, причем в основном в области $\theta > 0^\circ$. Данный вывод также подтверждают результаты, полученные Верой Зон [16,17]. На графиках можно заметить, что на одних и тех же расстояниях r максимумы интенсивности поля для золота со слоем ZnS находятся ближе к углу $\theta = 0^\circ$ по сравнению с чистым золотом. Мы можем указать две причины, которые могут привести к данному поведению поля за торцом. Во-первых, дальняя волновая зона, в которой рассеянное излучение распространяется преимущественно вдоль направления поверхности образца, для золота с диэлектриком, как было выяснено ранее, находится на значительно меньших расстояниях, чем для чистого золота. Следовательно, при одинаковых r максимум интенсивности ОБ для золота с покрытием будет ближе к

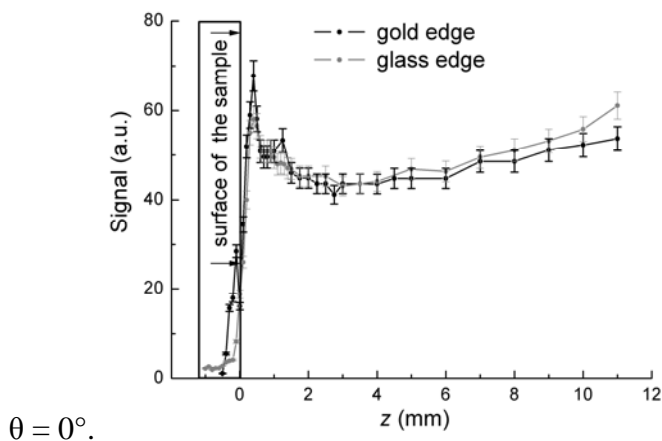


Рис. 50. Зависимости интенсивности поля от координаты z , измеренные на золоте без покрытия с помощью ячейки Голя на расстоянии $h = 1$ мм: торец покрыт золотом

В-пятых, согласно (34), угловое распределение ОБ, порождённых в результате дифракции на ребре клина поверхностной волны, не должно отличаться для покрытой и непокрытой металлом боковой грани клина. Мы измерили интенсивность поля ячейкой Голя за торцом образца с золотой поверхностью на расстоянии $h = 1$ мм для покрытой и непокрытой (чистое стекло) золотом боковой грани. На Рис. 50 представлены результаты экспериментов. Видно, что в пределах погрешности измерений, обе кривые совпадают, что подтверждает теоретические результаты.

3.5. Предложения по использованию результатов работы

Исследования распространения ППП по поверхностям, покрытым слоями сернистого цинка, нанотрубок и биологически важных молекул, описаны в предыдущих отчетах.

Продемонстрировано, что ППП-спектроскопия является мощным средством исследования поверхностей. Замечено, что эффективность измерений возрастает, если наряду с ППП-спектроскопией использовать спектроскопию нарушенного полного внутреннего отражения, которая обеспечивает исследование локальных поверхностных плазмонов, возникающих на микро- и наночастицах и неоднородностях. В рамках проекта разработаны макетные образцы ППП и ЛПП спектрометров (см. отчеты за 1 – 5 этапы).

Результаты свидетельствуют, что, если использовать методы захвата и регистрации плазмонов, разработанные в данном проекте, и взять за основу созданный нами макетный образец, то реализация опытного образца ППП-спектрометра при использовании перестраиваемого по частоте источника терагерцового излучения (например, новосибирского ЛСЭ) представляется вполне реальной задачей. При этом его стоимость будет невелика. Основная цена – стоимость генерации излучения. Если вместо ЛСЭ использовать другой источник, такой как проектируемые компактные ЛСЭ или квантовые каскадные лазеры, стоимость работы на спектрометре становится вполне приемлемой. Недостатком квантовых каскадных лазеров является отсутствие возможности перестройки длины волны излучения. Компактные ЛСЭ пока мало распространены, хотя проекты их изготовления для систем безопасности существуют. Следовательно, одной из составляющих, необходимых для внедрения ППП-спектрометров терагерцового диапазона в измерительную технику, является разработка недорогих источников перестраиваемого монохроматического терагерцового излучения.

Создание опытного образца ЛПП-спектрометра – более сложная задача, поскольку требует реализации технологий ближнепольной микроскопии. В рамках нашего проекта макетный образец ближнепольного ЛПП-спектрометра был разработан, и были апробированы его основные элементы (отчет за 4-ый этап). Одной из основных трудностей является измерение рассеянного от микро- (нано-) образца излучения, интенсивность которого крайне низка. В качестве такого детектора на средства НОЦ был приобретен криогенный сверхпроводниковый болометр на горячих электронах, который был испытан нами на очень слабом излучении ППП, распространяющихся по изогнутым поверхностям (см. отчет за 5-й этап). Таким образом, можно заключить, что запуск ЛПП-спектрометра, использующего излучение ЛСЭ, является вполне реальной задачей, но, вследствие очень слабой интенсивности рассеянного излучения, требующей больших усилий, создания и отработки сложных электронных устройств и больших материальных вложений. Эти усилия, однако, представляются разумными, поскольку и в России, и за рубежом в настоящее время нет ни одного действующего ЛПП-спектрометра (субволнового микроскопа) с перестраиваемым источником терагерцового излучения.

Таким образом, предложения по развитию терагерцовой спектроскопии, основанной на использовании поверхностных плазмон-поляритонов и локализованных плазмонов, можно сформулировать следующим образом.

1. На основе экспериментальной базы, заложенной в настоящей работе, предлагается создать опытный образец ППП-спектрометра, используя на данном этапе НЛСЭ в качестве источника излучения.
2. Предлагается обратить внимание на необходимость разработки источников излучения, приемлемых для пользователей, в частности, компактных лазеров на свободных электронах.
3. Используя опытный образец ППП-спектрометра, предлагается создать систему автоматического сбора и обработки информации, управляемой от ПК.
4. Предлагается продолжить работы по спектрометру локализованных плазмонов, обратив внимание на регистрацию слабого рассеянного излучения, создание электронной системы управления ближнепольным микроскопом, а также специализированную систему синхронного усиления сигнала, существенно повысив отношение сигнал/шум.
5. Очевидно, что к настоящему времени разработаны только базовые методы использования ППП и ЛПП в экспериментах. Требуется выполнение дополнительных широких исследований, направленных на развитие специализированных методов и устройств: для исследования тонких пленок, исследования дисперсных материалов и жидкостей, для исследования биологических молекул и объектов.
- 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках 6-го этапа были проведены исследования распространения терагерцевых волн через периодические решетки с диаметром отверстий как больше, так и меньше длины волны. Во втором случае обнаружено, что теория дифракции оказалась применима даже к субволновым отверстиям. Численное моделирование в среде Matlab, в котором промоделированы отверстия как магнитные диполи, согласуется с экспериментом. Этот факт однозначно свидетельствует о том, что электромагнитное терагерцевое излучение проникает сквозь малые отверстия, причем единственным механизмом проникновения могут быть только поверхностные плазмоны. Эти исследования явно требуют дальнейшего развития, выходящего за рамки данной работы. В ходе исследования Тальбот-эффекта было показано, что регистрация тальботовских картин в видимом диапазоне с высоким временным разрешением оказалась перспективным средством исследования турбулентности газов на

трассах до 100 метров. Результаты работы за все шесть этапов использованы для составления программы их внедрения в учебный процесс. Начата разработка расширенного учебного курса «Излучение и вещество», пишутся сценарии двух учебных фильмов, создается электронный учебный курс. Завершение работ планируется в сентябре-октябре 2012. Результаты работы за шестой этап представлены на национальной и международных конференциях, направлены в печать (или готовятся к публикации) статьи в ведущие российские и международные журналы.

Общий анализ результатов настоящего проекта показывает, что в процессе его выполнения заложены физические основы плазменной спектроскопии в терагерцовом диапазоне с использованием монохроматического перестраиваемого по частоте источника излучения, в качестве которого в данной работе использован лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Созданы макетные образцы спектрометров для исследования поверхностей – как чистых, так и покрытых слоями материалов и субстанций различной природы, проведены исследования распространения плазмонов по различным образцам. Даны предложения по использованию результатов работы. За все время выполнения проекта поданы 4 заявки на патенты, опубликовано 25 статей в ведущих российских и международных журналах, сделано 36 докладов на конференциях и научных школах.

Список литературы

1. Talbot F. Facts relating to optical science. IV. *Philos. Mag*, 9. с.401-407 (1836)
2. Lord Rayleigh. On copying diffraction-gratings and on some phenomena connected therewith. *Philos. Mag*, 11. с.196-205 (1881), Стрэтт Дж.В. (лорд Рэлей). Волновая теория света, М: URSS (2010)
3. А.С. Коряковский, В.М. Марченко, А.М. Прохоров. Дифракционная теория метода тальбот-интерферометрии и диагностика широкоапертурных волновых фронтов. Труды института общей физики АН СССР, Т. 76 С. 33 (1987).
4. Справочник по лазерам. /Под ред. А.М.Прохорова, т.1. М.: Сов. радио, 1981.
5. D.H. Auston, K.P. Cheung, P.R. Smith, Picosecond photoconducting Hertzian dipoles. Picosecond photoconducting Hertzian dipole. *Appl. Phys. Letters*, 45, 284, 1984; M. von-Exter, Ch.Fattinger, D. Grischkowsky. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector. *Appl. Phys. Letters*, 55, 337, 1989.
6. D.H. Auston, M.C. Nuss. Electro-optic generation and detection of femtosecond electrical transients. *IEEE J. Quantum Electronics*, 24, 184, 1988.
7. K. Kawase, J-ichi Shikata, H. Ito, Terahertz wave parametric source, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35**, R1 (2002)
8. E. Bründermann, H.-W. Hübers, M. FG. Kimmitt. *Terahertz Techniques*, Springer, 2012.
9. 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*, Т. 108, Вып. 6, с. 731-737, 2010.
10. Dragoman M., Dragoman D. Plasmonics: Applications to nanoscale terahertz and optical devices, *Progress in Quantum Electronics*. 2008. Vol. 32, no. 1. P. 1 – 41. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079672707000584>.
11. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред, под ред. Аграновича В.М. и Миллса Д.Л. – М.: Наука, 1985. – 525 с.
12. Grischkowsky D., Keiding S., Exter M., Fattinger Ch. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors, *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, v.7(10), p.2006-2015.
13. P. Dawson, B.A.F. Puygranier, J.-P. Goudonnet. Surface plasmon polariton propagation length: A direct comparison using photon scanning tunneling microscopy and attenuated total reflection. *Phys. Rev. B*, V. 72, 63, 205410.
14. Heinz Raether/ *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. Springer-Verlag, 1988

15. Novotny L., Hecht B. Principles of nano-optics // Cambridge university press, Cambridge. 2006. P. 382.
16. Zon Vera B. Reflection, refraction, and transformation into photons of surface plasmons on a metal wedge // J. Opt. Soc. Am. B. 2007. august. T. 24, № 8. C. 1960. 2, 14, 16, 25, 28
17. Zon V. B., Zon B. A. Terahertz surface plasmon polaritons on a conductive right circular cone: Analytical description and experimental verification // Phys. Rev. A. 2011. Jul. Vol. 84.
18. Maier S.A. Plasmonics: Fundamentals and Applications // Springer, Springer Science+Business Media LLC, 2007. 223 p.
19. Saxler J., Rivas J.G., Janke C., Pellemans H. P. M., Bolivar P.H. and Kurz H. // Phys. Rev. (B). 2004. V. 69. P. 155427.
20. Nazarov M., and Coutaz J.-L. // J. Infrared Milli Terahz Waves, 2011. V. 32. P. 1054.
21. Gong M., Jeon T.-I., Grischkowsky D. THz surface wave collapse on coated metal surfaces // Optics Expr., 2009, v.17(19), p.17088-17101.
22. Seymour R.J, Koteles E.S., and Stegeman G.I. // Appl. Phys. Lett. 1982. V.41. No. 11. P. 1013.
23. Steijn K.W., Seymour R.J, and Stegeman G.I. // Appl. Phys. Lett. 1986. V.49. No. 18. P. 1151.
24. Igor A. Kotelnikov, Vasily V. Gerasimov, Boris A. Knyazev. Diffraction of surface wave on conducting rectangular wedge. Направлено в Phys. Rev. A, авг. 2012, Per. № AV10799.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

В работах по проекту участвовали студенты и магистранты Новосибирского государственного университета и Новосибирского государственного технического университета, а также аспиранты НГУ и СО РАН. Два молодых участника делают устные доклады на Международной конференции по инфракрасному, миллиметровому и терагерцовому излучению в Австралии (сентябрь 2012). Результаты работы внедрены и внедряются в учебный процесс (см. главу 2 настоящего отчета).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПУБЛИКАЦИИ ПО ПРОЕКТУ

(НАРАСТАЮЩИМ ИТОГОМ)

К настоящему времени опубликованы следующие статьи в рецензируемых журналах, включающие материалы работы по данному проекту:

1. В А Knyazev, G N Kulipanov, N A Vinokurov. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements. *Measurement Science and Technology*, V. 21, 054017, 13p. 2010.
2. 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*, Т. 108, Вып. 6, с. 731-737, 2010.
3. Б.А. Князев, А.А. Никитин, В.С. Черкасский. Метод автоматической регистрации движения объектов при спекл-фотографии в терагерцовом диапазоне. *Автометрия*, Т.46, №4, 78-83 (2010).
4. В. М. Ведерников, П. М. Дутов, А. И. Кокарев, В. П. Кирьянов, Б. А. Князев, В. Г. Никитин, И. Г. Пальчикова³, А. Р. Саметов, М. Ф.Ступак, Ю. В.Чугуй, В. В. Чуканов. ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ. *Автометрия*, т. 46, №4, с. 84 – 97, 2010.
5. В.В. Герасимов, Г.Н. Жижин, Б.А. Князев, А.К. Никитин, В.В. Никитин. Способ индикации дифракционных спутников поверхностных плазмонов терагерцового диапазона. *Письма в ЖТФ*, Т.36, Вып. 21, 93 (2010).
6. В.В. Герасимов; Г.Н. Жижин, Б.А. Князев; А.К. Никитин. Возбуждение поверхностных плазмонов терагерцового диапазона методом нарушенного полного внутреннего отражения через подложку. *Оптический журнал*, Т.77, №8 (2010).
7. В.В. Пикалов, А.Л. Баландин, Д.Г. Родионов, М.Г. Власенко, Б.А. Князев. Терагерцовая томография низкоконтрастных объектов: алгоритмы и экспериментальные измерения. *Вестник НГУ, сер. Физика*, Т.5, №4, С. 91-97 (2010).
8. А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак. Разработка конфокального датчика 3D поверхности на основе метода дифракционного хроматического кодирования для целей терагерцовой спектроскопии. *Вестник НГУ, сер. Физика*, Т.5, №4, С. 117-122 (2010).

9. 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*, Т.5, №4, С. 158-161 (2010).
10. 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*, Т.5, №4, С. 147-150 (2010).
11. М. М. Власенко, В. В. Герасимов, Б. А. Князев, А. А. Никитин, В. С. Черкасский, Ю. Ю. Чопорова. Запись голограмм в терагерцовом диапазоне на лазере на свободных электронах. *Вестник НГУ, сер. Физика*, Т.5, №4, С. 98-102 (2010).
12. 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*, Т.5, №4, С. 73-78 (2010).
13. Жижин Г.Н., Головцов Н.И., Логинов А.П., Никитин А.К., Рыжова Т.А. Диэлектрическая спектроскопия тонких слоёв в терагерцовом диапазоне // *Вестник РУДН (Физика)*, 2011, №2, с.133-147.
14. G.N.Kulipanov, B.A. Knyazev, A.P. Shkurinov. Introductory remarks from the guest editors. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, V. 32, P. 1053. DOI: 10.1007/s10762-011-9835-0
15. B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky, Yu. Yu. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, A. K. Nikitin, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov. High-power monochromatic terahertz radiation: Metrological aspects. *Proc. of 20th IMEKO TC2 Symposium on Photonics in Measurement*, Linz, May 16-18, 2011, Shaker Verlag, 2011. ISBN 978-3-8440-0058-0. P. 141-145.
16. А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак. Особенности построения ближнепольной сканирующей приставки для терагерцового спектрометра нарушенного полного внутреннего отражения. Принято в *Юбилейный сборник трудов КТИНП СО РАН*, под ред. Ю.В. Чугуя (июль, 2011).
17. 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*, **98**, 171912 (2011); DOI:10.1063/1.3584130 (3 pages).
18. 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: Volume 32, Issue 10, Page 1207-1222, (2011) DOI: 10.1007/s10762-011-9773-x

19. Запись и восстановление голограмм амплитудных объектов в терагерцовом диапазоне Ю. Ю. Чопорова, М. Г. Власенко, В. В. Герасимов, Т. Н. Иргалин, Б. А. Князев, В. С. Черкасский. *Известия вузов. Радиофизика*. том 54, №8-9, стр. 649-655.
20. 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. *Автометрия*, Т. 47, №5, С. 109-113 (2011).
21. В. А. Knyazev, W. An, and H. Bluhm. Stark spectroscopy of a probe lithium beam excited with two dye lasers as a technique to study a high-power ion-beam diode. *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 033101 (2012); <http://dx.doi.org/10.1063/1.3690384> (9 pages)
22. Г. Н. Жижин, А. П. Кирьянов, А. К. Никитин, О. В. Хитров. Дисперсионная фурье-спектроскопия поверхностных плазмонов инфракрасного диапазона. *Оптика и спектроскопия*, 2012, том 112, № 4, с. 597–602
23. Б. А. Князев, В. С. Черкасский, Ю. Ю. Чопорова, В. В. Герасимов, М. Г. Власенко, М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. К. Никитин, Г. Н. Кулипанов, Н. А. Винокуров. Мощное монохроматическое терагерцовое излучение: метрологические аспекты. – Принято к печати в *Вестник НГТУ*, 2012.
24. Igor A. Kotelnikov, Vasily V. Gerasimov, Boris A. Knyazev. Diffraction of surface wave on conducting rectangular wedge. Направлено в *Phys. Rev. A*, авг. 2012, Рег. № AV10799.
25. V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, I.A. Kotelnikov, A.K. Nikitin, G.N. Zhizhin. Surface plasmon polaritons launched using a terahertz free electron laser: travelling along a gold-ZnS-air interface and decoupling to free waves at the surface tail end. Направлено в *Optics Express*, авг. 2012.

Материалы работы доложены на следующих конференциях:

1. А.К. Nikitin, О.В. Khitrov, А.Р. Kyrianov, В.А. Knyazev, G.N. Zhizhin. Surface Plasmon Dispersive Spectroscopy of Thin Films at Terahertz Frequencies. XII International Conference on Laser Applications in Life Sciences 2010 (LALS-2010) to be held in Oulu, Finland, on June 9-11, 2010
2. Ю.Ю. Чопорова, Б.А. Князев, В.В. Герасимов, М.Г. Власенко. Запись голограмм в терагерцовом диапазоне с помощью лазера на свободных электронах. 2010, *Conf. IEEE* (в печати)

3. B.A. Knyazev, V.S. Cherkassky, V.V. Gerasimov, Yu.Yu. Choporova, M.G. Vlasenko. Talbot effect in terahertz spectral range. 35th international conference on infrared, millimeter and terahertz waves, Rome, Italy, September 5-10,2010.
4. B.A. Knyazev, A.L. Balandin, V.S. Cherkassky, Yu.Yu. Choporova V.V. Gerasimov, M.G. Vlasenko, A.A. Nikitin, V.V. Pickalov. Classic holography and speckle-metrology using a high-power terahertz free electron laser and real-time image detectors. 35th international conference on infrared, millimeter and terahertz waves, Rome, Italy, September 5-10,2010.
5. В. В. Пикалов, А. Л. Баландин, Д. Г. Родионов, М. Г. Власенко, Б. А. Князев. Терагерцовая томография низкоконтрастных объектов: алгоритмы и экспериментальные измерения. Международный Симпозиум "Терагерцовое излучение: генерация и применение", Новосибирск, Россия, 26.07.2010-31.07.2010.
6. Yu.Yu. Choporova, B.A. Knyazev, V.S. Cherkassky, V.V. Gerasimov, A.A. Nikitin, M.G. Vlasenko. Approaching terahertz holography using the free electron laser. Международный Симпозиум "Терагерцовое излучение: генерация и применение", Новосибирск, Россия, 26.07.2010-31.07.2010.
7. M.G. Vlasenko, V.S. Cherkassky, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev. Talbot effect in visible and terahertz spectral ranges: examination and application. Международный Симпозиум "Терагерцовое излучение: генерация и применение", Новосибирск, Россия, 26.07.2010-31.07.2010.
8. В. А. Князев. Advanced in terahertz optics with the free electron laser. Международный Симпозиум "Терагерцовое излучение: генерация и применение", Новосибирск, Россия, 26.07.2010-31.07.2010.
9. V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev, A. K. Nikitin, V. V. Nikitin, G. N. Zhizhin. Terahertz surface-plasmon microscopy using free-electron laser and microbolometer matrix. Международный Симпозиум "Терагерцовое излучение: генерация и применение", Новосибирск, Россия, 26.07.2010-31.07.2010.
10. V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev, O. V. Khitrov, A. K. Nikitin, G. N. Zhizhin, V. V. Nikitin. Noninterferometric way to determine surface-plasmon's complex refractive index. Международный Симпозиум "Терагерцовое излучение: генерация и применение", Новосибирск, Россия, 26.07.2010-31.07.2010.
11. Gerasimov Vasily V., Cherkassky Valery S., Choporova Yulia Yu., Knyazev Boris A., Nikitin Alexander A., Vlasenko Maxim G. Real-time imaging systems for optical experiments with the THz free-electron lasers. XIX Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, лазерам, их приложениям и технологиям ICONO/LAT 2010. 23 по 27 августа 2010 года в Казани (Татарстан)

12. N.A. Vinokurov#, E.N. Dementyev, B.A. Dovzhenko, Ya.V. Getmanov, B.A. Knyazev, E.I. Kolobanov, V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, L.E. Medvedev, S.V. Miginsky, L.A. Mironenko, V.K. Ovchar, K.V. Palagin, B.Z. Persov, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Serednyakov, O.A. Shevchenko, A.N. Skrinisky, V.G. Tcheskidov, Yu.F. Tokarev, P.D. Vobly, N.S. Zaigraeva. NOVOSIBIRSK FREE ELECTRON LASER FACILITY: TWO-ORBIT ERL WITH TWO FELs. Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan WEOARA03, P.2427-2429 (2010), <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/weoara03.pdf>.
13. Ю.Ю. Чопорова, Б.А. Князев, В.В. Герасимов, М.Г. Власенко. Запись голограмм в терагерцовом диапазоне с помощью лазера на свободных электронах. Материалы X международной конференции актуальные проблемы электронного приборостроения, АРЕПЕ-2010, Т. 5, С. 43-46. IEEE Catalog Number CFP1-471-PRT, Новосибирск, НГТУ, 22-24 сентября, 2010.
14. Князев Б.А. Новосибирский лазер на свободных электронах: возможности для исследования материалов и объектов. // Школа молодых специалистов по синхротронному излучению»: Программа и сборник лекций / Под ред М.В. Кузина. 11-15 ноября 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск: ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 2010.
15. Б.А. Князев, Н.А. Винокуров, В. М. Ведерников, М.Г. Власенко, П.Д. Воблый, А.А. Гальт, В.В. Герасимов, Я.В. Гетманов, Е.Н. Дементьев, И.А. Довженко, М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, Н.С. Заиграева, Е.И. Колобанов, В.В. Кубарев, Г.Н. Кулипанов, Л.Э. Медведев, С.В. Мигинский, Л.А. Мironenko, А.К. Никитин, В.К. Овчар, И.Г. Пальчикова, Б.З. Персов, В.В. Пикалов, В.М. Попик, Т.В. Саликова, С.С. Середняков, А.Н. Скринский, М. Ф.Ступак, В.Г. Ческидов, В.С. Черкасский, Ю.В. Чопорова, О.А. Шевченко, М.А. Щеглов Новосибирский лазер на свободных электронах: запуск второй очереди и эксперименты по квазиоптике. Тезисы докладов VIII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 1-4 марта, 2011, с. 11-12.
16. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, А.К. Никитин. Визуализация поля поверхностных плазмонов, генерированных терагерцовым излучением Новосибирского лазера на свободных электронах. Тезисы докладов VIII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 1-4 марта, 2011, с. 28-29.
17. Ю.Ю.Чопорова, М.Г.Власенко, В.В.Герасимов, Б.А.Князев, В.С. Черкасский. Запись и восстановление габоровских голограмм в терагерцовом диапазоне. Тезисы докладов VIII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 1-4 марта, 2011, с. 78-79.

18. B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky, Yu. Yu. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, A. K. Nikitin, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov. High-power monochromatic terahertz radiation: Metrological aspects. Proc. of 20th IMEKO TC2 Symposium on Photonics in Measurement, Linz, May 16-18, 2011, Shaker Verlag, 2011. ISBN 978-3-8440-0058-0. P. 141-145.
19. Б.А. Князев, Н.А. Винокуров, В. М. Ведерников и др. Новосибирский лазер на свободных электронах: запуск второй очереди и эксперименты по квазиоптике. Тезисы докладов VIII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 1-4 марта, 2011, с. 11-12
20. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, А.К. Никитин. Визуализация поля поверхностных плазмонов, генерированных терагерцовым излучением Новосибирского лазера на свободных электронах. Тезисы докладов VIII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 1-4 марта, 2011, с. 28-29.
21. Ю.Ю.Чопорова, М.Г.Власенко, В.В.Герасимов, Б.А.Князев, В.С. Черкасский. Запись и восстановление габоровских голограмм в терагерцовом диапазоне. Тезисы докладов VIII Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 1-4 марта, 2011, с. 78-79.
22. Boris Knyazev, Valery Cherkassky, Eugeny Chesnokov et al. Novosibirsk terahertz free electron laser: Facility development and new experimental results at the user stations. Abstracts of 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Houston, Texas, USA, October 2-7, 2011.
23. Yulia Choporova, Valery Cherkassky, Boris Knyazev. In-line and Reference-Beam Holography Experiments on Terahertz Novosibirsk Free Electron Laser. Abstracts of 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Houston, Texas, USA, October 2-7, 2011.
24. Vasily Gerasimov, Boris Knyazev, Alexey Nikitin, Guerman Zhizhin. Terahertz surface plasmon generation and study using a free-electron laser and uncooled detectors. Abstracts of 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Houston, Texas, USA, October 2-7, 2011.
25. B.A. Knyazev. Advances in real-time terahertz imaging using the Novosibirsk free electron laser: imaging devices and applications. Book of abstracts of 19th International conference on advanced laser technologies – ALT'11. September 3-8, 2011, Golden Sands, Bulgaria, P. 101.
26. Иргалин Т.Н., Чопорова Ю.Ю. Эксперименты на Новосибирском лазере на свободных электронах: запись и восстановление голограмм в терагерцовом диапазоне. Тезисы

- докладов Молодежного конкурс-конференции "Фотоника и оптические технологии", Новосибирск, 26-27 марта 2012 г. стр.13-14. Институт Автоматики СО РАН.
27. Boris A. Knyazev, Valery S. Cherkassky, Yulia Yu. Choporova, Vasily V. Gerasimov, Igor A. Kotelnikov, Aleksey K. Nikitin, M. G. Vlasenko. OPTICAL EXPERIMENTS AT NOVOFEL FACILITY. Тезисы докладов международной конференции "XIX НАЦИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ" Новосибирск, 25 – 28 июня 2012, С. 13.
 28. В.В. Герасимов, Б.А. Князев, И.А. Котельников, Н.А. Митина, А.К. Никитин, Г.Н. Жижин. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ВДОЛЬ ГРАНИЦЫ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ВОЗДУХ. Тезисы докладов международной конференции "XIX НАЦИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ" Новосибирск, 25 – 28 июня 2012, С. 79.
 29. И.А. Азаров, В.А. Швец, В.Ю. Прокопьев, С.А. Дулин, Ю.Ю. Чопорова, С.В. Рыхлицкий, Б.А. Князев. ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ. Тезисы докладов международной конференции "XIX НАЦИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ" Новосибирск, 25 – 28 июня 2012, С. 85.
 30. Ivan A. Azarov, Vasily A. Shvets, Vitaly Yu. Prokopiev, Sergey A. Dulin, Yulia Yu. Choporova, Sergey V. Rykhlytskii, Boris A. Knyazev. Ellipsometric Measurement System using Terahertz Novosibirsk Free Electron Laser. Abstract book of the 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications", 20-22 June 2012, Moscow, Russia, P. 58.
 31. Vasily V. Gerasimov, Boris A. Knyazev, Igor A. Kotelnikov, Nadezhda A. Mitina, Alexey K. Nikitin and Guerman N. Zhizhin. Implementation of three detector techniques for study of surface plasmons travelling along straight and curved metal-dielectric interfaces. Abstract book of the 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications", 20-22 June 2012, Moscow, Russia, P.78.
 32. Boris A. Knyazev, Valery S. Cherkassky, Yulia Yu. Choporova, Vasily V. Gerasimov, Igor A. Kotelnikov, M. G. Vlasenko. New experiments in optics at NovoFEL facility. Abstract book of the 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications", 20-22 June 2012, Moscow, Russia, P. 104.
 33. В. А. Князев, Ю. Ю. Чопорова, В. В. Герасимов, М. Г. Власенко, В. С. Павельев, В. О. Володкин, А. Н. Агафонов, К. Н. Тукмаков, А. К. Кавеев, Г. И. Кротов, Е. В. Тсыганкова, М. Ф. Ступак, И. Г. Палчикова. Diffractive optical elements for the terahertz region. Abstract

- book of the 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications", 20-22 June 2012, Moscow, Russia, P. 111.
34. B. A. Knyazev, Experiments in terahertz optics: A review of new results at Novosibirsk free electron laser, Internat. Conf. Advanced Laser Technology, Thun, Switzerland, 2012.
35. B. A. Knyazev, Yu. Yu. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, V. S. Pavelyev, B. O. Volodkin, A. N. Agafonov, K. N. Tukmakov, A. K. Kaveev, G. I. Kropotov, E. V. Tsygankova, M. F. Stupak, I. G. Palchikova. Study of diffractive optical elements using high-power radiation of Novosibirsk terahertz free electron laser. Proc. 37th Internat. Conf. on IR, Millimeter and THz Waves, 23 – 28 Sept. 2012, Wollongong, Australia, 2 p.
36. Vasily V. Gerasimov, Valery S. Cherkassky, Boris A. Knyazev, Igor A. Kotelnikov, Nadezhda A. Mitina, Alexey K. Nikitin and Guerman N. Zhizhin. Study of surface plasmons travelling along straight and curved metal-dielectric interfaces: Experiments and theory. Proc. 37th Internat. Conf. on IR, Millimeter and THz Waves, 23 – 28 Sept. 2012, Wollongong, Australia, 2 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПАТЕНТНЫЙ ПОИСК

Список исполнителей

Князев Б.А.

зав. ЛПЭ, д.ф.-м.н.

Общее руководство, корректировка отчета.
Анализ выбранных источников информации,
поиск по базе WordWide Database <http://ep.espacenet.com>
перевод с английского и анализ рефератов

Беляева Н.А.

зав отделом управления ИС

Разделы 1, 2,3,4, поиск по базе <http://www.fips.ru>,
Приложения А и Б

Шмойлова Н.Н.

вед. инженер отдела управления ИС

Поиск по базам: US <http://www.uspto.gov>,
WordWide Database <http://ep.espacenet.com>
Приложение В

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие данные об объекте исследования	73
2. Аналитическая часть	74
2.1 Методы формирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в терагерцовом диапазоне	77
а) формирование поверхностных плазмон-поляритонов путем ограничения волнового фронта	77
б) формирование поверхностных плазмон-поляритонов путем использования НПВО	78
3. Методы исследования тонких слоев и их поверхностей с использованием плазмон- поляритонной спектроскопии	79
4. Заключение	81
5. ПРИЛОЖЕНИЕ А – Задание № 1/ 02.740.11.0556 на проведение патентных исследований	84
6. ПРИЛОЖЕНИЕ Б – регламент поиска № 1.1	85
7. ПРИЛОЖЕНИЕ В – форма отчета о поиске	86

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ПЭВ –поверхностная электромагнитная волна
ТГц –терагерцовый диапазон
ДНК –дезоксирибонуклеиновая кислота
ЛСЭ- лазер на свободных электронах
МПК – международная патентная классификация
ППП –поверхностные плазмон- поляритоны
ИК диапазон –инфракрасный диапазон
ДИК – дальний инфракрасный диапазон
ПП- плазмон поляритон
ОИ – объемное излучение

Начало работы 01 августа 2012

Окончание работы 31 августа 2012

1 Общие данные об объекте исследований

Целью научного проекта была разработка физических основ плазмонной спектроскопии в терагерцовом диапазоне, развитие методов исследования поверхностей с использованием монохроматического перестраиваемого по частоте источника излучения, а также создание макетных образцов спектрометров для исследования поверхностей – как чистых, так и покрытых слоями материалов и субстанций различной природы.

Объектом патентных исследований, в соответствии с приведенной выше целью научного проекта, являются способы и устройства для исследования тонких пленок и малых объектов на металлических и полупроводниковых поверхностях с использованием поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) терагерцового диапазона.

Необходимость освоения ТГц диапазона обусловлена рядом достоинств ТГц излучения. Одним из них является попадание в эту область характерного спектра атомов и многоатомных молекул. По ТГц спектрам поглощения можно установить строение молекул различных органических (и неорганических) веществ: белков, жиров, углеводов, ДНК и др. По числу и положению пиков в ТГц спектрах поглощения можно судить о природе вещества (качественный анализ), а по интенсивности полос поглощения – о количестве вещества (количественный анализ). Признано, что, что ТГц излучение безвредно для человека, что позволяет применять его для медицинской диагностики, в современных системах безопасности, для контроля качества медикаментов и продуктов питания.

Использование особенностей ТГц спектра позволит выйти на значительно более информативный уровень характеристики объекта, продвинуть ТГц оптику и фотонику в ряд критических технологий современности.

Терагерцовый диапазон мало исследовался многие годы из-за отсутствия **источников и детекторов излучения**. В настоящее время эффективность приемников излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне является относительно низкой, что требует использования мощных источников излучения при изучении его взаимодействия с веществом.

С созданием импульсных лазеров, генерирующих фемтосекундные импульсы с шириной спектра до 3000 см^{-1} , появилась возможность исследования объектов в ТГц диапазоне.

Развитию исследований способствовало и то обстоятельство, что фотопроводящие антенны и электрооптические кристаллы, с помощью которых создается терагерцовое излучение, могут служить также детекторами этого излучения. Методы исследований,

основанные на использовании этих широкополосных источников, называют измерениями «во временном домене» (time domain), долгое время являлись практически единственными, имеющими как достоинства, так и существенные недостатки. Появление в последние несколько лет монохроматических источников терагерцового излучения, в частности перестраиваемых по частоте лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) с высокой средней мощностью излучения, позволяет перейти к разработке новых средств и методов измерений в терагерцовом диапазоне теперь уже в «частотном домене» (frequency domain).

На данном этапе актуальной задачей является разработка научно-технических подходов к созданию **практически отсутствующих для данного диапазона приборов и методов** исследования объектов.

Исходя из начала интенсивного развития исследований с использованием терагерцового излучения, глубина патентного поиска определена примерно в тридцать лет.

Поиск проводился в отечественных и зарубежных электронных патентных базах данных по ключевым словам, классам международной патентной классификации (МПК), наименованиям заявителей.

Ключевые слова: плазмон, поверхностная электромагнитная волна (ПЭВ), плазмонная спектроскопия, терагерцовая спектроскопия.

Surface Plasmon, surface plasmon polariton, surface electromagnetic waves, localized (localized) plasmons, terahertz spectral region (или range), submillimeter spectral range. Far infrared spectral range, surface study, thin films, disperse materials

Классы МПК: G01R27/26, G01J3/42, G01N21/35, G01N21/41, G02B27/10, G01N21/43, G01N21/39

Всего отобрано для исследования по библиографическим данным из зарубежных баз 140 объектов, из них отобрано для анализа по рефератам 40 патентных документов, особый интерес представляют 23 документа. Из отечественных баз проанализировано по библиографическим данным 57 документов, из них по рефератам -40 документов, интерес представляют 17 документов.

2. Аналитическая часть

Поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ) представляют собой направленное электромагнитное излучение, локализованное вблизи поверхности раздела двух сред и распространяющееся вдоль этой поверхности, они представляют собой неразрывное целое с поверхностным плазмоном – колебаниями свободных электронов вблизи поверхности проводника. Такую самосогласованную комбинацию электромагнитной волны и перемещающихся зарядов называют в оптике поверхностным плазмон-поляритоном (ППП)

Как указывалось выше, исследования ППП в терагерцовой области **находятся пока на стадии скорее фундаментальных исследований, чем развития реальных технологий.**

При выполнении научного проекта были проведены исследования, необходимые для разработки методов, имеющих прикладное значение, а именно:

- - изучены свойства поверхностных электромагнитных волн, определяющие подходы к их захвату и транспортировке, обращая особое внимание на их характеристики в терагерцовом диапазоне.
- Установлены основные свойства и дисперсионные характеристики ПЭВ на плоской границе раздела.
- рассмотрены характеристики ПЭВ на границе металл-диэлектрик
- выведена общая формула для определения толщины скин-слоя в металле δ , для случая нормального скин-эффекта и для области релаксации и на основе полученной формулы определена длина продольного затухания волны и характерная «толщина» ПЭВ в металле и диэлектрике.
- Создан макетный образец НПВО спектрометра, основанного на использовании поверхностных плазмон-поляритонов. В экспериментах было показано, что такой спектрометр чувствителен к наличию на поверхности металла пленок толщиной до 0.1 мкм, что в тысячу раз меньше использовавшейся в экспериментах длины волны излучения.
- Разработаны методики исследования свойств поверхностей и тонких пленок. Поданы заявки на изобретения: № 2012107059 от 27.02.2012. «Способ определения набега фазы монохроматической поверхностной электромагнитной волны инфракрасного диапазона»; №2012108258, от 05.03.2012, «Способ определения глубины проникновения поля терагерцовых поверхностных плазмонов в окружающую среду»; № 2012107166 от 27.02.2012, «Способ управления спектром пучка широкополосного терагерцового излучения»; № № 2012128079 от 03.07.2012, «Способ измерения длины распространения инфракрасных плазмонов по реальной поверхности»

Терагерцовый диапазон, к которому условно относятся частоты от одного до десяти терагерц, соответствует по длинам волн диапазону 30–300 мкм. В оптике эту область спектра называют также дальним инфракрасным (ДИК) диапазоном. Он очень мало исследовался в течение многих лет из-за отсутствия источников и детекторов излучения.

Поиск в патентных базах выявил небольшой объем патентных документов, непосредственно относящихся к устройствам и технологиям с использованием ППП в терагерцовом диапазоне.

В первых ПП спектрометрах ИК-диапазона использовался **дискретно перестраиваемый лазерный источник излучения** и разнесенные вдоль трека ПП элементы прямого и обратного преобразования объемной волны в поверхностную. С помощью таких устройств непосредственно измеряли длину распространения ПП в определенном диапазоне длин волн. Основной недостаток таких ПП-спектрометров - дискретность рабочих частот и недостаточность объема информации, получаемого в результате измерений (только длины распространения ПП).

Использование в ПП-спектоскопии **плавно перестраиваемых по частоте лазеров на свободных электронах** позволило преодолеть первый из перечисленных выше недостатков. А применение интерференционной методики определения фазовой скорости ПП повысило информативность метода ПП-спектоскопии, поскольку появилась возможность по длине распространения и показателю преломления ПП рассчитать, путем решения дисперсионного уравнения ПП для трехслойной структуры, два параметра переходного слоя, например, - его толщину и показатель преломления, или комплексную диэлектрическую проницаемость материала образца.

Использование в качестве источника излучения перестраиваемого по частоте лазера на свободных электронах осуществлено в изобретениях:

Патент РФ 2318192 от 09.06.2006. Патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) (RU)

Плазмонный спектрометр терагерцового диапазона для исследования проводящей поверхности

Спектрометр содержит перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения с отличной от нуля р-составляющей, а также регулируемый поглотитель излучения реперного пучка. Исследуемая поверхность образца выполнена двухгранной, причем элемент преобразования объемного излучения в поверхностный плазмон (ПП) размещен на одной, а элемент преобразования ПП в объемное излучение - на другой грани этой поверхности, ребро же, образованное обеими гранями, скруглено и имеет радиус закругления, не менее чем на порядок превышающий длину волны излучения. Элементом преобразования ПП в объемное излучение служит дополнительное плоское зеркало, примыкающее боковой гранью к поверхности образца, ориентированное наклонно к ней, сопряженное со вторым лучеразделителем и перемещаемое вместе с ним вдоль поверхности образца. Техническим результатом изобретения является повышение точности определения комплексного показателя преломления ПП.

Патентная заявка US2009206263 (A1) — 2009-08-20, изобретатель(и): RAHMAN ANIS [US] Спектроскопия терагерцового временного и частотного домена (области)

Терагерцовый спектрометр имеет терагерцовый источник с широким спектром излучения, высоким временным разрешением сканирования (<0.0099 мкм или ~ 0.3 пс) в более широком диапазоне сканирования (до ~ 100 пс). Область применения спектрометра – в биомедицинских, биологических, фармацевтических областях, а так же в области безопасности.

2.1 Методы формирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в терагерцовом диапазоне

Свободное излучение, падающее на поверхность проводника, не может непосредственно создать поверхностный плазмон-поляритон. Захват свободной электромагнитной волны для формирования ППП осуществляют:

- а) методами, основанными на ограничении волнового фронта (в том числе путем дифракции волны на препятствии), используя специальные устройства;
- б) либо путем туннелирования фотона в схеме нарушенного полного внутреннего отражения – НПВО;

а) формирование поверхностных плазмон-поляритонов путем ограничении волнового фронта

WO2007085913 (A2) — 2007-08-02

Заявитель(и): INST OF PHOTONICS AND ELECTRON [CZ]; HOMOLA JIRI [CZ]; TELEZHNIKOVA OLGA [CZ]; DOSTALEK JAKUB [CZ]

Метод спектроскопии поверхностных плазмонов, состоящий в том, что электромагнитная волна падает на дифракционную решетку, на которой возбуждаются поверхностные плазмоны, и дисперсия волнового спектра электромагнитных волн одновременно осуществляется через дифракцию. Измеряются изменения интенсивности в волновом спектре электромагнитного излучения вследствие возбуждения поверхностных плазмонов. Спектроскопия поверхностных плазмонов может одновременно выполняться минимум на двух дифракционных решетках или разных областях одной дифракционной решетки с использованием по меньшей мере двух электромагнитных волн или различными частями одной электромагнитной волны. Электромагнитная волна может выделяться как минимум из двух монохроматических или одного полихроматического источника электромагнитного излучения. Характеристики электромагнитного излучения, разложенного вследствие дифракции по волнам, обычно детектируется на двух различных приемниках, линейном массиве приемников или двумерном массиве детекторов. Чувствительный элемент (1) многоканального датчика SPR охватывает одну или несколько дифракционных решеток,

которые полностью или частично покрыты металлическим слоем (7) для возбуждения поверхностных плазмонов (2). По крайней мере, одна чувствительная область (12) чувствительного элемента (1) полностью или частично покрыта слоем, содержащим выбранные молекулы, для изучения этих молекул и их взаимодействий или для обнаружения химических или биологических веществ.

б) формирование поверхностных плазмон-поляритонов путем использования НПВО

EP 2015054 от 2009-01.14, заявитель(и): AISIN SEIKI [JP]

Терагерцовый спектрометр отражающего типа и метод спектроскопии

Изобретение представляет собой терагерцовый спектрометр, работающий во временном домене (time domain spectrometer), используя элемент внутреннего отражения. В одном варианте элемент внутреннего отражения представляет собой равнобедренную призму с углом при вершине 130 градусов, изготовленную из политетрафторэтилена (показатель преломления $n = 1,45$). Сторона, противоположная углу при данной вершине, является плоской границей раздела (21) между призмой (2) и окружающим воздухом (показатель преломления $n_0 = 1.0$) и находится между входным оптическим путем и выходным оптическим путем так, что терагерцовые волны, падающие на одну грань, выходят через другую (22'). Терагерцовые волны падают на сторону (22) в направлении, параллельном плоской границе раздела (21).

GB2435509 (A) от 2007-08-29, Заявитель(и): TERAVIEW LTD [GB]

Метод импульсной терагерцовой спектроскопии

Метод исследования объекта включает в себя этапы облучения объекта оптически сгенерированными импульсами электромагнитного излучения, упомянутый импульс состоит из множества частот в диапазоне от 100 ГГц до 100 ТГц и детектирования излучения прошедшего и/или отраженного от первой точки, находящейся на поверхности или внутри объекта, для получения сигнала во временном домене там, где облучаемый импульс излучения фокусируется на второй точке на поверхности или внутри объекта таким образом, что диффузный терагерцовый пучок тестирует объект. Предложена аппаратура, которая предназначена для исследования объекта посредством облучения множества точек на объекте и объединения сигналов от каждой из точек для получения общего сигнала для объекта во временной области, усредненного по множеству пунктов. Так же предложен метод разделения на части регистрируемого излучения, которое соответствует непосредственно переданному или отраженному излучению и применения преобразования Фурье к оставшейся части регистрируемого излучения.

3. Методы исследования тонких слоев и их поверхностей с использованием плазмон поляритонной спектроскопии

На измерении параметров поверхностных электромагнитных волн таких как: пробег волны до затухания в направлении распространения, фазовая скорость, показатель преломления ПП, дисперсионные характеристики ПЭВ на плоской границе раздела, на границе металл-диэлектрик, основываются методы исследования тонких пленок на металлических и полупроводниковых поверхностях, переходного слоя и контроля качества поверхности таких тел, а также биологических объектов.

Патентом РФ 2345351, от 27.06.2007, Патентообладатель (РУДН) (RU) , защищено устройство для получения спектров поглощения тонких слоев в терагерцовой области спектра позволяющее определить спектры поглощения как самой поверхности металлов и полупроводников, так и ее переходного слоя **путем измерения длины распространения поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ)**, направляемых этой поверхностью, в терагерцовой области спектра

Устройство содержит плавно перестраиваемый по частоте источник лазерного излучения, твердотельный образец с плоской поверхностью и исследуемым слоем на ней, элемент преобразования объемного излучения (ОИ) в поверхностную электромагнитную волну (ПЭВ) и обратно, фотоприемное устройство, преобразующее ОИ в электрический сигнал, и блок обработки результатов измерений, элемент преобразования ОИ в ПЭВ и обратно выполнен как одно целое в виде прозрачной плоскопараллельной пластины со скошенным торцом, причем пластина своей гранью, обращенной к образцу, расположена в поле ПЭВ параллельно поверхности образца на расстоянии от нее не меньше 10λ , где λ – длина волны излучения в вакууме, и имеет длину вдоль трека ПЭВ не менее длины распространения ПЭВ, а фотоприемное устройство выполнено в виде линейки фотодетекторов и размещено на верхней грани пластины.

Заявка на изобретение **DE19905757** (A1) от — 1999-11-04, заявитель(и): BIOTUL BIO INSTR GMBH [DE] подана на преобразователь, предназначенный для определения поверхностных плазмонных резонансов, используя слои, модифицированные по пространству или во времени для спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса.

Преобразователь имеет поверхность, поддерживающую поверхностно плазмонный резонанс, свойства которой, по крайней мере, одной соседней области спроектированы или варьируются таким образом, что поверхностно плазмонный резонанс может быть измерен посредством определения с пространственным или временным **разрешением интенсивности излучения, отраженного от поверхности**. Прилегающая область размером до 5 мкм от поверхности поддерживает поверхностный плазмонный резонанс.

JP2008304444 (A) — 2008-12-18, Заявитель(и): UNIV TOHOKU; NISHIZAWA JUNICHI

Спектрометрия нарушенного полного отражения и устройство на терагерцовой частоте

Решаемая задача: выполнить терагерцовую спектроскопию и устройство, которым можно измерить спектр образцов, существующих около призмы, для полностью отраженных электромагнитных терагерцовых волн и границы раздела образца, и **комплексный показатель преломления образца**, даже в терагерцовой области.

РЕШЕНИЕ: спектрометрия **нарушенного полного внутреннего отражения** и устройство на терагерцовой частоте с использованием поверхностной волны (неоднородной волны), имеющая место при терагерцовых частотах, когда терагерцовая электромагнитная волна полностью отражается. Это устройство состоит из светового источника света электромагнитных терагерцовых волн, который излучает пучок накачки двух возбуждающих лазеров и сигнальный пучок в оптический кристалл для генерации терагерцовой электромагнитной волны и генерируемую терагерцовую электромагнитную волну и призму для получения электромагнитных терагерцовых волн и создания неоднородных волн.

К исследованиям биологических объектов относятся:

Заявка **WO02055993 (A2)** — 2002-07-18, Заявитель(и): UNIV BOSTON [US]; GEORGIADIS ROSINA M [US].

Использование электростатического поля для увеличения чувствительности спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса. Спектроскопия оптического поверхностного плазмонного резонанса *in-situ* может быть использована для мониторинга гибридизации кинетики немеченого ДНК в пленках монослойных нуклеиновых кислот на золоте в присутствии приложенного электростатического поля. Это поле может усилить или замедлить гибридизацию и может денатурировать ДНК-комплексы. Влияние электростатического поля на объекты исследуется с помощью поверхностного плазмонного резонанса, то есть с помощью *label-free* оптического метода.

Заявка CN101556248 (A) — 2009-10-14, заявитель CHANGCHUN APPLIED CHEMISTRY [CN].

Изобретение относится к способу определения временного разрешения спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса, используемым инструментом является инструмент для измерения *in-situ* временного разрешения поверхностного плазмонного резонанса, и две световые ячейки с расстоянием между ними всего 0.1-0.5 мм используются в качестве двухканального детектора интенсивности света в ППР инструменте для определения изменения ППР угла со временем. Время отклика может достигать 30 наносекунд, стабильность может достигать 0.5 промиллей. Поскольку соединение небольших молекул с фиксированным антителом на золотом чипе является очень быстрым процессом, обычными

способами нельзя осуществить динамики всего процесса соединения. Данный метод может осуществить быстрое детектирование изменения значения угла поверхностного плазмонного резонанса, что делает возможным получение динамической информации о соединении малых молекул с антителами. Способ идентификации объектов этим способом является динамическим процессом взаимной идентификации небольших молекул с соответствующими им антителами.

4. Заключение

В основу патентных исследований положен патентный поиск по электронным базам данных патентных документов патентных ведомств РФ, США и Европейского союза, база данных последнего содержит патентные документы большинства стран мира, включая Японию и Китай.

По результатам патентного поиска можно сделать заключение о наличии небольшого объема патентования техники и технологий терагерцовой спектроскопии с использованием поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) в Российской Федерации и значительно большем объеме патентования в странах зарубежья, причем в последнем случае заметен всплеск патентования в последнее десятилетие.

Возросший интерес к терагерцовой спектроскопии может быть объяснен тем, что использование излучения видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов возможно только для веществ, у которых резонансные или характерные энергии (частоты) процессов лежат в диапазоне 1 – 10 эВ. У многих же веществ и многоатомных молекул эти энергии соответствуют 0.01 – 0.1 эВ, то есть терагерцовой (или дальней инфракрасной) области спектра. Таким образом, открывается возможность создания новых оригинальных более совершенных образцов измерительной техники и методов исследования веществ в малоизученных областях электромагнитного спектра, поскольку они позволяют получить качественно новые результаты.

Препятствием к исследованию материалов в терагерцовом диапазоне было отсутствие соответствующих источников и детекторов излучения.

Запущенный в эксплуатацию в 2004 году лазер на свободных электронах (ЛСЭ), созданный в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), который генерирует монохроматическое излучение и способен перестраивать частоту генерации в широких пределах практически по всему терагерцовому спектру, сразу стал самым мощным источником терагерцового излучения в мире, что значительно продвинуло возможности исследований в области терагерцовой спектроскопии.

Данный лазер использован в разработанном при выполнении настоящего научного проекта макетном образце ППП спектрометра для монохроматического излучения,

перестраиваемого в диапазоне длин волн 30 – 240 мкм при мощности падающего излучения до 100 Вт, что обеспечивает условия выполнения корректных экспериментов. В экспериментах было показано, что такой спектрометр чувствителен к наличию на поверхности металла пленок толщиной до 0.1 мкм, что в тысячу раз меньше использовавшейся в экспериментах длины волны излучения. Иными словами, эта техника может считаться поверхностной микроскопией. Объектами исследования ППП спектрометра могут быть достаточно протяженные однородные пленки.

Опробованы четыре детектирующие системы. Показано, что наиболее подходящими для данного случая детекторами являются матричный микроболометрический приемник, акустооптический детектор или криогенный болометр на основе сверхпроводника (болометр с горячими электронами – НЕВ).

Созданный ППП спектрометр несомненно по своим измерительным возможностям и качеству измерений превосходит имеющийся уровень техники, но имеет классическую схему и его расширенные функции и высокое качество измерений достигнуты за счет использования известных технических решений, заявка на изобретение не подавалась. Однако были разработаны методы исследований на данном спектрометре и поданы заявки на изобретения:

1. № 2012107059 от 27.02.2012, «Способ определения набега фазы монохроматической поверхностной электромагнитной волны инфракрасного диапазона». Изобретение может быть использовано в физико-химических исследованиях динамики роста переходного слоя поверхности. В технологических процессах для контроля толщины и однородности тонкослойных покрытий металлизированных изделий и полупроводниковых подложек. А также – в сенсорных устройствах.
2. №2012108258, от 05.03.2012, «Способ определения глубины проникновения поля терагерцовых поверхностных плазмонов в окружающую среду». Изобретение может найти применение в технологических процессах для контроля толщины и однородности тонкослойных покрытий металлизированных изделий и полупроводниковых подложек, в методах по обнаружению неоднородностей (на) проводящей поверхности, в инфракрасной (ИК) рефрактометрии металлов для определения их диэлектрической проницаемости, в ИК сенсорных устройствах и контрольно-измерительной технике.
3. № 2012107166 от 27.02.2012, «Способ управления спектром пучка широкополосного терагерцового излучения». Изобретение может найти применение в установках, содержащих широкополосные источники ТГц-излучения (нагретое тело, синхротрон, импульсные лазеры), в ТГц плазмонной и фурье-спектроскопии проводящей поверхности и тонких слоёв на ней, в перестраиваемых фильтрах ТГц излучения. Технический

результат изобретения направлен на обеспечение возможности оперативного управления амплитудно-частотным спектром пучка во всём ТГц диапазоне.

4. № 2012128079 от 03.07.2012, «Способ измерения длины распространения инфракрасных плазмонов по реальной поверхности». Изобретение относится - к определению спектров поглощения, как самой поверхности, так и её переходного слоя путём измерения длины распространения поверхностных плазмонов, направляемых этой поверхностью, в инфракрасной (ИК) области спектра и может найти применение в исследованиях физико-химических процессов на поверхности твёрдого тела, в ИК-спектроскопии окисных и адсорбированных слоёв, в контрольно-измерительной технике, в лазерной и интегральной оптике.

Общий анализ результатов настоящего проекта показывает, что в процессе его выполнения заложены физические основы плазменной спектроскопии в терагерцовом диапазоне с использованием монохроматического перестраиваемого по частоте источника излучения, в качестве которого в данной работе использован лазер на свободных электронах (ЛСЭ), созданы макетные образцы спектрометров для исследования поверхностей – как чистых, так и покрытых слоями материалов и субстанций различной природы, проведены исследования распространения плазмонов по различным образцам.

По результатам научной работы поданы заявки на изобретения. Идентичных и эквивалентных технических решений в известном уровне техники не выявлено, что позволяет предположить их патентоспособность.

Проведенные патентные исследования можно считать достаточными.

ЗАДАНИЕ № 1

на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы) Плазмонная спектроскопия материалов, микро- и наночастиц и биологических объектов в терагерцовом диапазоне

Шифр работы (темы) Г.К.№ 02.740.11.0556

Этап работы – шестой сроки его выполнения: 01.08.2012– 01 10 2012

Задачи патентных исследований: поиск и анализ патентной документации в области плазмонной спектроскопии в терагерцовом диапазоне с целью определения направлений развития техники и оценка патентоспособности полученных результатов НИР

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители	Ответственные исполнители (ФИО)	Сроки выполнения (начало-окончание)	Отчетные документы
<p>Вид исследования: исследование технического уровня и анализ тенденций развития в исследуемой области. Оценка патентоспособности полученных результатов НИР</p> <p>Метод проведения исследований: Поиск по ключевым словам и по классам МПК. -в бюллетене патентного ведомства РФ -в электронных патентных базах данных РФ; -в электронных патентных зарубежных базах данных.</p>	<p>Лаборатория прикладной электродинамики (ЛПЭ) НИЧ НГУ Отдел по защите интеллектуальной собственности (ИС) НГУ</p>	<p>Б.А. Князев</p> <p>Беляева Н. А. Шмойлова Н.Н.</p>	<p>01.08.2012- 31.08.2012</p>	<p>Отчет по ГОСТ Р 15.011-96</p>

Зав отделом по защите ИС НГУ _____ Беляева Н.А. _____

Руководитель подразделения исполнителя _____ Б.А. Князев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Регламент поиска № 1.1
От 01августа 2012 года

Наименование работы (темы) «Плазмонная спектроскопия материалов, микро- и наночастиц и биологических объектов в терагерцовом диапазоне»

Номер и дата утверждения задания _31.08. 2012

Этап работы –шестой

Цель поиска информации: поиск патентных документов для анализа технического уровня и направлений развития в исследуемой области, отбор материалов, представляющих интерес для выполнения работы и определения патентоспособности результатов НИР

Обоснование регламента поиска: Регламент поиска задан целями поиска и сроками выполнения шестого этапа выполнения НИР. Глубина поиска определена временем активного развития исследований в данной области.

Начало поиска 01.08.2012- **окончание** – 31.08.2012

Предмет поиска (объект исследования, его составные части, товар)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск				Ретроспективность	Наименование информационной базы (фонда)		
		патентные		НТИ*					
		Наименование	Классификационные рубрики: МПК (МКИ)*, МКПО*, НКИ* и другие	Наименование	Рубрики УДК* и другие				
1	2	3	4	5	6	7	8		
Способы и устройства в области терагерцовой спектроскопии	RU	Рефераты и полные описания к патентам, опубликованные заявки	G01R27/26 G01J3/42 G01N21/35 G01N21/41 G02B27/10 G01N21/43 G01N21/39	-	-	Патентная документация РФ 1978-2012	Реферативная и полнотекстовая базы ФИПС http://www.fips.ru		
	US							Патентная документация США 1978-2012	База патентных документов US http://www.uspto.gov/
	JP							Патентная документация стран EP и мира 1978-2012	Мировая база WordWide Database http://ep.espacenet.com
	Страны EP								
	CN								
JP									

Руководитель подразделения исполнителя

Б.А. Князев

Зав отделом управления ИС

Н.А. Беляева

Приложение В.

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием проректора по научной работе НГУ С.В.

Нетесова № 1 от 01 августа 2012 г. и Регламентом поиска № 1.1 от 01 августа 2012 г.

В.2 Этап работы – шестой.

В.3 Начало поиска 01 августа 2012 года. Окончание поиска 31 августа 2012 года.

В.4 Поиск выполнен в соответствии с регламентом поиска.

В.5 Поиск и патентные исследования могут считаться достаточными и проведение дальнейших патентных исследований не целесообразно.

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа.

Т а б л и ц а В.6.1 – Патентная документация

<u>Предмет поиска (объект исследования, его составные части)</u>	<u>Страна выдачи, вид и номер охранного документа.</u>	<u>Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет</u>	<u>Название изобретения</u>	<u>Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты).</u>
<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
<u>Способы и устройства в области терагерцовой спектроскопии</u>	<u>Россия Патент № 2411467</u>	<u>Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) (RU) Заявка: 2010108909/28 от 11.03.2010</u>	<u>СПОСОБ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ ВОЛНУ</u>	<u>Действует</u>
	<u>Россия Патент № 2352969</u>	<u>Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) (RU) Заявка: 2007126492/28 от 12.07.2007</u>	<u>СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ И ОБЪЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА</u>	<u>Действует</u>
	<u>Россия Патент № 2345351</u>	<u>Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) (RU) Заявка: 2007123801/28 от 27.06.2007</u>	<u>УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ В ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА</u>	<u>Действует</u>
	<u>Россия Патент № 2318192</u>	<u>Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) (RU) Заявка: 2006120282/28 от 09.06.2006</u>	<u>ПЛАЗМОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ</u>	<u>прекратил действие</u>

<u>Предмет поиска (объект исследования, его составные части)</u>	<u>Страна выдачи, вид и номер охранного документа.</u>	<u>Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет</u>	<u>Название изобретения</u>	<u>Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)</u>
1	2	3	4	5
<u>Способы и устройства в области терагерцовой спектроскопии</u>	Россия <u>Патент № 2263923</u>	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) (RU) <u>Заявка: 2004108093/28 от 22.03.2004</u>	<u>СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА</u>	<u>прекратил действие</u>
	<u>United States Patent US7583882</u>	UNIVERSITY OF ALABAMA IN HUNTSVILLE [US] <u>Заявка US2008112713 от 2006-11-10</u>		
	<u>United States Patent US7394962</u>	SAMSUNG ELECTRO MECH [KR] <u>Заявка US2007196065 от 2006-02-20</u>	<u>OPTICAL WAVEGUIDE FOR TRANSMITTING SURFACE PLASMON-POLARITON WAVE</u>	
	<u>United States Patent US6466323</u>	WESTINGHOUSE SAVANNAH RIVER CO [US] <u>Заявка US19990447155 от 1999-11-23</u>	<u>Surface plasmon resonance spectroscopy sensor and methods for using same</u>	
	<u>United States Patent US6408123</u>	CANON KK [JP] <u>Заявка US20000708587 от 2000-11-09</u> JP19990321445 1999-11-11	<u>NEAR-FIELD OPTICAL PROBE HAVING SURFACE PLASMON POLARITON WAVEGUIDE AND METHOD OF PREPARING THE SAME AS WELL AS MICROSCOPE, RECORDING/REGENERATION APPARATUS AND MICRO-FABRICATION APPARATUS USING THE SAME</u>	
		AISIN SEIKI [JP] <u>Заявка EP 2015054</u> <u>Дата приоритета: 2003-05-29</u>	<u>Reflection-type terahertz spectrometer and spectrometric method</u>	
		FDK CORP. [JP] <u>Заявка JP2008176209 от 2007-01-22</u>	<u>OPTICAL COUPLING DEVICE BY SURFACE PLASMON</u>	
		KARUBE MASAO AKIMOTO TAKAHISA (JP) <u>Заявка JP 2004170286</u> <u>Дата приоритета: 2002-11-21</u>	<u>DIFFERENTIAL SPR SENSOR USING MONOCHROMATIC LIGHT AND MEASURING METHOD USING THE SAME</u>	
		CANON KK [JP] OUCHI TOSHINIKO [JP] <u>Заявка WO2012096398</u> <u>Дата приоритета: 2011-01-14</u>	<u>TERAHERTZ-WAVE ELEMENT, TERAHERTZ-WAVE DETECTING DEVICE, TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY SYSTEM, AND TOMOGRAPHY APPARATUS</u>	
		CHANGCHUN APPLIED CHEMISTRY [CN] <u>Заявка CN101556248</u> <u>Дата приоритета: 2009-05-18</u>	<u>Method for detecting time resolution of surface plasmon resonance spectroscopy</u>	

<u>Предмет поиска (объект исследования, его составные части)</u>	<u>Страна выдачи, вид и номер охранного документа.</u>	<u>Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет</u>	<u>Название изобретения</u>	<u>Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)</u>
1	2	3	4	5
<u>Способы и устройства в области терагерцовой спектроскопии</u>		<u>MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY [US]</u> <u>Заявка US2012008140</u> <u>Дата приоритета: 2010-01-29</u>	<u>Terahertz Sensing System and Method</u>	
		<u>INST OF PHOTONICS AND ELECTRON [CZ]</u> <u>HOMOLA JIRI [CZ]</u> <u>Заявка WO2007085913</u> <u>Дата приоритета: 2005-01-12</u>	<u>METHOD FOR SPECTROSCOPY OF SURFACE PLASMONS IN SURFACE PLASMON RESONANCE SENSORS AND ELEMENT FOR THE USE OF THEREOF</u>	
		<u>UNIV AUGSBURG [DE]</u> <u>Заявка DE102007021563</u> <u>Дата приоритета: 2007-05-08</u>	<u>Surface plasmon resonance spectrometer, has sensor film arranged on transparent substrate for radiation, where radiation source is attached in layer construction on transparent substrate, and sensor film controls radiation from source</u>	
		<u>RAHMAN ANIS [US]</u> <u>Заявка US2009206263</u> <u>Дата приоритета: 2007-09-27</u>	<u>Terahertz time domain and frequency domain spectroscopy</u>	
		<u>KONINKL PHILIPS ELECTRONICS NV [NL]</u> <u>PHILIPS INTELLECTUAL PROPERTY [DE]</u> <u>Заявка WO2011098943 от 2010-02-15</u>	<u>DEVICE FOR ANALYZING A SAMPLE USING RADIATION IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE</u>	
		<u>CANON KK [JP]</u> <u>OUCHI TOSHIHIKO [JP]</u> <u>WO2011152542</u> <u>Дата приоритета: 2010-06-03</u>	<u>TERAHERTZ WAVE GENERATION ELEMENT, TERAHERTZ WAVE DETECTION ELEMENT, AND TERAHERTZ TIME DOMAIN SPECTROSCOPE DEVICE</u>	
		<u>UNIV CAPITAL NORMAL</u> <u>Заявка CN201662531</u> <u>Дата приоритета: 2010-01-14</u>	<u>Small-sized Terahertz time-domain spectrograph</u>	
		<u>TERAVIEW LTD [GB]</u> <u>Заявка GB2435509</u> <u>Дата приоритета: 2004-08-26</u>	<u>Terahertz pulsed spectroscopy method</u>	
		<u>UNIV TOHOKU NISHIZAWA JUNICHI [JP]</u> <u>Заявка JP2008304444</u> <u>Дата приоритета: 2007-06-11</u>	<u>ATTENUATED TOTAL REFLECTION SPECTROMETRY AND DEVICE AT TERAHERTZ FREQUENCY</u>	
		<u>IWATE PREFECTURAL UNIV [JP]</u> <u>Заявка JP2009019925</u> <u>Дата приоритета: 2007-07-10</u>	<u>SPECTROMETRIC SAMPLE, SPECTROMETRIC SUBSTRATE, AND SPECTROMETRY METHOD</u>	

<u>Предмет поиска (объект исследования, его составные части)</u>	<u>Страна выдачи, вид и номер охранного документа.</u>	<u>Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет</u>	<u>Название изобретения</u>	<u>Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)</u>
1	2	3	4	5
<u>Способы и устройства в области терагерцовой спектроскопии</u>		<u>HIROMOTO YOSHINISA [JP] Заявка JP2011053195</u> <u>Дата приоритета: 2009-08-31</u>	<u>METHOD FOR MEASUREMENT BY TERAHERTZ TIME DOMAIN SPECTROSCOPIC APPARATUS, AND DATA ANALYSIS METHOD</u>	
		<u>CANON KK [JP]</u> <u>Заявка JP2011203718</u> <u>Дата приоритета: 2010-03-04</u>	<u>TERAHERTZ-WAVE GENERATING ELEMENT, TERAHERTZ-WAVE DETECTING ELEMENT, AND TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY DEVICE</u>	
		<u>SAMSUNG ELECTRO MECH [KR]</u> <u>Заявка KR20070083186 от 2006-02-20</u>	<u>OPTICAL WAVEGUIDE FOR TRANSMITTING SURFACE PLASMON POLARITON</u>	
		<u>UNIV BOSTON [US]</u> <u>GEORGIADIS ROSINA M [US] Заявка WO02055993</u> <u>Дата приоритета: 2001-01-12</u>	<u>USE OF ELECTROSTATIC FIELDS TO ENHANCE SURFACE PLASMON RESONANCE SPECTROSCOPY</u>	
		<u>ARRAY BIOSCIENCE CORP [US]</u> <u>Заявка WO03027619</u> <u>Дата приоритета: 2001-09-21</u>	<u>DEVICES AND METHODS FOR VERIFYING MEASUREMENT OF ANALYTES BY RAMAN SPECTROSCOPY AND SURFACE PLASMON RESONANCE</u>	
		<u>SONOPRESS GMBH [DE]</u> <u>STEINBRECHT BENNO</u> <u>Заявка WO2011039031</u> <u>Дата приоритета: 2009-10-01</u>	<u>MESH STRUCTURE FOR SURFACE PLASMON RESONANCE SPECTROSCOPY</u>	
		<u>ZYVEX CORP [US]</u> <u>Заявка WO02090949 от 2001-05-10</u>	<u>SYSTEM AND METHOD FOR CONTROLLING DEPOSITION PARAMETERS IN PRODUCING A SURFACE TO TUNE THE SURFACE'S PLASMON RESONANCE WAVELENGTH</u>	

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЗАЯВКИ НА ПАТЕНТЫ, ПОДАННЫЕ В 2012 ГОДУ

Заявка №2012107059 от 27.02.2012. Способ определения набега фазы монохроматической поверхностной электромагнитной волны инфракрасного диапазона

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ определения набега фазы монохроматической поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) инфракрасного диапазона, включающий генерацию ПЭВ излучением источника, регистрацию интерферограмм, формируемых в результате взаимодействия излучения опорного пучка и измерительного пучка, порождённого ПЭВ, пробегающей различные расстояния участка её трека, и расчёт величины набега фазы $\Delta\varphi$ по результатам измерений, *отличающийся* тем, что регистрацию интерферограмм осуществляют только при пробеге ПЭВ расстояний, соответствующих крайним точкам участка, излучение источника выбирают широкополосным и содержащим гармоническую составляющую с волновым числом σ , равным волновому числу контролируемой ПЭВ, генерацию ПЭВ осуществляют во всём спектральном диапазоне источника, а расчёт производят с учётом зависимости $\Delta\varphi(\sigma)$, получаемой в результате применения к интерферограммам полного фурье-преобразования.

Авторы:

/Кириянов А.П./

/Князев Б.А./

/Никитин А.К./

/Хитров О.В./

Изобретение относится к оптическим методам контроля проводящей поверхности в инфракрасном (ИК) излучении, и может быть использовано в физико-химических исследованиях динамики роста переходного слоя поверхности, в технологических процессах для контроля толщины и однородности тонкослойных покрытий металлизированных изделий и полупроводниковых подложек, а также – в сенсорных устройствах.

При исследовании проводящей поверхности с помощью поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) измеряемой величиной может являться не только длина распространения ПЭВ, связанная с её показателем поглощения k'' , но и фазовая скорость, определяемая показателем преломления ПЭВ k' и измеряемая интерферометрическим методом [Bogomolov G.D., Jeong U.Y., Zhizhin G.N., Nikitin A.K., Zavialov V.V., Kazakevich

G.M., Lee B.C. Generation of surface electromagnetic waves in terahertz spectral range by free-electron laser radiation and their refractive index determination, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (A), 2005, v.543, No.1, p.96-101]. Здесь κ' и κ'' - действительная и мнимая части комплексного показателя преломления ПЭВ $\kappa = \kappa' + i \cdot \kappa''$. В случае экспериментального определения как κ'' , так и κ' , становится возможным рассчитать либо диэлектрическую проницаемость материала подложки, направляющей ПЭВ, либо эффективные значения оптических постоянных переходного слоя [Gerasimov V. V., Knyazev B. A., Nikitin A. K. and Zhizhin G. N. A way to determine the permittivity of metallized surfaces at terahertz frequencies, Applied Physics Letters, 2011, v.98, 171912]. Применение же плавно перестраиваемого по частоте источника излучения (например, лазера на свободных электронах) позволяет выполнять дисперсионную спектроскопию поверхности и её переходного слоя.

Наиболее точное определение показателя преломления ПЭВ κ' возможно путём измерения набега фазы ПЭВ $\Delta\varphi$ на участке трека поверхностной волны. При этом значения κ' и $\Delta\varphi$ связаны соотношением:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot (\kappa' - n_{\text{среды}}) \cdot \Delta a,$$

где λ - длина волны излучения, $n_{\text{среды}}$ - показатель преломления окружающей среды, Δa - длина контролируемого участка, пробегаемого ПЭВ.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому способу является способ определения набега фазы монохроматической ПЭВ ИК диапазона, включающий генерацию ПЭВ излучением источника, регистрацию результирующей интенсивности (интерферограммы) при взаимодействии излучения опорного пучка и измерительного пучка, порождённого ПЭВ, пробегающей плавно изменяемое в пределах участка протяжённостью Δa расстояние, и расчёт величины набега фазы $\Delta\varphi$ по результатам измерений [Nikitin A.K., Khitrov O.V., Kyrianov A.P., Knyazev B.A., Zhizhin G.N. Surface plasmon dispersive spectroscopy of thin films at terahertz frequencies, Proc. SPIE, 2010, v.7376, Art.7376 0U]. Основным недостатком известного способа является большая продолжительность измерений, обусловленная необходимостью регистрации интенсивности интерферирующих пучков при большом множестве длин пробега ПЭВ в пределах контролируемого участка с целью обеспечения однозначности определения величины $\Delta\varphi$.

Техническим результатом, на достижение которого направлено изобретение, является сокращение времени измерений при обеспечении однозначности определения набега фазы $\Delta\varphi$ монохроматической ПЭВ.

Технический результат достигается тем, что в известном способе определения набега фазы монохроматической ПЭВ ИК диапазона, включающем генерацию ПЭВ излучением

источника, регистрацию интерферограмм, формируемых в результате взаимодействия излучения опорного пучка и измерительного пучка, порождённого ПЭВ, пробегающей различные расстояния на контролируемом участке трека, и расчёт величины набега фазы $\Delta\varphi$ по результатам измерений, регистрацию интерферограмм осуществляют только при пробеге ПЭВ расстояний, соответствующих крайним точкам участка, излучение источника выбирают широкополосным и содержащим гармоническую составляющую с волновым числом σ , равным волновому числу контролируемой ПЭВ, генерацию ПЭВ осуществляют во всём спектральном диапазоне источника, а расчёт производят с учётом зависимости $\Delta\varphi(\sigma)$, получаемой в результате применения к интерферограммам полного фурье-преобразования.

Сокращение времени измерений достигается в результате необходимости регистрации интерферограмм только при двух расстояниях пробега ПЭВ (вместо большого множества, как в способе-прототипе). При этом неоднозначность определения набега фазы $\Delta\varphi$ исключают путём учёта целого числа π в приращении фазы контролируемой ПЭВ на наблюдаемом участке трека по зависимости $\Delta\varphi(\sigma)$, получаемой в результате применения к обеим интерферограммам полного фурье-преобразования.

Изобретение поясняется чертежами: на рис.1 - схема устройства, реализующего способ; на рис.2 - центральная часть интерферограммы, регистрируемой в примере, иллюстрирующем применение заявляемого способа; на рис.3 - зависимости величины набега фазы ПЭВ $\Delta\varphi$ от волнового числа $\sigma = 1/\lambda$, рассчитанные для ПЭВ, генерируемых широкополосным излучением с волновым числом σ от 100 см^{-1} до 200 см^{-1} в структуре “золото – слой ZnS (1,0 мкм) - вакуум”.

Предлагаемый способ может быть реализован с использованием устройства, схема которого приведена на рис.1, где цифрами обозначены: 1 - источник p -поляризованного широкополосного излучения; 2 – светоделитель, расщепляющий пучок падающего излучения на измерительный и реперный пучки; 3 – фокусирующий объектив; 4 - элемент преобразования объёмного излучения измерительного пучка в ПП; 5 – твёрдотельный проводящий образец, имеющий две плоские смежные грани, сопряжёнными скруглённым ребром, на одной из которых размещён элемент 4, а на другой – элемент для преобразования ПП в объёмное излучение, выполненный в виде примыкающего к грани подвижного плоского зеркала 6, ориентированного перпендикулярно измерительному пучку и наклонно к грани; 7, 8 – уголкового отражатели, расположенные на пути измерительного пучка и обеспечивающие когерентность монохроматических компонент в пучках; 9 - светоделитель, совмещающий измерительный и реперный пучки, 10 – платформа, перемещаемая вдоль трека ПП и содержащая элементы 6, 7, 8 и 9; 11, 12 – уголкового отражатели, расположенные на

пути реперного пучка и обеспечивающие возможность регулировки разности оптических путей пучков; 13 – объектив, фокусирующий излучение совмещённых пучков на фотоприёмное устройство (ФПУ) 14, электрические сигналы с которого поступают на устройство обработки информации 15, способное выполнять полное фурье-преобразование интерферограммы, регистрируемой ФПУ 14 при перемещении уголкового отражателя 8.

Способ реализуется следующим образом. Широкополосное излучение источника 1, содержащее гармоническую компоненту с волновым числом σ равным волновому числу σ^* исследуемой ПЭВ, направляют на светоделитель 2, расщепляющий падающее излучение на измерительный и реперный пучки. Излучение измерительного пучка фокусируется объективом 3 на элемент 4, преобразующий излучение в набор ПЭВ с различными частотами. ПЭВ пробегают до скруглённого ребра (радиус закругления $R > 10\lambda$), образованного двумя смежными плоскими гранями образца 5, преодолевают это ребро (с некоторыми радиационными потерями) и продолжают распространяться по второй грани до элемента 6, осуществляющего обратное преобразование набора ПЭВ в объёмные волны и направляющего их на пару зеркал 7 и 8. Пройдя эти зеркала, излучение измерительного пучка поступает на светоделитель 9, размещённый вместе с зеркалами 6, 7 и 8 на платформе 10. На другую сторону светоделителя 9 поступает излучение реперного пучка, прошедшего через вторую пару зеркал 11 и 12 линии задержки. Светоделитель 9 совмещает пучки и направляет их через объектив 13 на ФПУ 14, которое регистрирует интерференционный сигнал, являющийся функцией расстояния между парой зеркал 7 и 8, изменяемого по определённому закону во времени. Совокупность этих сигналов, называемых интерферограммой, подвергается устройством 15 полному фурье-преобразованию. При этом расстояние между парой зеркал следует изменять таким образом, чтобы экстремальные значения оптической разности хода $\pm \Delta \ell_{max}$ интерферирующих пучков удовлетворяло критерию требуемого спектрального разрешения: $\delta \sigma \approx 1 / (2 \cdot |\Delta \ell_{max}|)$. Тогда число разрешаемых спектральных точек $N = \sigma_{max} / \delta \sigma$, где σ_{max} - максимальное волновое число излучения источника.

Функция автокорреляции $I_{uum}(\Delta \ell)$ (интерферограмма) пучков, зависящая от длины пробега a пучка ПЭВ, описывается выражением:

$$I_{uum}(\Delta \ell) = I_{const} + \Delta I_{uum}(\Delta \ell), \quad (1)$$

где: I_{const} – постоянное слагаемое интерферограммы, не зависящее от $\Delta \ell$; $\Delta I_{uum}(\Delta \ell)$ - интерференционный член, подвергаемый полному фурье-преобразованию и

вычисляемый по формуле:

$$\Delta I_{инт}(\Delta \ell) = 2 \int_0^{\infty} A_{0\nu}^2 \alpha_{1\nu} \alpha_{2\nu} \cdot \exp(-k_{o\nu} \kappa_{\nu}'' a) \cdot \cos\{k_{o\nu} \cdot [a \cdot (\kappa_{\nu}' - n_{\nu}) + \Delta \ell] - \varphi_{oA\nu}\} d\nu;$$

$\alpha_{1\nu}, \alpha_{2\nu}$ - модули коэффициентов преобразования объёмной волны в ПЭВ и обратно;

$A_{0\nu}^2$ - спектральная плотность излучения на входе интерферометра;

$k_{o\nu} = 2\pi\nu/c = 2\pi\sigma$ - модуль волнового вектора спектральной компоненты с частотой ν в вакууме;

$\kappa_{\nu} = \kappa_{\nu}' + i \cdot \kappa_{\nu}''$ - комплексный показатель преломления ПЭВ на частоте ν ;

$\varphi_{oA\nu}$ - начальная разность фаз пучков спектральной компоненты с частотой ν при минимальной разности оптических путей пучков, включающая в себя фазы коэффициентов преобразования.

В силу ограниченности реального спектра излучения максимальной частотой ν_{max} интеграл в формуле для расчёта $\Delta I_{инт}$ заменяется, согласно теореме отсчётов Котельникова (Лебедько Е.Г. Математические основы передачи информации / С.-Петербург: ГУИТМО, 2010. - с.63), суммой интенсивностей дискретных монохроматических компонент с частотами ν_j по точкам отсчётов $j=0, 1, 2, \dots, N$ на оси частот:

$$\Delta I_{инт}(\Delta \ell_m) = 2 \sum_{j=0}^N \left\{ \left(A_{0\nu_j}^2 \alpha_{1\nu_j} \alpha_{2\nu_j} \right)_j \cdot \exp(-k_{o\nu_j} \cdot \kappa_{\nu_j}'' \cdot a) \cdot \cos \left[k_{o\nu_j} \cdot \left[a \cdot (\kappa_{\nu_j}' - n_{\nu_j}) + \Delta \ell_m \right] - \varphi_{oA\nu_j} \right] \cdot \frac{\nu_{max}}{N} \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta \ell_m$ - m -ное значение $\Delta \ell$ ($m=0, 1, 2, \dots, N$); N - оптимальное число точек отсчётов, равное разрешающей способности фурье-спектрометра:

$$N = 2 \cdot (\Delta \ell_{max} \nu_{max}) / c, \quad (3)$$

где $|\Delta \ell_{max}|$ - максимальное смещение отражателя 8; c - скорость света в вакууме.

Применение обратного полного фурье-преобразования $\left(F^* \right)^{-1}$ к интерферограмме

$\Delta I_{инт}(\Delta \ell_m)$ позволяет найти комплексный спектр излучения на ФПУ 14, описываемый суммой косинусного C_{ν_j} и синусного S_{ν_j} фурье-преобразований интерферограммы (2):

$$\left(F^* \right)^{-1} [\Delta I_{инт}(\Delta \ell_m)] = C_{\nu_j} + i \cdot S_{\nu_j}. \quad (4)$$

Из комплексного спектра (4) можно выделить его фазовый φ_{ν_j} спектр:

$$\varphi_{\nu_j} = \text{Arctg}(S_{\nu_j}/C_{\nu_j}) = k_{o\nu_j} \cdot (\kappa_{\nu_j}' - n_{\nu_j}) \cdot a + \varphi_{oA\nu_j}, \quad (5)$$

где $Arctg(x)$ – главное значение арктангенса в диапазоне $-\pi/2 \leq x \leq \pi/2$; φ_{oAvj} – значение фазы комплексной аппаратной функции устройства на частоте ν_j .

Спектр φ_{vj} содержат, наряду с информацией о фазах гармонических ПЭВ, также и информацию о комплексной аппаратной функции прибора, модуль которой определяется амплитудными множителями $I_{0vj}, \alpha_{1vj}, \alpha_{2vj}$, а аргумент – фазовыми слагаемыми φ_{oAvj} . Вклад всех этих аппаратных параметров можно исключить, выполнив измерения при двух различных расстояниях (a_1 и a_2) пробега ПЭВ. Располагая двумя наборами спектров φ_{vj} , можно определить спектр κ'_{vj} , используя следующие соотношения:

$$\kappa'_{vj} = \frac{1}{k_{oAvj} \Delta a} \left[Arctg \left(\frac{S_{vj}}{C_{vj}} \right)_{a_2} - Arctg \left(\frac{S_{vj}}{C_{vj}} \right)_{a_1} \right] + n_{vj}, \quad (7)$$

где $\Delta a = a_2 - a_1$, а индексы a_1 и a_2 означают значения индексируемых величин при соответствующих длинах пробега ПЭВ.

В качестве примера применения заявляемого способа рассмотрим возможность определения набега фазы ПЭВ, генерируемых излучением с волновым числом $\sigma^* = 160 \text{ см}^{-1}$ в структуре “золото – слой ZnS (1,0 мкм) - вакуум”.

Для этого излучением абсолютно чёрного тела, находящегося при температуре 1000 К, генерируем в структуре пучок ПЭВ с волновым числом σ в пределах от 100 см^{-1} до 200 см^{-1} .

Предварительно рассчитаем спектры действительной $\kappa'(\sigma)$ и мнимой $\kappa''(\sigma)$ частей показателя преломления ПП с использованием дисперсионного уравнения ПЭВ в трёхслойной структуре [**Bell R.J., Alexander R.W., Ward C.A. and Tyler I.L. *Introductory theory for surface electromagnetic wave spectroscopy, Surface Science, 1975, v.48, p.253-287***] и модели Друде для диэлектрической проницаемости металла, полагая столкновительную частоту свободных электронов золота равной 215 см^{-1} , а плазменную - 72800 см^{-1} [**Ordal M.A., Bell R.J., Alexander R.W., Long L.L., and Querry M.R. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W, Applied Optics, 1985, v.24(24), p. 4493-4499**] с учётом слабой дисперсии показателя преломления ZnS, равного 3,4 в указанном диапазоне.

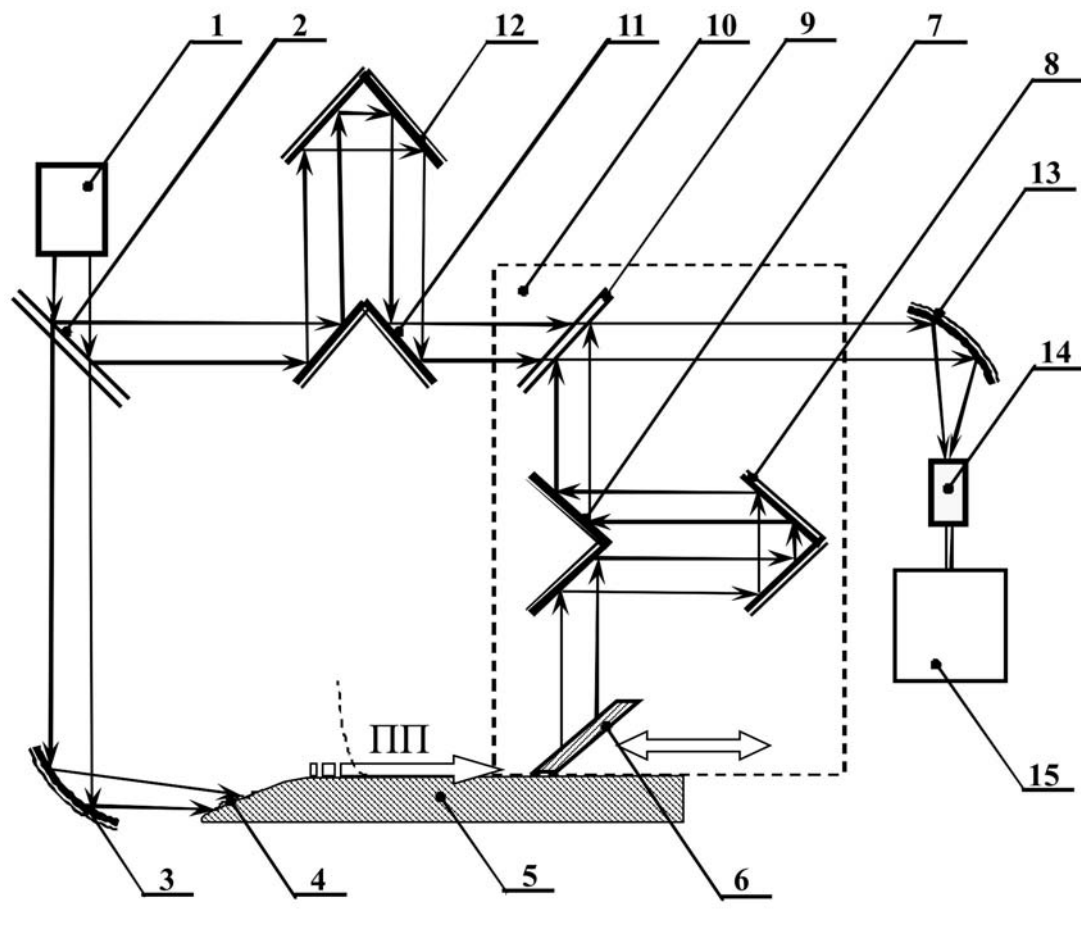
Затем было выполнено численное моделирование интерферограмм для двух различных расстояний пробега ПЭВ $a_1 = 1,0 \text{ см}$ и $a_2 = 1,5 \text{ см}$. Выбор значений a_1 и a_2 сделан с учётом условия $\Delta a, a_1, a_2 \leq L_{min}$ (здесь $L_{min} = 1,8 \text{ см}$ – длина распространения ПЭВ на $\sigma_{max} = 200 \text{ см}^{-1}$),

обеспечивающего возможность регистрации сигнала и определения комплексного показателя преломления ПЭВ. Для простоты расчётов аппаратная функция нормировалась на спектральную плотность излучения с волновым числом 200 см^{-1} . С этой же целью, нормированные аппаратные множители α_{1v} и α_{2v} , как и модули нормированных коэффициентов преобразования объёмных волн в ПЭВ и обратно, приняты равными единице.

На рис.2 представлена центральная часть модельной интерферограммы, рассчитанной при $a=a_1$ по формуле (2) с разрешением $\sigma_{max}/N=0,05 \text{ см}^{-1}$ (что соответствует общему числу точек отсчёта $N=4000$) для точек с m от 1900 до 2100.

Далее, используя модель интерферограммы, формулу (5) и алгоритм быстрого преобразования Фурье [Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов, М.: БИНОМ, 2006. – 652 с.], был восстановлен фазовый φ_{vj} спектр пучка ПЭВ для обоих расстояний пробега a_1 (сплошная линия) и a_2 (пунктирная линия), представленный на рис.3. Из приведенных зависимостей $\Delta\varphi(\sigma)$ видно, что с учётом π -скачков фазовый набег $\Delta\varphi$ ПЭВ с волновым числом $\sigma^*=160 \text{ см}^{-1}$ равен 4,00 радианам при $a_1=1,0 \text{ см}$ (два порядка интерференции) и 7,83 радианам при $a_2=1,5 \text{ см}$ (три порядка интерференции).

Таким образом, рассмотренный пример наглядно демонстрирует возможность более быстрого и однозначного определения набег фазы монохроматической ИК ПЭВ заявляемым способом по результатам регистрации всего двух интерферограмм и их математической обработки с помощью полного фурье-преобразования.



Фиг. 1

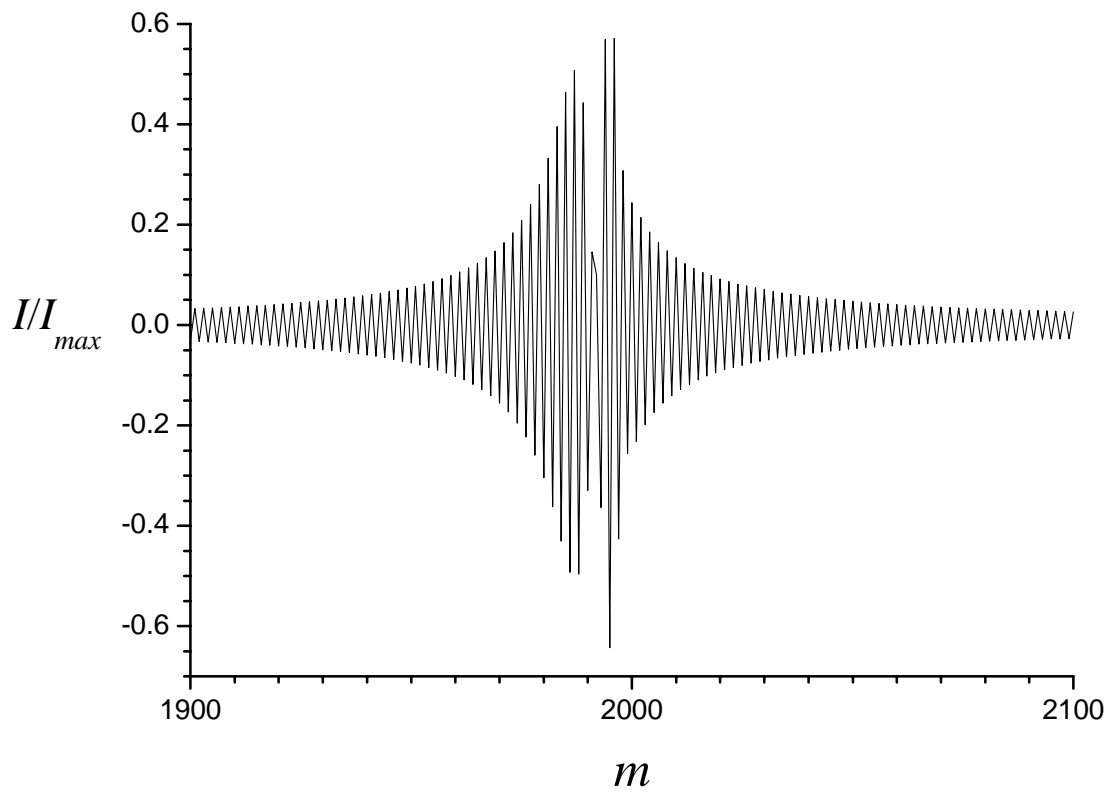


Рис. 2

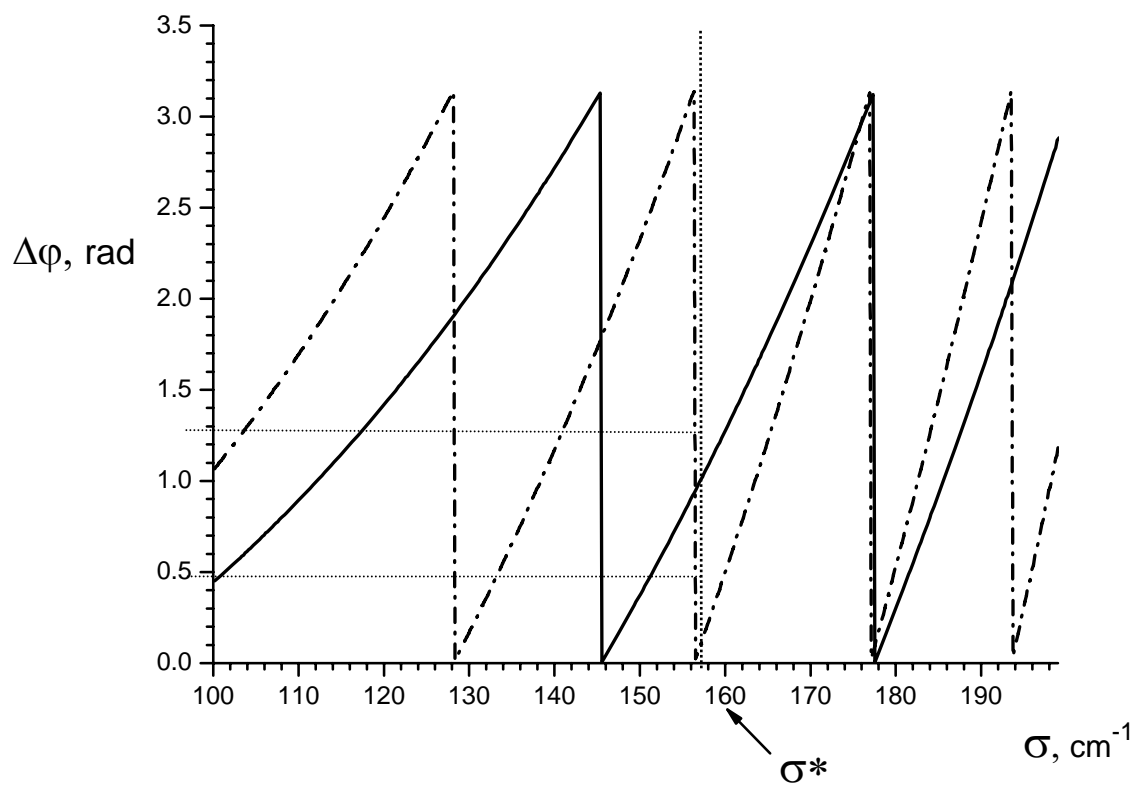


Рис. 3

Заявка № 2012108258 от 21.02.2012. Способ определения глубины проникновения поля терагерцовых поверхностных плазмонов в окружающую среду

Авторы:

/Князев Б.А./

/Герасимов В.В./

/Никитин А.К./

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ определения глубины проникновения поля терагерцовых поверхностных плазмонов (ПП) в окружающую среду δ , включающий измерение интенсивности поля вдоль нормали к треку ПП в плоскости падения излучения, генерирующего ПП, и расчёт значения δ по результатам измерений, *отличающийся* тем, что на пути излучения за пределами образца, направляющего ПП, размещают собирающую линзу с цилиндрической поверхностью таким образом, чтобы её ось находилась в плоскости падения излучения и нормаль к контролируемой точке трека была удалена от оптического центра O линзы на расстояние $a > f$, где f – фокусное расстояние линзы, кроме того, за линзой (по ходу излучения) на расстоянии $b = \frac{a \cdot f}{a - f}$ от точки O в плоскости падения размещают линейку подключённых к индивидуальным гальванометрам фотодетекторов, примыкающую к плоскости, содержащей направляющую ПП поверхность.

Изобретение относится к оптическим методам контроля поверхности металлов и полупроводников в терагерцовом (ТГц) диапазоне спектра и может найти применение в технологических процессах для контроля толщины и однородности тонкослойных покрытий металлизированных изделий и полупроводниковых подложек, в методах по обнаружению неоднородностей (на) проводящей поверхности, в инфракрасной (ИК) рефрактометрии металлов для определения их диэлектрической проницаемости, в ИК сенсорных устройствах и контрольно-измерительной технике.

Поверхностные плазмоны (ПП) – представляют собой разновидность поверхностных электромагнитных волн, направляемых проводящей поверхностью, и широко используются для её контроля и спектроскопии [Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. – М.:

Наука, 1985. – 525 с.]. Одной из важнейших характеристик ПП, зависящих от оптических свойств поверхности и её покрытия, является глубина проникновения поля ПП в окружающую среду (в частности, воздух или вакуум) $\delta = [Re(k)]^{-1}$ - расстояние, на котором интенсивность поля уменьшается в $e \approx 2,718$ раз; здесь $k = k_o \cdot \sqrt{\kappa^2 - \varepsilon}$ - нормальная (относительно поверхности) компонента волнового числа ПП, $k_o = 2\pi/\lambda$, κ - комплексный показатель преломления ПП, ε - диэлектрическая проницаемость окружающей среды, λ - длина волны излучения, генерирующего ПП. Измеряя δ , можно не только обнаруживать (по вариациям δ вдоль трека ПП) неоднородности на поверхности, но и определять диэлектрическую проницаемость материала проводящего образца или толщину и показатель преломления переходного слоя поверхности [Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K., Zhizhin G.N. A way to determine the permittivity of metallized surfaces at terahertz frequencies, Applied Physics Letters, 2011, v.98, 171912].

Известен способ определения глубины проникновения поля ТГц ПП в окружающую среду δ , включающий измерение интенсивности поля вдоль нормали к треку ПП в плоскости падения излучения, генерирующего ПП, внесение в поле ПП острия оптоволоконного зонда, соединённого с фотодетектором, подключённым к гальванометру, измерение зависимости интенсивности светового сигнала, поступающего на фотодетектор, от расстояния, отделяющего острие от поверхности, направляющей ПП, и расчёт значения δ по результатам измерений [Chen H.-T., Kersting R., Cho G.C. Terahertz imaging with nanometer resolution, Applied Physics Letters, 2003, v.83, p.3009–3011]. Основными недостатками способа являются возмущение зондом поля ПП, что искажает результаты измерений, и большая продолжительность процедуры зондирования.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому является способ определения глубины проникновения поля ТГц ПП в окружающую среду δ , включающий измерение интенсивности поля вдоль нормали к треку ПП в плоскости падения излучения, генерирующего ПП, внесение в поле подключённого к гальванометру фотоприёмника, снабжённого щелевой диафрагмой, ориентированной параллельно направляющей ПП поверхности и перпендикулярно треку, измерение на торце образца зависимости интенсивности поля от расстояния, отделяющего щель от поверхности, и расчёт значения δ по результатам измерений [Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K., Zhizhin G.N. A way to determine the permittivity of metallized surfaces at terahertz frequencies, Applied Physics Letters, 2011, v.98, 171912]. Основными недостатками способа являются искажение

поля ПП отражённым от диафрагмы излучением, невозможность выполнения измерений в произвольной точке трека и их большая продолжительность.

Техническим результатом, на достижение которого направлено изобретение, является повышение точности и уменьшение времени измерений.

Технический результат достигается тем, что в известном способе определения глубины проникновения поля ТГц ПП в окружающую среду δ , включающем измерение интенсивности поля вдоль нормали к треку ПП в плоскости падения излучения, генерирующего ПП, и расчёт значения δ по результатам измерений, на пути излучения за пределами образца, направляющего ПП, размещают собирающую линзу с цилиндрической поверхностью таким образом, чтобы её ось находилась в плоскости падения излучения и нормаль к контролируемой точке трека была удалена от оптического центра О линзы на расстояние $a > f$, где f – фокусное расстояние линзы, кроме того, за линзой (по ходу излучения) на расстоянии $b = \frac{a \cdot f}{a - f}$ от точки О в плоскости падения размещают линейку подключённых к индивидуальным гальванометрам фотодетекторов, примыкающую к плоскости, содержащей направляющую ПП поверхность.

Повышение точности определения глубины проникновения поля ТГц ПП в окружающую среду достигается в результате устранения искажения поля зондирующим элементом, так как линза, фокусирующая вторичные волны, излучаемые полем в выбранном поперечном сечении трека, находится за пределами образца и не оказывает влияния на поле в контролируемом сечении трека.

Уменьшение же времени измерений достигается в результате одновременного измерения линейкой фотодетекторов интенсивности поля ПП в ряде точек окружающей среды над контролируемой точкой трека.

Изобретение поясняется чертежами: на рис.1 - схема устройства, реализующего способ; на рис.2 – зависимость интенсивности поля ПП в рассматриваемом примере от расстояния, отделяющего данную точку поля от поверхности образца.

Предлагаемый способ может быть реализован с использованием устройства, схема которого приведена на рис.1, где цифрами обозначены: 1 – источник монохроматического излучения; 2 – поляризатор; 3 – плоское зеркало; 4 – вогнутое зеркало с цилиндрической отражающей поверхностью; 5 – образец с плоской проводящей поверхностью, 6 – платформа для размещения образца 5; 7 - призмы с металлизированным плоским основанием, ориентированным параллельно поверхности образца 5; 8 - поглощающий плоский экран, ориентированный перпендикулярно плоскости падения излучения и край которого удалён от образца 5 на расстояние в несколько миллиметров; 9 – тонкая собирающая линза с

фокусирующей поверхностью цилиндрической формы, размещённая за пределами образца 5 и ось которой лежит в плоскости падения, а её оптический центр удалён от нормали к контролируемой точке трека ПП на расстоянии $a > f$, где f – фокусное расстояние линзы; 10 – линейка фотодетекторов, размещённая в плоскости падения, ориентированная параллельно оси линзы 9, примыкающая к плоскости, содержащей поверхность образца 5, и удалённая от оптического центра линзы 9 на расстояние $b = \frac{a \cdot f}{a - f}$; 11 – набор гальванометров, отдельно подключённых к детекторам линейки 10; 12 – устройство обработки информации; 13 – подвижная платформа с установленными на ней элементами 9 и 10.

Способ осуществляется следующим образом. Излучение источника 1 направляют на поляризатор 2, выделяющий из электромагнитной волны р-составляющую. С помощью зеркал 3 и 4 поляризованное излучение направляют в зазор между проводящей поверхностью образца 5, размещённого на платформе 6, и металлизированным основанием призмы 7. В зазоре излучение преобразуется в ТМ-моды полого металлического волновода, образованного основанием призмы 7 и поверхностью образца 5. Дифрагируя на крае призмы 7, моды с некоторой эффективностью преобразуются в ПП и порождают веер паразитных объёмных волн, поглощаемых экраном 8 [Gong M., Jeon T.-I., Grischkowsky D. THz surface wave collapse on coated metal surfaces, Optics Express, 2009, v.17(19), 17088]. ПП проходят под экраном 8 и распространяются в плоскости падения по поверхности образца 5. В соответствии с принципом Гюйгенса, каждая точка волнового фронта поля ПП излучает вторичные волны, интенсивность которых пропорциональна интенсивности исходной волны в данной точке фронта. Вторичные волны, порождённые фронтом в данной точке трека ПП, концентрируются линзой 9 на линейку фотодетекторов 10. Электрические сигналы с выходов детекторов линейки 10 измеряются соответствующими гальванометрами набора 11 и поступают на устройство 12, которое нормирует их на сигнал с детектора, примыкающего к плоскости образца, и вычисляет искомое значение глубины проникновения поля ПП в окружающую среду δ . Перемещая платформу 13 вдоль направления трека ТГц ПП, аналогичным образом можно определить величину δ в любой точке трека (в случае наличия на поверхности образца 5 неоднородности, значение δ может соответствующим образом изменяться).

В качестве примера применения заявляемого способа рассмотрим возможность определения величины δ для ТГц ПП, генерируемых излучением лазера на свободных электронах с длиной волны $\lambda = 130$ мкм [Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A.. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements, Meas. Sci. & Techn., 2010, v.21, 054017] на плоской поверхности размещённого в воздухе золотого

образца длиной 20 см. В этом случае комплексный показатель преломления ПП, рассчитанный с использованием дисперсионного уравнения ПП для двухслойной структуры и модели Друде для диэлектрической проницаемости золота [Ordal M.A., Bell R.J., Alexander R. W., Long L. L., and Querry M. R. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W, Applied Optics, 1985, v.24, No.24, p.4493-4499], равен $k=1,000273+i\cdot 5,6\cdot 10^{-7}$, что соответствует длине распространения ПП равной 180 см. Материалом для фокусирующей линзы выберем непоглощающий полиметилпентен (TPX) с показателем преломления равным 1,46 [<http://www.tydex.ru>], а в качестве фотоприёмного устройства - болометрическую матрицу, состоящую из 320×240 пикселей, размером 51×51 мкм каждый [Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Овсюк В.Н., Фомин Б.И., Асеев А.Л., Князев Б.А., Кулипанов Г.Н., Винокуров Н.А. Матричные микроболометрические приёмники для ИК и ТГц диапазонов, Оптический журнал, 2009, т.76, №12, с.5-11]. Форму линзы зададим в виде полуцилиндра высотой 30 мм и радиусом 100 мм, что соответствует её фокусному расстоянию $f=46$ мм. Линзу разместим за пределами образца таким образом, чтобы расстояние a , отделяющее ось линзы от контролируемой точки на треке ПП, равнялось $2f$. Матрицу же поместим за линзой (по ходу излучения) на расстоянии b от оси линзы также равном $2f$. На рис.2 приведена зависимость нормированной интенсивности поля ПП I/I_0 (где I_0 – интенсивность поля ПП на поверхности) в рассматриваемом примере от расстояния z , отделяющего данную точку поля от поверхности образца. Из этой зависимости следует, что величина δ в рассматриваемом примере равна 15,3 мм. Поскольку $a=b=2f$, то размер изображения равен размеру самого объекта, поэтому поле ПП может быть полностью (в пределах величины δ) практически мгновенно зарегистрировано столбцом матрицы, при условии размещения её стороной в 320 пикселей параллельно плоскости падения, а значение δ - количественно оценено устройством обработки информации с точностью до 0,3% (отношение размера пикселя к δ).

Таким образом, приведенный пример наглядно демонстрирует возможность определения глубины проникновения поля ТГц ПП в окружающую среду δ без искажения поля зондирующим элементом, что обеспечивает достижение поставленной в изобретении цели – повышение точности и сокращение времени измерений величины δ .

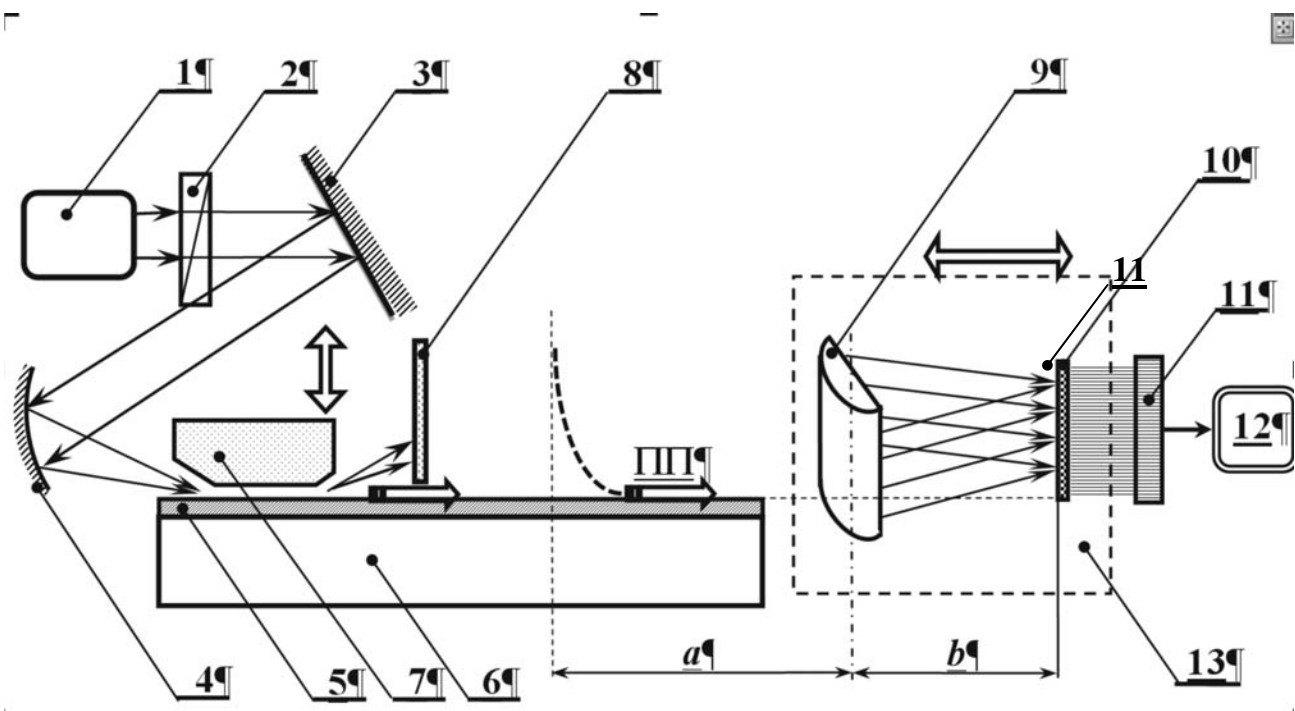


Рис.1

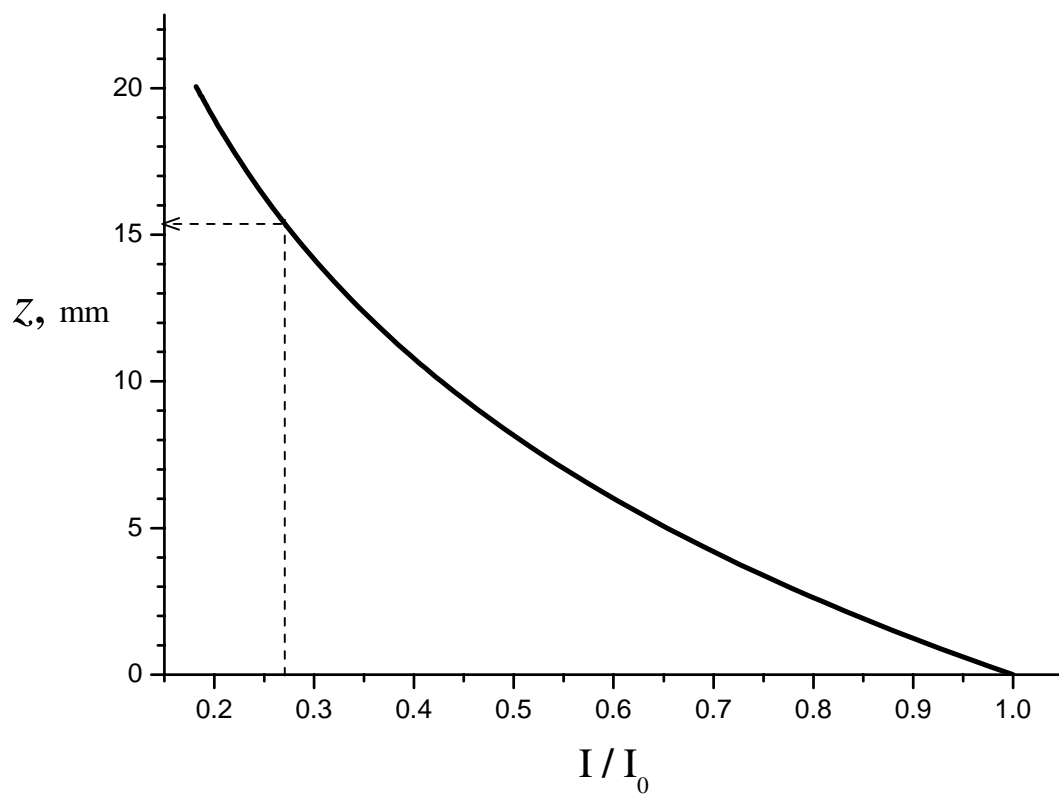


Рис.2

Заявка № 2012107166 от 14.02.2012. Способ управления спектром пучка широкополосного терагерцового излучения

Авторы:

/Жижин Г.Н./

/Князев Б.А./

/Никитин А.К./

/Герасимов В.В./

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ управления спектром пучка широкополосного терагерцового излучения, включающий размещение на пути пучка селективно поглощающего фильтра, *отличающийся тем*, что излучению предварительно сообщают линейную поляризацию, в качестве фильтра выбирают проводящую поверхность, поляризованное излучение преобразуют в пучок направляемых поверхностью поверхностных плазмонов (ПП), который, после пробега ПП расстояния Δx , преобразуют в пучок объёмных электромагнитных волн (ОЭВ) и добиваются искомого амплитудно-частотного распределения гармонических компонент в пучке ОЭВ изменением расстояния Δx .

Изобретение относится к оптике дальнего инфракрасного (ИК) и терагерцового (ТГц) диапазонов и может найти применение в установках, содержащих широкополосные источники ТГц-излучения (нагретое тело, синхротрон, импульсные лазеры), в ТГц плазменной и фурье-спектроскопии проводящей поверхности и тонких слоёв на ней, в перестраиваемых фильтрах ТГц излучения.

Основным способом управления спектром пучка широкополосного ИК-излучения является пропускание пучка через селективный по частоте фильтр. По своему принципу действия оптические фильтры подразделяют на абсорбционные (изготовленные из веществ, имеющих полосы поглощения в пределах спектра пучка), интерференционные (состоящие из прозрачной пластины, поверхность которой содержит многослойное покрытие с чередующимися высоким и низким показателями преломления), отражательные (действие которых основано на спектральной зависимости отражения непрозрачного материала), поляризационные (их применение основано на том, что отражённое объектом излучение частично поляризовано), дисперсные (функционирующие на основе зависимости показателя преломления вещества фильтра от длины волны) [Э.Ангерер. Техника физического эксперимента, М.: Физматлит, 1962. с.317-324]. Интенсивность излучения в пределах полос

поглощения изменяют путём изменения расстояния, проходимого излучением в веществе фильтра. Основными недостатками известного способа является ограниченность диапазона частот, подвергаемого регулировке и определяемого расположением полос поглощения вещества фильтра на оси частот, а также - невозможность оперативного управления спектром пучка.

Наиболее близким к заявляемому по технической сущности является способ управления спектром пучка широкополосного ТГц-излучения, включающий размещение на пути пучка селективно поглощающего фильтра, выполненного в виде упорядоченного набора идентичных отверстий в проводящем экране [Melo A.M., Kornberg M.A., Kaufmann P. et al. Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies, *Applied Optics*, 2008, v.47, No.32, p.6064-6069]. Положением полосы пропускания фильтра на оси частот и шириной полосы управляют формой и размерами отверстий, а также - расстоянием между ними. Основным недостатком известного способа является невозможность оперативного управления амплитудно-частотным спектром пучка.

Технический результат изобретения направлен на обеспечение возможности оперативного управления амплитудно-частотным спектром пучка во всём ТГц диапазоне.

Технический результат достигается тем, что в способе управления спектром пучка широкополосного ТГц излучения, включающем размещение на пути пучка селективно поглощающего фильтра, излучению предварительно сообщают линейную поляризацию, в качестве фильтра выбирают проводящую поверхность, поляризованное излучение преобразуют в пучок направляемых поверхностью поверхностных плазмонов (ПП), который, после пробега ПП расстояния Δx , преобразуют в пучок объёмных электромагнитных волн (ОЭВ) и добиваются искомого амплитудно-частотного распределения гармонических компонент в пучке ОЭВ изменением расстояния Δx .

Оперативность управления амплитудно-частотным спектром пучка во всём ТГц диапазоне достигается вследствие пропорциональности коэффициента поглощения ПП квадрату частоты излучения при данном расстоянии Δx , пробегаемом ПП [Zhizhin G.N., Yakovlev V.A. Broad-band spectroscopy of surface electromagnetic waves, *Physics Reports*, 1990, v.194, No.5/6, p.281-289]. Изменяя расстояние Δx пробега ПП, можно плавно регулировать амплитудно-частотное распределение гармонических компонент в пучке на выходе фильтра, вплоть до полного подавления нежелательной части спектра.

Изобретение поясняется чертежами: на рис.1 - схема устройства, реализующего способ; на рис.2 – частотные зависимости интенсивности в пучке ТГц излучения синхротрона до плазмонного фильтра и после него при различных расстояниях пробега ПП по границе раздела “золото – воздух”.

Предлагаемый способ может быть реализован с использованием устройства, описанного в [Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K., Zhizhin G.N. A way to determine the permittivity of metallized surfaces at terahertz frequencies, Applied Physics Letters, 2011, v.98, 171912] и схема которого приведена на рис.1, где цифрами обозначены: 1 – источник широкополосного излучения; 2 – поляризатор, сообщающий излучению p -поляризацию относительно плоскости падения; 3 – плоское поворотное зеркало; 4 – цилиндрическое зеркало; 5 – проводящая пластина с плоскопараллельными гранями, размещённая на платформе 6; 7 – элемент преобразования излучения источника в ПП; 8 – экран, поглощающий объёмное излучение, не преобразованное в ПП; 9 – подвижная платформа, содержащая фиксированные элементы 3, 4, 7 и 8, способная перемещаться вдоль поверхности пластины 5; 10 – фокусирующий объектив.

Способ реализуется следующим образом. Широкополосное излучение источника 1, содержащее непрерывный ряд гармонических компонент, направляют на поляризатор 2, плоскость пропускания которого совпадает с плоскостью падения излучения. Далее линейно поляризованное излучение отражается зеркалом 3 и фокусируется зеркалом 4 на зазор между проводящей пластиной 5, размещённой на платформе 6, и элементом 7, преобразующим объёмное излучение в ПП. На выходе элемента 7, наряду с пучком ПП, образуется веер паразитных объёмных волн, которые блокируют непрозрачным экраном 8, край которого отстоит от поверхности пластины 5 не менее чем на глубину проникновения поля ПП в окружающую среду. Пучок ПП содержит такой же ряд гармонических компонент, как и излучение источника 1. Распространяясь по пластине 5, гармонические компоненты ПП затухают по экспоненциальному закону со степенным показателем, пропорциональным квадрату частоты данной компоненты. Дойдя до края пластины 5, пучок ПП, в результате дифракции на ребре пластины, трансформируется в пучок объёмных электромагнитных волн (ОЭВ) [Агранович В.М. Кристаллооптика поверхностных поляритонов и свойства поверхности, УФН, 1975, т.115, Вып.2, с.199-237]. Расходящийся пучок p -поляризованных ОЭВ коллимируется объективом 10, сфокусированным на край пластины 5. В силу неодинаковости затухания компонент пучка ПП можно оперативно управлять спектром пучка ОЭВ, изменяя расстояние пробега ПП Δx .

В качестве примера применения заявляемого способа рассмотрим возможность управления спектром пучка излучения синхротрона, содержащим непрерывный ряд гармонических компонент в диапазоне частот от 50 см^{-1} до 700 см^{-1} , что соответствует длинам волн λ от 200 мкм до 14,3 мкм [Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы, УФН, 1977, т.122, вып.3, с.369-418]. Для этого, в

качестве фильтра выберем оптическую поверхность золота, диэлектрическую проницаемость которого будем рассчитывать по модели Друде, полагая столкновительную частоту свободных электронов равной 215 см^{-1} , а плазменную - 72800 см^{-1} [Ordal M.A., Bell R.J., Alexander R.W., Long L.L., and Querry M.R. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W, Applied Optics, 1985, v.24(24), p. 4493-4499]. Преобразование излучения синхротрона в ПП будем осуществлять волноводным методом, описанным в [Jeon T.-I., Grischkowsky D. THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet, Applied Physics Letters, 2006, V.88, 061113] и позволяющим эффективно реализовывать преобразование во всём ТГц диапазоне (объёмное излучение преобразуется в ТМ-волноводные моды полого металлического волновода, которые, дифрагируя на крае элемента преобразования, частично трансформируются в соответствующие ПП). Кроме того, этот метод позволяет управлять низкочастотной границей спектра пучка ПП, путём изменения величины зазора между элементом преобразования и поверхностью, направляющей ПП (отсечка наименьшей волноводной моды наступает при величине зазора равной $\lambda/2$).

На рис.2 приведены расчётные частотные зависимости интенсивности в пучке ТГц излучения синхротрона до плазмонного фильтра (сплошная линия) и после него при длине пробега ПП Δx по границе раздела “золото – воздух” равной 10 см, 20 см и 50 см. Видно, что при $\Delta x=50$ см компоненты с частотами превышающими 600 см^{-1} ослабляются более чем в 100 раз, в то время как интенсивность компонент с частотами близкими к 200 см^{-1} ослабляется всего в 2 раза. Перемещая подвижную платформу 9 с укрепленным на ней элементом преобразования излучения источника в ПП, можно оперативно изменять длину пробега пучка ПП, изменяя тем самым соотношение интенсивностей гармонических компонент в пучке ОЭВ на выходе плазмонного фильтра. При этом возможна регулировка низкочастотной границы спектра изменением величины зазора между элементом преобразования 7 и поверхностью, направляющей ПП.

Таким образом, рассмотренный пример наглядно демонстрирует возможность оперативного управления амплитудно-частотным спектром пучка широкополосного ТГц излучения.

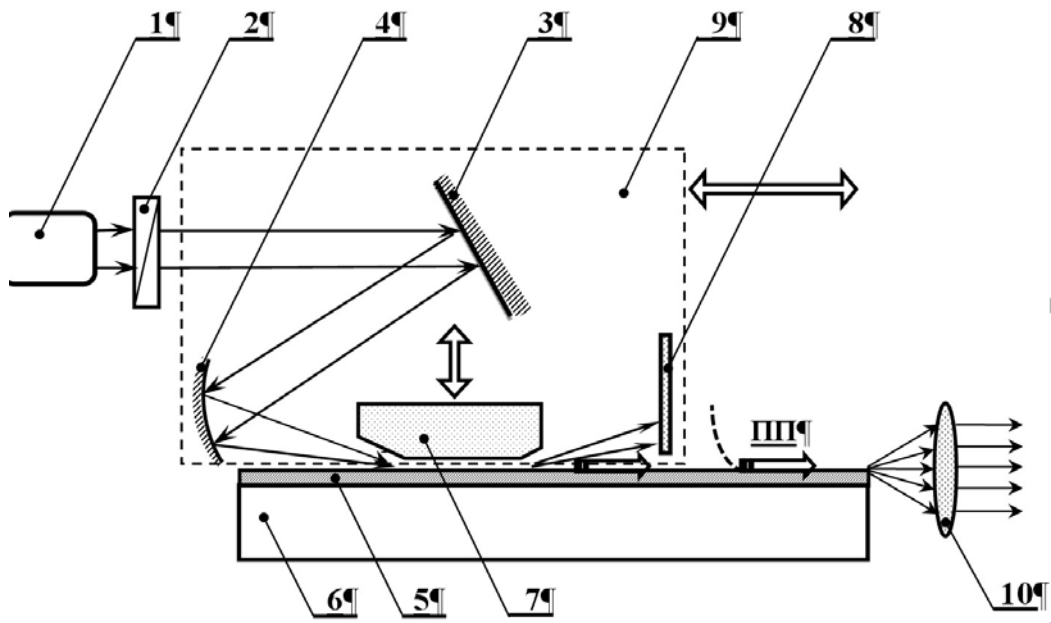


Рис.1

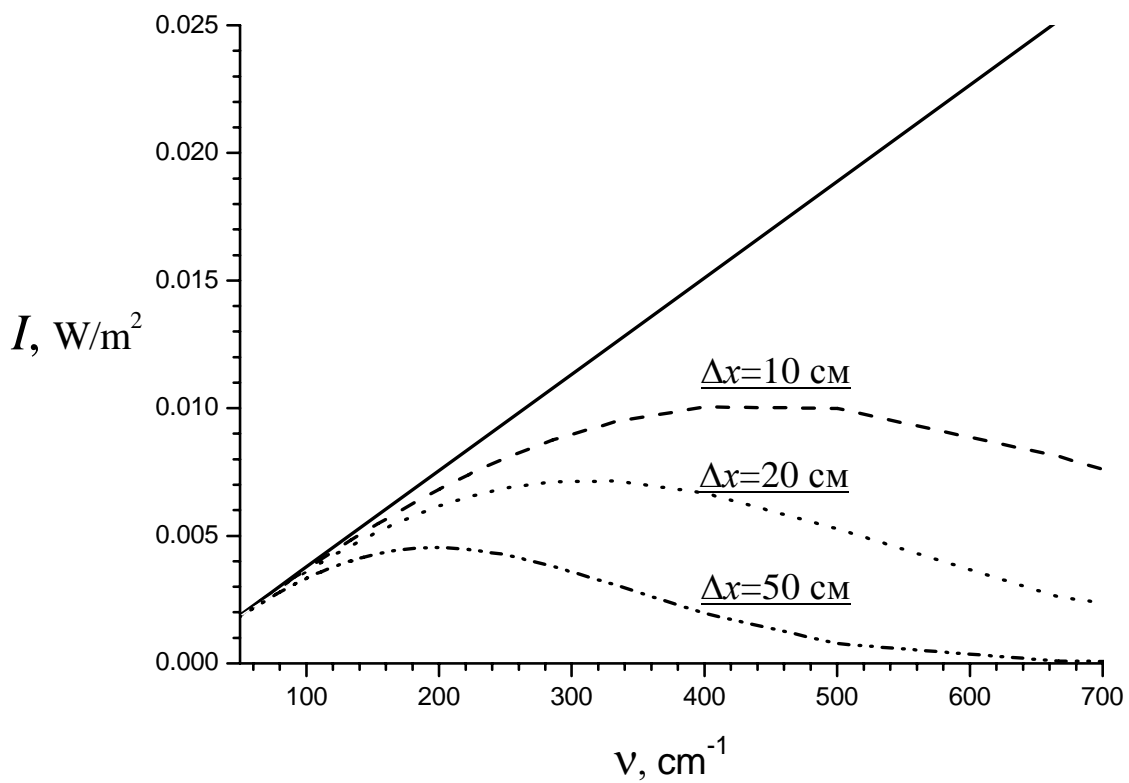


Рис.2

Заявка, исх. № 2012128079 от 03.07.2012 Способ измерения длины распространения инфракрасных поверхностных плазмонов по реальной поверхности

Авторы:

/Князев Б.А./

/Никитин А.К./

/Жижин Г.Н./

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ измерения длины распространения инфракрасных поверхностных плазмонов по реальной поверхности, включающий измерение интенсивности излучения вдоль трека плазмонов и расчёт значения длины распространения по результатам измерений, *отличающийся* тем, что измеряют интенсивность объёмного излучения, порождённого плазмонами на неоднородностях поверхности, причём измерения осуществляют за пределами поля плазмонов.

.....

Изобретение относится к бесконтактным исследованиям поверхности металлов оптическими методами, а именно - к определению спектров поглощения, как самой поверхности, так и её переходного слоя путём измерения длины распространения поверхностных плазмонов, направляемых этой поверхностью, в инфракрасной (ИК) области спектра и может найти применение в исследованиях физико-химических процессов на поверхности твёрдого тела, в ИК-спектроскопии окисных и адсорбированных слоёв, в контрольно-измерительной технике, в лазерной и интегральной оптике.

Поверхностные плазмоны (ПП) – представляют собой разновидность поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), направляемых проводящей поверхностью, и широко используются для её контроля и абсорбционной спектроскопии [Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. – М.: Наука, 1985. – 525 с.]. Метод абсорбционной ПП-спектроскопии используют, в основном, в средней и дальней областях ИК-диапазона, где длина распространения ПП L (расстояние вдоль трека, на котором интенсивность поля ПП уменьшается в e раз) достигает 1000λ (здесь λ - длина волны излучения в свободном пространстве) и может быть непосредственно измерена. Причём, так как расстояние взаимодействия зондирующего излучения с поверхностью при его трансформации в ПП

многократно возрастает (по сравнению с отражательными методами изучения поверхности), то чувствительность метода абсорбционной ПП-спектроскопии, соответственно, на много выше чувствительности иных абсорбционно-оптических методов контроля поверхности в ИК-диапазоне.

Известен способ измерения длины распространения ПП, включающий размещение в поле ПП над их треком подвижного элемента преобразования ПП в объёмную волну, измерение зависимости интенсивности объёмной волны от расстояния, пройденного ПП и расчёт длины распространения по результатам измерений [Shoenwald J., Burstein E., Elson J.M. Propagation of surface polaritons over macroscopic distances at optical frequencies, Solid State Comm., 1973, v.12, p.125-129]. Основными недостатками такого способа являются: 1) большая продолжительность измерений, обусловленная необходимостью прецизионного перемещения элемента преобразования в процессе измерений; 2) низкая точность измерений, из-за возмущения поля ПП элементом преобразования и вариаций эффективности преобразования при перемещении подвижного элемента.

Известен болометрический способ определения коэффициента поглощения ПЭВ, позволяющий измерять их длину распространения, включающий возбуждение ПЭВ на прозрачной металлической плёнке, ширина которой не превышает ширину пучка ПЭВ, измерение изменения электрического сопротивления участка плёнки известной протяжённости в результате распространения по нему ПЭВ и последующий расчёт величины L по результатам измерений и известным параметрам плёнки, физическим характеристикам металла и длительности импульса [Большаков М.М., Никитин А.К., Тищенко А.А., Самодуров Ю.И. Устройство для определения коэффициента поглощения ПЭВ металлическими плёнками, Автор. св. №1684634. – Бюл. №38 от 15.10.1991 г.]. Основными недостатками такого способа являются: 1) ограниченность класса ПЭВ, поддающихся контролю; 2) низкая точность измерений, обусловленная квазиadiaбатичностью процесса передачи энергии ПЭВ плёнке.

Известен способ измерения длины распространения ПП, включающий измерение интенсивности излучения вдоль трека ПП, внесение в поле ПП острия оптоволоконного зонда, соединённого с фотодетектором, подключённым к гальванометру, измерение зависимости интенсивности светового сигнала, поступающего на фотодетектор, от расстояния, пройденного ПП, и расчёт значения L по результатам измерений [Mueckstein R., Mitrofanov O. Imaging of terahertz surface plasmon waves excited on a gold surface by a focused beam, Optics Express, 2011, v.19, No.4, p.3212-3217]. Основными недостатками способа являются низкая точность измерений, обусловленная возмущением поля ПП зондом, что искажает результаты измерений.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявляемому является способ измерения длины распространения ПП ИК-диапазона, включающий размещение в поле ПП вдоль её трека прозрачной плоскопараллельной пластины, ориентированной своим основанием параллельно поверхности образца, регистрацию интенсивности излучения, выходящего из пластины, линейкой фотоприёмников и последующий расчёт длины распространения по результатам измерений [Никитин А.К., Жижин Г.Н., Богомолов Г.Д., Никитин В.В., Чудинова Г.К. Устройство для получения спектров поглощения тонких слоёв в терагерцовой области спектра, Патент РФ на изобретение №2325729. – Бюл. №3, 27.01.2009 г]. Основными недостатками известного способа являются: 1) возмущение поля ПП размещаемой в нём пластиной, что обуславливает отличие результатов измерений от истинного значения L ; 2) перекрытие пластиной доступа к исследуемой поверхности, что во многих случаях контроля поверхности и воздействий на неё является неприемлемым.

Техническим результатом, на достижение которого направлено изобретение, является повышение точности измерений.

Технический результат достигается тем, что в известном способе измерения длины распространения ПП ИК-диапазона, включающем измерение интенсивности излучения вдоль трека плазмонов и расчёт значения длины распространения по результатам измерений, измеряют интенсивность объёмного излучения, порождённого плазмонами на неоднородностях поверхности, причём измерения осуществляют за пределами поля плазмонов.

Повышение точности измерений достигается в результате того, что реализация способа не предполагает внедрение в поле ПП элемента его преобразования в объёмное излучение; частичная трансформация поля ПП в объёмное излучение происходит на естественных неоднородностях поверхности, направляющей ПП. Вследствие этого, измерения становятся более корректными, так как их реализация не приводит к искажению контролируемого объекта (поля ПП).

Изобретение поясняется схемой устройства, реализующего способ, представленной на рис.1.

Предлагаемый способ может быть реализован с использованием устройства, схема которого приведена на рис.1, где цифрами обозначены: 1 – источник монохроматического излучения; 2 – поляризатор; 3 – плоское зеркало; 4 – вогнутое зеркало с цилиндрической отражающей поверхностью; 5 – проводящий образец, 6 – элемент преобразования, выполненный в виде призмы с плоским металлизированным основанием, ориентированным параллельно поверхности образца 5; 7 - поглощающий плоский экран, ориентированный

перпендикулярно плоскости падения излучения и край которого удалён от образца 5 на расстояние, превышающее глубину проникновения поля ПП в окружающую среду; 8 – регулируемые диафрагмы, размещённые вне поля ПП; 9 - собирающие линзы, оптические оси которых лежат в плоскости падения и проходят через центры соответствующих диафрагм 8; 10 - фотодетекторы, размещённые в фокусах линз 9; 11 – гальванометры, отдельно подключённые к детекторам 10; 12 – устройство обработки информации.

Способ осуществляется следующим образом. Излучение источника 1 направляют на поляризатор 2, выделяющий из электромагнитной волны р-составляющую. С помощью зеркал 3 и 4 поляризованное излучение направляют в зазор между проводящей поверхностью образца 5 и металлизированным основанием призмы 6. В зазоре излучение преобразуется в ТМ-моды полого металлического волновода, образованного основанием призмы 6 и поверхностью образца 5. Эти моды, дифрагируя на ребре призмы 6, с некоторой эффективностью преобразуются в ПП [Gong M., Jeon T.-I., Grischkowsky D. THz surface wave collapse on coated metal surfaces, *Optics Express*, 2009, v.17(19), 17088] и порождают веер паразитных объёмных волн, поглощаемых экраном 7. Пучок ПП проходит под экраном 7 и распространяется в плоскости падения по поверхности образца 5, содержащей статистически равномерно распределённые неоднородности в виде вариаций оптических постоянных и шероховатости. Наличие неоднородностей приводит к радиационным потерям ПП в виде объёмных волн (ОВ), интенсивность которых пропорциональна интенсивности поля ПП и величине неоднородности в данной точке трека [Kretschmann E. Decay of non radiative surface plasmons into light on rough silver films, *Opt. Commun.*, 1972, v.6(3), p.185–187]. Эти ОВ распространяются в окружающей среде под различными углами к поверхности образца 5, причем диаграмма направленности порождаемого ПП рассеянного излучения имеет выраженный (по углу) максимум [Kretschmann E. The angular dependence and the polarisation of light emitted by surface plasmons on metals due to roughness, *Optics Comm.*, 1972, v.5(5), p.331-336]. Генерируемые плазмонами ОВ проходят через диафрагмы 8 и падают на соответствующие линзы 9, оптические оси которых совпадают с направлением максимума диаграммы направленности рассеянного излучения. Линзы 9 фокусируют на соответствующие детекторы 10 только ОВ, излучённые из участков трека, расположенных вблизи его пересечения с осями линз 9. Электрические сигналы с выходов детекторов 10 измеряются соответствующими гальванометрами 11 и поступают на устройство 12, которое по известному расстоянию Δx между участками трека, излучающими детектируемые ОВ, и силам токов I_1 и I_2 , измеренных первым и вторым (по ходу ПП) детекторами 9, рассчитывает длину распространения ПП по формуле:

$$L = \frac{\Delta x}{\ln(I_1/I_2)}. \quad (1)$$

В качестве примера применения заявляемого способа рассмотрим возможность определения длины распространения ПП, генерируемых излучением с длиной волны 130 мкм, по размещённому в воздухе золотому образцу с гауссовым распределением неровностей поверхности. Экспериментально установлено, что длина распространения ПП по реальной поверхности благородных металлов в дальнем ИК-диапазоне меньше расчётной (без учёта неоднородностей поверхности) примерно в 100 раз и составляет примерно 10 см вместо расчётных 10 м [Schlesinger Z., Webb B.C., Sievers A.J. Attenuation and coupling of far infrared surface plasmons, *Solid State Comm.*, 1981, v.39(10), p.1035-1039]. Столь большое различие объясняется, главным образом, не учётом в расчётах оптической неоднородности и шероховатости реальной поверхности. Для генерации ПП используем лазер на свободных электронах с мощностью пучка 100 Вт, а эффективность преобразования ОВ в ПП положим равной 1% [Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K., Zhizhin G.N. A way to determine the permittivity of metallized surfaces at terahertz frequencies, *Appl. Phys. Letters*, 2011, v.98, 171912]. Поскольку радиационные потери ПП значительно превышают тепловые потери, то, после пробега ПП расстояния 10 см по реальной поверхности золота, примерно 2/3 начальной энергии поля ПП будет израсходовано на радиацию ОВ. Тогда, выбрав диаметр диафрагм 8, размещённых перед линзами 9, равным 1 мм, получим, что объёмные волны, поступающие на приёмники 10, доставляют энергию не менее 10^{-3} Вт. Такие уровни энергии могут быть уверенно зарегистрированы серийными неохлаждаемыми приёмниками [Рогальский А. Инфракрасные детекторы / Новосибирск: Наука, 2003. - 636 с]. Пусть, при размещении приёмников 10 на расстоянии 5,0 см друг от друга, отношение I_1/I_2 оказалось равным 2,0, тогда, согласно формуле (1), $L \approx 7,2$ см. При $I_1/I_2 = 3,0$ получим $L \approx 4,6$ см; при $I_1/I_2 = 5,0$ получим $L \approx 3,1$ см и т.д.

Таким образом, приведенный пример наглядно демонстрирует возможность измерения длины распространения инфракрасных поверхностных плазмонов по реальной поверхности металла заявляемым способом без возмущения поля плазмонов зондирующим элементом и изменения длины пробега плазмонов в процессе измерений, что и обеспечивает достижение поставленной в изобретении цели – повышение точности измерений.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ИНФРАКРАСНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ПО РЕАЛЬНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ

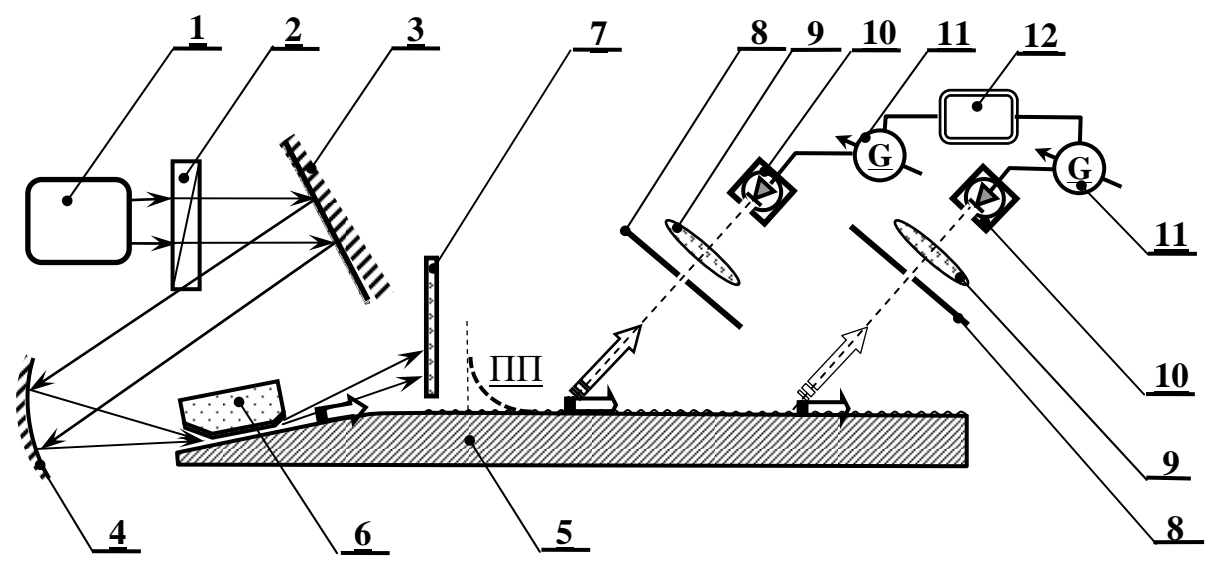


Рис.1

Авторы:

/Князев Б.А./

/Никитин А.К./

/Жижин Г.Н./