

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 533.9...15

На правах рукописи

Петрин Андрей Борисович

ВОЗБУЖДЕНИЕ И ФОКУСИРОВКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОННЫХ ВОЛН
И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА
ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД

01.04.08 - физика плазмы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2021

Содержание

Введение	6
Глава 1. Возбуждение и фокусировка поверхностных плазмонных волн световыми пучками ограниченной апертуры в схеме Кречмана	20
1.1. Постановка задачи возбуждения поверхностных плазмонных волн в схеме Кречмана ...	20
1.2. Задача падения плоской электромагнитной волны ограниченной апертуры на плоскостойкую структуру	23
1.3. Распределение полей на границах пленки. Нелокальность отражения	30
1.4. Исследование распределения амплитуды поверхностной плазмонной волны и интерференции поверхностных плазмонных волн в схеме Кречмана	36
1.5. Возбуждение поверхностных волноводных волн в схеме Кречмана. Сравнительный анализ чувствительности оптических датчиков на поверхностных плазмонных и волноводных волнах	41
1.5.1. Оценка чувствительности датчика на поверхностной плазмонной волне по границе пленки золота	42
1.5.2. Датчик на многопленочном поверхностном волноводе, нахождение оптимальной конструкции	43
1.5.3. Влияние отклонения толщин пленок от оптимальных значений в датчике на многопленочном поверхностном волноводе и в датчике на поверхностных плазмонах	45
1.5.4. Оценка чувствительности датчика на многопленочном поверхностном волноводе	47
1.5.5. Оценка минимального размера датчика вдоль направления распространения поверхностной волны	48
1.5.6. Обсуждение результатов сравнительного анализа чувствительности оптических датчиков	49
1.6. Заключение и выводы	50
Глава 2. Эффект Гуса-Хенхена при наличии возбуждения поверхностных волн в схеме Кречмана	51
2.1. Об эффекте Гуса-Хенхена.....	51
2.2. Характер распределения отраженного поля при наблюдении эффекта Гуса-Хенхена	51
2.3. Заключение и выводы	56
Глава 3. Фокусировка поверхностных плазмонных волн в точке свободной поверхности	

металлической пленки в схеме Кречмана	57
3.1. Введение и постановка задачи	57
3.2. Общая задача падения электромагнитной волны на плоскостойкую структуру под произвольным углом.....	60
3.3. Задача падения конической электромагнитной волны ограниченной апертуры на плоскостойкую структуру	69
3.4. Вычисление сфокусированного поля на свободной границе пленки и обсуждение полученных результатов.....	73
3.5. Заключение и выводы	74
Глава 4. Электронная эмиссия из фокальной области симметрично сходящейся поверхностной плазмонной волны на свободной поверхности металлической пленки	76
4.1. Вычисление сфокусированного поля на свободной границе золотой пленки	76
4.2. Вычисление тока электронной эмиссии из окрестности фокуса со свободной границы золотой пленки	78
4.3. Заключение и выводы	82
Глава 5. Термополевая эмиссия электронов из металла и ее тепловой эффект	83
5.1. Введение	83
5.2. Постановка задачи	85
5.3. Прохождение электрона через потенциальный барьер	88
5.4. Сравнение численного метода с известными решениями	91
5.5. Примеры расчетов и их обсуждение	93
5.6. Заключение и выводы	96
Глава 6. Фокусировка электромагнитного поля поверхностной плазмонной волны на вершине одиночного металлического микроострия	97
6.1. Введение	97
6.2. Нахождение особенности электрического поля на вершине металлического микроострия в квазистатическом приближении	98
6.3. Исследование особенности электрического поля у вершины микроострия	102
6.4. Выводы	107
Глава 7. Фокусировка света на нановершине металлического микроострия, расположенного над плоскостью диэлектрика, металла или плоскостойкой структурой	108
7.1. Введение	108
7.2. Распределение электрического поля на нановершине металлического микроострия, расположенного вблизи плоской границы в квазистатическом приближении. Постановка задачи	109

7.3. Исследование фокального распределения электрического потенциала и электрического поля у вершины наноострия вблизи плоской поверхности материала	115
7.4. Распределение электрического поля на нановершине металлического микроострия, расположенного вблизи плоской границы тонкопленочной структуры в квазистатическом приближении. Постановка задачи	119
7.5. Нахождение потенциала, снаружи и внутри слоистой структуры	125
7.6. Определение функций $H_j(\tilde{x}, \tilde{z})$	135
7.7. Исследование фокального распределения электрического поля у вершины наноострия вблизи плоской поверхности плоскостойкой структуры	136
7.8. Выводы	140
Глава 8. Термополевая эмиссия электронов из параболоидального металлического острия, расположенного над проводящей плоскостью	141
8.1. Введение	141
8.2. Распределение электрического поля у вершины металлического острия, расположенного вблизи металлической плоскости	141
8.3. Термополевая электронная эмиссия из металла	146
8.4. Термополевая электронная эмиссия из металлического острия, расположенного у проводящей плоскости	147
8.5. Заключение и выводы	150
Глава 9. Элементарный излучатель на границе плоскостойкой структуры	151
9.1. Введение	151
9.2. Постановка задачи. Излучение элементарного излучателя, расположенного внутри плоскостойкой структуры	153
9.3. Распространение электромагнитной волны в слое, свободном от сторонних токов	155
9.4. Распространение электромагнитной волны в многослойной структуре, свободной от сторонних токов	159
9.5. Распространение электромагнитной волны в многослойной структуре от элементарного источника стороннего тока	162
9.6. Излучение элементарного диполя, расположенного на границе двух полупространств	168
9.7. Элементарный горизонтальный диполь, расположенный на границе двух полупространств	170
9.8. Излучение элементарного горизонтального диполя, расположенного на границе металлической пленки, нанесенной на поверхность призмы.....	173
9.9. Излучение элементарного вертикального диполя, расположенного на границе	

металлическое пленки, нанесенной на поверхность призмы.....	180
9.10. Элементарный горизонтальный излучатель на свободной границе пленки золота в схеме Кречмана	183
9.11. Элементарный вертикальный излучатель на свободной границе пленки золота в схеме Кречмана	186
9.12. Заключение и выводы	188
Глава 10. Излучение в дальней зоне элементарного излучателя, расположенного на границе плоскостной структуры	189
10.1. Введение.....	189
10.2. Элементарный источник, на границе одной из пленок в плоскостной структуре. Строгие выражения для полей в полупространствах.....	189
10.3. Поля в полупространствах	192
10.4. Поля в дальней зоне от элементарных горизонтального и вертикального диполей, расположенных на границе металлической пленки, нанесенной на поверхность призмы ...	196
10.5. Результаты численных расчетов для элементарных горизонтального и вертикального диполей, расположенных на границе пленки золота в схеме Кречмана	198
10.6. Заключение	201
Глава 11. Теория плоской линзы из материала с отрицательным преломлением	203
11.1. Введение.....	203
11.2. Постановка задачи фокусировки линзы Веселаго	204
11.3. Распределение электрического поля в фокусе линзы Веселаго	206
11.4. Заключение	210
Глава 12. Закономерности излучения поверхностного источника по нормали к границе полупространства и плоскостной структуры	211
12.1. Введение.....	211
12.2. Излучение произвольного распределения сторонних токов в дальней зоне, в направлении по нормали к поверхности плоскостной структуры	212
12.3. Излучение горизонтального элементарного диполя, расположенного на границе двух однородных полупространств	214
12.4. Излучение элементарного горизонтального диполя, расположенного на границе немагнитной пленки	220
12.5. Излучение по нормали произвольного поверхностного распределения сторонних токов на границе пленки в дальней зоне	227
12.6. Выводы	229
Заключение	231

Благодарности	235
Список публикаций автора по теме диссертации	235
Список литературы	239

Введение

Тема исследований

Работа посвящена исследованию физических эффектов, возникающих при распространении электромагнитного излучения в плоскостойких структурах и возбуждению в них поверхностных волн, таких как поверхностных плазмонных волн и поверхностных волноводных волн. В работе теоретически рассмотрен эффект Гуса-Хенхена и его возможные приложения физические приложения. Исследованы распределения электрического поля в фокальной области на нановершине микроострия вблизи плоских поверхностей, термополевая электронная эмиссия из микроострий. Исследован способ фокусировки поверхностных плазмонных волн на плоской поверхности металлических пленок и электронной эмиссии из фокального пятна. Рассмотрены закономерности излучения наноантенн, расположенных на границе плоскостойких структур. В работе предложен оригинальный метод нахождения фундаментального решения задачи излучения точечного источника тока (точечного электрического диполя), расположенного на границе, внутри или снаружи плоскостойких структур. Найдены аналитические решения, дающие существенное упрощение для анализа многих задач и их численной реализации. Получены закономерности излучения по нормали к границе для произвольных поверхностных антенн, расположенных на границе плоскостойких сред.

Изучение рассмотренных в работе вопросов представляет интерес, как с точки зрения объяснения новых фундаментальных эффектов, так и с точки зрения их практического применения, в частности, в устройствах оптоэлектроники, микроскопии поверхностей, рамановской микроскопии, в производстве сенсоров, антенной технике и распространения радиоволн.

Актуальность темы исследований

Современный прогресс в экспериментальных и прикладных исследованиях в первую очередь обусловлен развитием технологической базы, основанной на высокопроизводительных технологиях микро- и нанолитографии [1] и плазменных технологиях обработки поверхностей [2], [3], [4], [5]. Во многом эти технологии позволили создать новый технологический уклад современного общества, основанный на интегральных микросхемах. В опто- и микроэлектронике прогресс связан с развитием технологий, позволяющих создавать структуры, характерные масштабы которых сравнимы или даже много меньше длины волны света. Развитие современной

антенной техники связано с развитием технологии микрополосковых интегральных схем, которые изготавливаются из фольгированных материалов высокопроизводительными методами печати и травления [6], [7], [8]. В связи с этим, приобретает особую важность развитие теории распространения и возбуждения электромагнитных волн в плоскостных средах.

В настоящее время существует значительный интерес к физическим явлениям, которые сопровождают возбуждение поверхностной плазмонной волны оптического диапазона частот на поверхности металлической пленки по схеме Кречмана [9]. Поверхностная плазмонная волна распространяется вдоль поверхности металла и локализуется вблизи его поверхности [10, 11], поэтому даже ничтожные изменения показателя преломления в приповерхностной области, заметно влияют на характер ее распространения. На этом основывается широкое использование схемы Кречмана для создания различного рода высокочувствительных датчиков, реагирующих на изменение показателя преломления тонкого (олиго- или моно-молекулярного) поверхностного слоя [12, 13, 14, 15]. Исследование вопросов увеличения чувствительности таких датчиков, проведенное в диссертации, является важной задачей, имеющей фундаментальное значение при создании новых высокочувствительных сенсоров.

Исследования показали [16], что амплитуда поверхностной плазмонной волны на свободной границе пленки в схеме Кречмана более чем на порядок выше амплитуды падающей волны. Исследование поверхностных областей с значительно увеличенной локальной интенсивностью поверхностных волн (*“hot spots”*) является крайне актуальной задачей. Места большой интенсивности могут быть использованы для создания локальной эмиссии электронов, возбуждения наноантенн, возбуждения металлических микроострий для дальнейшего усиления интенсивности на вершине.

Экспериментальные исследования нанофокусировки света на вершинах микроострий [17] приводят к необходимости теоретически исследовать фокусировку поверхностных плазмонных волн, которые имеют необходимую поляризацию для оптимального возбуждения микроострий. Также, для исследования поверхностей с наноточностью необходимо теоретически исследовать распределения поля при фокусировке света на нановершине микроострий. Фундаментальные вопросы по максимально достижимой разрешающей способности возникают, когда вершины микроострий находятся над границей полупространства или над границей плоскостной структуры. Исследованию этих вопросов посвящены несколько глав данной диссертации, в частности, исследуются распределения электрического поля в окрестности нановершины микроострий, исследуется электронная эмиссия из микроострий.

Так как в свободном пространстве над пленкой в схеме Кречмана не возбуждаются распространяющиеся волны, это дает возможность, помещая на свободную поверхность наночастицы или отдельные молекулы, наблюдать исключительно их излучение, направленное в

сторону свободного полупространства. Таким образом, можно подсвечивать наночастицы поверхностной плазмонной волной. Распространяющееся излучение наночастиц порождается наведенными электрическими дипольными моментами, которые индуцируются в наночастицах поверхностной волной. Важно, что только точечные объекты будут излучать распространяющиеся волны в свободное пространство, и исключительно это излучение можно будет наблюдать с помощью микроскопа, при этом можно полностью быть уверенным, что наблюдаемый в микроскоп свет исходит именно из точечных источников на поверхности. Подобный метод подсветки микрочастиц экспоненциально убывающей волной, возникающей при полном внутреннем отражении, применялся еще при исследовании коллоидных растворов Э Коттоном и А Мутоном с помощью усовершенствованного ультрамикроскопа [18]. Однако подсветка поверхностной плазмонной волной на поверхности металлической пленки является более перспективной по многим причинам, в частности, при таком способе уменьшается количество паразитных переотражений в системе, исключается неудобство подсветки под очень малыми углами с внутренней стороны призмы и этот способ может применяться совместно с измерениями известными датчиками изменения показателя преломления вблизи поверхности пленки.

В связи с этим возникает фундаментальный вопрос о том, как влияет металлическая пленка (или в общем случае многопленочная структура) в схеме Кречмана на пространственное излучение в свободное пространство над пленкой от точечного излучателя, расположенного на поверхности. В данной работе эти вопросы подробно исследуются.

Теоретические методы нахождения излучения от элементарного точечного электрического диполя, расположенного на плоской границе двух сред, были развиты на заре эры использования электромагнитных волн для передачи сигналов вдоль земной поверхности [19]. В дальнейшем, эти методы получили дальнейшее развитие в связи с возникающими новыми задачами радиосвязи [20], [21]. Развитие антенной техники привело к развитию теории излучения элементарного диполя, расположенного на границе плоскостойкой среды. Существующие теоретические методы расчета излучения антенн, расположенных на границе слоистых структур сложны и описываются, например, в терминах диадных функций Грина [22]. Кроме того, сама теория распространения волн в слоистых структурах содержит много тонких моментов, таких как необходимость правильного выбора ветвей аналитических функций при математическом представлении волн в слоях. В связи с этим данной работе [23, 24] предложен оригинальный вариант строгой электромагнитной теории излучения элементарного диполя, расположенного на границе или внутри плоскостойкой структуры. Для случаев излучения горизонтального и вертикального диполей, расположенных на свободной границе одной пленки демонстрируется метод аналитического упрощения решения, имеющий потенциально важное общетеоретическое значение. Этот метод позволил привести формулы для излучаемых полей к одномерным

интегралам, что существенно упростило анализ задачи и ускорило численные расчеты. Метод позволил решить ряд актуальных задач излучения наноантенн, расположенных на границе плоскостойкой структуры.

Цель и задачи работы

Целями и задачами диссертационной работы являются:

- 1) Разработка теории возбуждения поверхностных плазмонных и поверхностных волноводных волн ограниченными по апертуре пучками в схеме Кречмана.
- 2) Теоретическое описание эффекта Гуса-Хенхена.
- 3) Исследование методов фокусировки поверхностных плазмонных волн на поверхности металлических пленок в схеме Кречмана и проведение исследования термополевой электронной эмиссии из фокального пятна. Разработка общего теоретического описания термополевой электронной эмиссии из металла и его теплового эффекта.
- 4) Разработка теоретического метода оптимизации плоскостойких конструкций с точки зрения увеличения чувствительности оптических сенсоров с устройством по схеме Кречмана.
- 5) Разработка теории нахождения фокальных распределений электрического поля в окрестности металлических острий, в том числе, расположенных у поверхности полупространства или плоскостойкой структуры.
- 6) Нахождение строгого фундаментального решения уравнения Максвелла для задачи излучения элементарного источника тока (точечного электрического диполя), расположенного на границе, внутри или снаружи плоскостойких структур, допускающего аналитическое упрощение.
- 7) Вывод строгих закономерностей излучения в дальней зоне наноантенн, расположенных на границе плоскостойких структур.

Научная новизна

- ♦ В работе впервые обнаружена и исследована нелокальность отражения электромагнитной волны от плоской поверхности при возбуждении поверхностных волн.
- ♦ Впервые объяснен эффект Гуса-Хенхена дифракционными эффектами, возникающими при отражении ограниченного оптического пучка в схеме Кречмана.
- ♦ Впервые проведен сравнительный анализ датчиков, в которых возбуждается поверхностная волноводная волна в схеме Кречмана.

- ◆ Впервые предложен и теоретически проанализирован метод фокусировки поверхностных плазмонных волн в схеме Кречмана.
- ◆ Впервые произведена теоретическая оценка термополевой электронной эмиссии из фокального пятна на поверхности металлической пленки в схеме Кречмана.
- ◆ Впервые предложена модификация строгого теоретического метода нахождения распространения электромагнитной волны от элементарного источника тока, допускающая аналитическое упрощение.
- ◆ Впервые предложена оригинальная строгая электромагнитная теория фокусировки линзы Веселаго.
- ◆ Впервые предложено строгое фундаментальное соотношение для излучения наноантенны (антенны малой, по сравнению с минимальной длиной волны), расположенной на плоскостойкой структуре.

Научная и практическая значимость работы

Разработан набор теоретических методов исследования явлений, играющих ключевую роль в следующих физических явлениях и научно-технических направлениях:

- 1) Возбуждение поверхностных плазмонных и поверхностных волноводных волн ограниченными по апертуре пучками в схеме Кречмана.
- 2) Эффект Гуса-Хенхена.
- 3) Разработка и оптимизация сенсорных оптических систем поверхностных волн.
- 4) Излучение наноантенн, расположенных на границе сред или на границе плоскостойкой структуры.
- 5) Нанофокусировки света на вершине металлических микроострий.

Разработанные теоретические методы доведены до эффективных численных алгоритмов, отлаженных программ и аналитических результатов, которые могут быть применены для разработки практических приборов и установок.

Метод исследования

Основные методы исследований, применяемые в работе:

- 1) Строгое решение уравнений Максвелла методом разложения волны падающего светового пучка с ограниченной апертурой на плоские волны, нахождением решения для каждой плоской волны и последующим нахождением полного решения методом суперпозиции. Оказалось, что данный метод точно описывает возбуждение и распространение поверхностной плазмонной волны в схеме Кречмана. Был разработан комплекс программ для сложных плоскостойких и градиентных структур, а также для исследования

нелокальности отражения пучков при возбуждении поверхностных волн и исследования эффекта Гуса-Хенхена.

- 2) Численные методы оптимизации плоскостойких структур для наилучшего возбуждения поверхностных волн. Этими методами найдены волноводные поверхностные моды и исследована возможность их возбуждения в схеме Кречмана.
- 3) Для создания общей теории термополевой эмиссии электронов был разработан эффективный численный метод для расчета коэффициента прохождения электронов через барьер Шоттки, с помощью которого был развит численный метод нахождения плотности тока и теплового эффекта эмиссии электронов.
- 4) Был разработан аналитический метод нахождения распределения электрического поля в окрестности нановершины металлических микроострий в адекватном для этой задачи квазистатическом приближении. Разработан численный метод для решения этой задачи для случая, когда нановершина находится рядом с полуплоскостью или плоскостойкой структурой. Метод основан на разложении искомого поля по полной системе функций в параболоидальной системе координат и использовании методов отражений, коллокации и метода моментов для удовлетворения граничных условий.
- 5) Был разработан оригинальный строгий аналитический метод решения электродинамической задачи излучения элементарного источника тока, на границе, внутри или снаружи плоскостойкой структуры. Для нахождения решения было использовано двумерное разложение Фурье электромагнитных полей. Найдено решение задачи излучения элементарного источника тока в виде одномерных интегралов, допускающих быстрое численное интегрирование.
- 6) На основе строгого решения электродинамической задачи излучения элементарного источника тока, на границе, внутри или снаружи плоскостойкой структуры, методом разложения поверхностных токов на элементарные источники, были найдены строгие аналитические формулы, связывающие излучение произвольной поверхностной антенны в перпендикулярных направлениях к плоскостойкой структуре в дальней зоне.

Научные положения, выносимые на защиту.

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие новые научные физические представления и выводы:

1. Нелокальность отражения ограниченных по апертуре пучков при возбуждении поверхностных плазмонных и поверхностных волноводных волн в схеме Кречмана и эффект Гуса-Хенхена объясняется переходными явлениями на границе области падения пучка.

2. За счет сильной зависимости плотности тока термополевой эмиссии от напряженности электрического поля при фокусировке поверхностных плазмонных волн на поверхности металлических пленок в схеме Кречмана термополевая электронная эмиссия исходит из области значительно меньшего размера фокального пятна, порядка десятой части длины волны.
3. При термополевой электронной эмиссии с поверхности металла переход к необратимому разогреву происходит при достижении напряженности электрического поля критическому полю, соответствующему переходу от охлаждения к нагреву электронной эмиссией. При быстром возрастании напряженности электрического поля возникает переход верхней границы потенциального барьера Шоттки ниже уровня Ферми в металле и баллистический выход электронов из металла и происходит взрывной разогрев металла за времена порядка времени релаксации электронной температуры в металле.
4. Разрешающая способность сенсоров на поверхностных плазмонных волнах по схеме Кречмана ограничена конечным поглощением в металлической пленке. Оказалось, что разрешающая способность может быть значительно увеличена применением поверхностных волноводных волн в слое поверхностного диэлектрика с дополнительной тонкой пленкой с контролируемым поглощением. Тогда разрешающую способность сенсора можно варьировать, изменяя толщину поглощающей пленки.
5. Размер фокального распределения светового поля на вершине металлического микроострия определяется радиусом закругления его вершины, а не длиной волны света. В случае, если вершина расположена вблизи границы диэлектрика или металла, то фокальное распределение поля дополнительно зависит от расстояния от вершины микроострия до границы.
6. В приближении справедливости теории стационарной термополевой эмиссии электронов из металла существуют универсальные вольтамперные характеристики электронной эмиссии из металлических острий в подобной геометрии.
7. Диаграмма направленности элементарного диполя, расположенного на свободной границе металлической пленки, в которой может возбуждаться поверхностная волна, имеет заметные лепестки, направленные в сторону призмы под углом излучения поверхностной волны.
8. Существует универсальная закономерность излучения поверхностных антенн: отношение амплитуд электрических полей на одном и том же расстоянии от поверхностного источника тока, излучающего в противоположных направлениях, нормально к плоскостной структуре, определяется простым алгебраическим выражением, включающим электромагнитные параметры среды и толщины пленок структуры.

Достоверность результатов

Результаты работы проверялись путем сравнения с известными частными предельными аналитическими решениями, а также численными и экспериментальными результатами, имеющимися в литературе и полученными другими авторами. Это позволяет сделать вывод о достоверности представленных результатов.

Апробация результатов.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях, симпозиумах и научных семинарах:

- Семинары теоретического отдела им. Л. М. Бибермана ОИВТ РАН под руководством профессора В. С. Воробьева (ОИВТ РАН, Москва, ежегодно, дважды в год).
- Объединенный Фельдовский семинар по электродинамике под руководством профессора В. В. Шевченко (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) (Москва, 15 октября 2009 г.).
- Семинар ОИВТ РАН под руководством академика В.Е. Фортова (ОИВТ РАН, Москва, 15 марта 2010 г.).
- Семинар Теоретического отдела ИОФ РАН под руководством профессора А. А. Рухадзе (Москва, 4 декабря 2013 г. и 16 мая 2018 г.).
- Семинар Института общей физики им. А. М. Прохорова под руководством академика РАН И. А. Щербакова (Москва 27 января 2014 г.).
- American Advanced Materials Congress (AAMC 2016) Miami (USA), 04 - 09 December 2016, USA.

Личный вклад автора

Материалы диссертации основаны на личных научных публикациях автора. В двух статьях с соавторами, о работе специального вида модулятора света и оптического датчика, вклад автора настоящей диссертации заключался в участии в постановки задачи, применения развитой автором диссертации теории и интерпретации полученных результатов.

Публикации

Материалы диссертации основаны на научных публикациях автора в следующих рецензируемых журналах: «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Оптика и спектроскопия», «Квантовая электроника», «Физика плазмы», «Теплофизика высоких температур», «Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics», «IEEE Transactions on Plasma

Science». Список работ, опубликованных по теме диссертационной работы, приведен в отдельном разделе. Всего по теме диссертации опубликовано 35 печатных работ, из которых 28 статей в российских переводных рецензируемых журналах и 2 зарубежных журналах, в том числе 3 работы опубликовано в журналах «Прикладная физика» и «Успехи прикладной физики» из перечня ВАК РФ. Результаты работы использовались в двух главах монографий:

Andrey Petrin (January 1st 2010). Application of Media with Negative Refraction Index to Electromagnetic Imaging. Fundamental Aspects., Wave Propagation in Materials for Modern Applications, Ed. Andrey Petrin, IntechOpen, DOI: 10.5772/6849.

<https://www.intechopen.com/books/wave-propagation-in-materials-for-modern-applications/application-of-media-with-negative-refraction-index-to-electromagnetic-imaging-fundamental-aspects->

и

Andrey Petrin (March 16th 2011). Nanofocusing of Surface Plasmons at the Apex of Metallic Tips and at the Sharp Metallic Wedges. Importance of Electric Field Singularity, Wave Propagation, Ed. Andrey Petrin, IntechOpen, DOI: 10.5772/13907.

<https://www.intechopen.com/books/wave-propagation/nanofocusing-of-surface-plasmons-at-the-apex-of-metallic-tips-and-at-the-sharp-metallic-wedges-importance-of-electric-field-singularity-wave-propagation>

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, двенадцати глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка литературы. Работа содержит 5 таблиц и 67 рисунков. Список литературы включает 219 отечественных и иностранных работ. Полный объем работы составляет 252 страницы.

Краткое содержание диссертации

В главе 1 на основе строгого теоретического метода исследуется возбуждение поверхностной волны в схеме Кречмана. Рассмотрены дифракционные явления, связанные с ограниченным размером апертуры падающей волны. Показано, что отражение волны происходит нелокально, то есть область поверхности, на которую падает волна, и область, от которой отражается, не совпадают. Показано, что нелокальность отражения связана с возбуждением поверхностной волны. Исследуется структура и локализация максимального электрического поля поверхностной плазмонной волны на свободной поверхности металлической пленки. Предложен теоретический метод исследования дифракционных явлений при отражении плоской электромагнитной волны ограниченной апертуры от плоскостойкой структуры. Предложено объяснение эффекта Гуса-Хенхена, состоящего в раздваивании отраженного пучка при возбуждении поверхностной

плазмонной волны в схеме Кречмана. Показаны принципиальные методы создания интерференции поверхностных плазмонных волн и ограниченных областей с значительно большими полями на свободной границе пленки в схеме Кречмана. Дан сравнительный анализ чувствительности оптических датчиков на поверхностных плазмонных и волноводных волнах, возбуждаемых по схеме Кречмана. Даны рекомендации по увеличению чувствительности сенсоров на поверхностных волноводах.

В главе 2 подробно рассмотрен эффект Гуса-Хенхена. Теоретическое рассмотрение отражения ограниченного светового пучка p -поляризации с однородным распределением амплитуды по его апертуре в схеме Кречмана позволило изучить разделение отраженной волны на два расходящихся интерферирующих пучка той же поляризации. Вычисления прямо продемонстрировали большую чувствительность сенсоров на основе эффекта Гуса-Хенхена к изменению показателя преломления в тонком слое пленки воды на свободной поверхности сенсора. Подчеркнута перспективность применения квадрантных фотодиодов в качестве датчиков смещения дифракционной картины отраженной волны. Обсуждается приложение представленной теории к разработке современных оптических многоканальных биологических, химических и физических сенсорных систем.

В главе 3 на основе теории отражения плоской электромагнитной волны от плоскостойкой структуры, рассматривается возбуждение и фокусировка поверхностной плазмонной волны на свободной поверхности металлической пленки в схеме Кречмана. Предлагается метод возбуждения радиально сходящейся поверхностной плазмонной волны. Количественно исследуется распределение электрического поля в фокусе. Найдены условия оптимальной фокусировки при возбуждении системы конической волной с p -поляризацией. Найдены фокальные распределения поля на свободной поверхности металлической (серебряной) пленки и величины усиления электрического поля в фокусе.

В главе 4 на основе теории отражения плоской электромагнитной волны от плоскостойкой структуры, рассматривается возбуждение и фокусировка радиально сходящейся поверхностной плазмонной волны на свободной поверхности золотой пленки в схеме Кречмана. Количественно исследуется распределение электрического поля в окрестности фокуса на свободной поверхности пленки. На основе этого распределения и теории термополевой электронной эмиссии из металла, проведена оценка среднего по времени тока электронной эмиссии в зависимости от амплитуды нормальной составляющей электрического поля волны в центре фокального распределения. Показывается, что основная часть эмиссионного тока исходит из области вокруг центра фокуса диаметром порядка десятой части рабочей длины волны в вакууме, причем из окружающих центральный максимум дифракционных колец исходит пренебрежимо малая часть эмиссионного тока.

В главе 5 изложен общий подход к рассмотрению термоэлектронной, полевой и термополевой эмиссии электронов из металла. Для этого, в рамках стандартной модели свободных электронов в металле, предложен численный метод определения коэффициента прохождения через потенциальный барьер на границе металл-вакуум, пригодный для произвольного вида барьера. Предложенный метод расчета коэффициента прохождения свободен от приближений, основанных на методе перевала, характерных для аналитических моделей термоэлектронной эмиссии, и приближений коэффициента туннелирования через потенциальный барьер, характерных для моделей полевой эмиссии. Предложенная теория позволяет рассматривать все виды эмиссии в рамках единого подхода и для произвольных распределений потенциальной энергии электронов на границе. На основании проведенного исследования теплового эффекта эмиссии обнаружен основной спусковой механизм взрывного нагрева микроострий при подаче на них импульса высокого напряжения. Показано, что сама взрывная эмиссия начинается, когда верхняя граница потенциального барьера на вершине микроострия понижается ниже уровня Ферми в металле. Подробно приводятся методы вычислений главы 4 для оценки электронной эмиссии из фокального пятна металлической пленки.

В главе 6 исследуется нанофокусировка электромагнитной энергии оптического диапазона частот в наноразмерную пространственную область в окрестности вершины металлического микроострия (радиус закругления вершины порядка нескольких нанометров), возникающая при схождении к нему поверхностной плазмонной (в общем случае плазмонно-поляритонной) волны. Граница металла вблизи вершины приближается поверхностью параболоида вращения. Показано, что размер фокального пятна в окрестности вершины микроострия в пространственных координатах, нормированных на радиус кривизны вершины, определяется только частотой фокусируемых плазмонов. Проведено сравнение режимов фокусировки при различных частотах. Показано, что, для формирования в окрестности вершины острия фокального пятна с размером примерно равным радиусу кривизны, без заметных осцилляций фокусируемого поля, требуется ограничить сверху частоту фокусируемых плазмонов. Определено значение этой граничной частоты.

В главе 7 сначала рассмотрена фокусировка электромагнитной энергии оптического диапазона частот в наноразмерную пространственную область в окрестности нановершины металлического микроострия, расположенного вблизи диэлектрической или металлической плоскости. Предполагается, что фокусировка возникает при симметричном схождении к нановершине поверхностной плазмонной ТМ волны. Граница металла вблизи нановершины приближается поверхностью параболоида вращения. Разработан численный метод нахождения электрического поля в окрестности вершины острия на основе метода моментов. Результаты расчетов показали, что, по сравнению с одиночным острием, наличие плоскости приводит к

дополнительной концентрации электрического поля вблизи нановершины. Дано обобщение полученного решения на случай микроострия, расположенного вблизи плоскостойкой структуры, состоящей из плоских диэлектрических и/или металлических слоев. Разработан численный метод нахождения электрического поля в окрестности вершины острия, включая плоскостойкую структуру. Результаты расчетов показали, что по сравнению с одиночным острием, наличие плоскостойкой структуры может приводить к дополнительной концентрации электрического поля вблизи нановершины. Результаты расчетов показали, что главное влияние на фокусировку оказывает верхняя плёнка стойкой структуры. Отмечается, что возможные приложения полученных результатов не ограничиваются исследованием рамановского рассеяния молекул на поверхности плоскостойкой структуры. Перспективным является использование фокального наноразмерного пятна для засвечивания фоторезиста и получения, таким образом, поверхностных наноструктур, которые потом можно использовать в качестве шаблона для копирования известными методами нанолитографии (roll-to-roll nanoimprint lithography). Также отмечается, что результаты настоящей работы могут быть применены для создания наногradientных тонкопленочных структур.

В главе 8, на основе разработанных в предыдущих главах, теоретического метода нахождения электрического поля в окрестности металлического острия параболоидальной формы, расположенного у плоской металлической поверхности, и теории термополевой электронной эмиссии из металла рассмотрена задача определения тока эмиссии в зависимости от напряжения, радиуса закругления острия и расстояния между острием и проводящей плоскостью. Приводятся универсальные вольтамперные характеристики для медного острия при различных расстояниях от острия до плоскости, пригодные для количественных оценок величин токов в различных физических задачах и инженерных расчетах.

В главе 9 рассмотрена строгая теория излучения элементарного диполя, расположенного на границе или внутри плоскостойкой структуры. Для частного случая излучения диполя, расположенного на свободной границе одной пленки, продемонстрирован метод аналитического упрощения решения. Предложенный метод позволил привести выражения для излучаемых полей к одномерным интегралам, что существенно упростило анализ задачи и ускорило численные расчеты. В качестве конкретного технического приложения теории были получены диаграммы направленности точечных излучателей (молекул, наноструктур), расположенных на свободной поверхности металлической пленки в схеме Кречмана и имеющих индуцированный дипольный момент, направленный перпендикулярно поверхности пленки. Обсуждается влияние поверхностной волны на направленные свойства поверхностных излучателей. Показано, что наличие металлической пленки, в которой может возбуждаться поверхностная волна, существенно

меняет диаграмму направленности излучателя в полупространство призмы. Показана общность примененных методов исследования.

В главе 10 рассмотрена строгая теория нахождения излучения в дальней зоне элементарного диполя, расположенного на границе или внутри плоскостной структуры. Подробно рассмотрен частный случай излучения элементарного диполя, расположенного на свободной границе одной пленки, предложен эффективный метод нахождения поля излучения в дальней зоне в окружающих полупространствах. Получены диаграммы направленности точечных излучателей (молекул, наноструктур), расположенных на свободной поверхности металлической пленки в схеме Кречмана и имеющих индуцированный дипольный момент, направленный параллельно или перпендикулярно поверхности пленки. Показано, что наличие металлической пленки, в которой может возбуждаться поверхностная волна, существенно меняет диаграмму направленности излучателя в полупространство призмы, возникают интенсивные узконаправленные лепестки диаграммы направленности, связанные с возбуждающейся поверхностной волной.

В главе 11, на основе результатов главы 9, рассматривается строгая теория распространения электромагнитной волны от точечного элементарного источника тока при ее фокусировке плоским слоем, заполненным веществом с отрицательным показателем преломления (линзой Веселаго). Исследованы распределения электромагнитного поля в фокальной области и определены ее размеры. Подробно обсуждаются ключевые вопросы теории. Кроме исследования непосредственно теории линзы Веселаго, подход данной главы является примером эффективным методом исследования задачи излучения элементарного источника на поверхности плоскостной структуры с числом слоев (пленок) большим или равным двум. Развита строгая теория линзы с отрицательным преломлением (линзы Веселаго) подтверждает результаты работы автора диссертации об отсутствии в фокусе линзы Веселаго супер- или сверхразрешения [25, 26]. Причем, в отличие от предыдущих подходов автора [27, 28], этот вывод доказан и для случая идеального отрицательно преломляющего материала без поглощения. Итак, всегда в фокусе будет наблюдаться фокальное распределение с шириной приблизительно равной длине волны. Этот вывод имеет важное общетеоретическое значение.

В главе 12, на основе строгой теории излучения элементарного источника тока, расположенного на границе плоскостной структуры, рассмотрено излучение произвольного распределения поверхностного тока. Получено строгое соотношение между излучаемыми по нормали полями, порожденными произвольным распределением стороннего поверхностного тока в полупространства, окружающие плоскостную структуру. Найдена фундаментальная закономерность излучения такого источника по нормали к границе раздела. Показано, что отношение амплитуд электрических полей на одном и том же расстоянии от источника, излучающего в противоположных направлениях, нормально к плоскостной структуре,

определяется простым алгебраическим выражением, включающим электромагнитные параметры сред и толщины пленок структуры. Подробно рассмотрены два частных случая: когда излучающие поверхностные токи, расположены на границе одной пленки и когда эти токи расположены на границе двух однородных полупространств.

В Заключение приведены основные результаты выполненных исследований.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1) Петрин А. Б., Термополевая эмиссия электронов из металла и взрывная электронная эмиссия из микроострий // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. № 2. С. 369.
- 2) Петрин А. Б., Термополевая эмиссия электронов из металлических острий конической формы // Теплофизика высоких температур. 2010. V. 48: № 3. Р. 323.
- 3) Петрин А. Б., О термополевой эмиссии электронов из металлических острий // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 7. С. 671.
- 4) Petrin A. B., On the effects of electron gas viscosity on the interaction of microwave and magnetoactive plasma // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28. № 5. P. 1763.
- 5) Петрин А. Б., Точечный излучатель, параллельный плоскому слою с отрицательным показателем преломления // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. № 3(9). С. 436.
- 6) Петрин А. Б., О распространении электромагнитной волны в среде с отрицательным преломлением от точечного источника, расположенного в воздухе // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87. № 9. С. 550.
- 7) Petrin A., Application of Media with Negative Refraction Index to Electromagnetic Imaging. Fundamental Aspects., Wave Propagation in Materials for Modern Applications, Ed. Andrey Petrin, IntechOpen, 2010.
<https://www.intechopen.com/books/wave-propagation-in-materials-for-modern-applications/application-of-media-with-negative-refraction-index-to-electromagnetic-imaging-fundamental-aspects->
- 8) Петрин А. Б., О двух режимах нанофокусировки поверхностной плазмонно-поляритонной волны на вершине металлического острия // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 1. С. 18.
- 9) Petrin A., Nanofocusing of Surface Plasmons at the Apex of Metallic Tips and at the Sharp Metallic Wedges. Importance of Electric Field Singularity, Wave Propagation, Ed. Andrey Petrin, IntechOpen, 2011.
<https://www.intechopen.com/books/wave-propagation/nanofocusingof-surface-plasmons-at-the-apex-of-metallic-tips-and-at-the-sharp-metallic-wedges-impor>
- 10) Петрин А. Б., О разрешающей способности линз, изготовленных из материала с отрицательным преломлением // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 9. С. 814
- 11) Petrin A. B., On the Resolution and Superresolution of Optical Systems // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. 2014. V. 9. № 1. P. 89.
- 12) Петрин А. Б., Нанофокусировка света на вершине металлического острия // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. №3. С. 236.
- 13) Петрин А. Б., О фокусировке поверхностной плазмонной волны на вершине металлического микроострия // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 7. С. 658.

- 14) Петрин А. Б., О нанофокусировке оптической ТЕ-моды на нановершине металлического микроострия // Прикладная физика. 2016. №1. С. 11.
- 15) Петрин А. Б., О нанофокусировке света на вершине металлического микроострия, расположенного над плоскостной структурой // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 4. С. 326.
- 16) Петрин А. Б., Закономерности нанофокусировки поверхностной плазмонной волны в окрестности нановершины металлического микроострия // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 4. С. 500.
- 17) Петрин А. Б., О предельно острой фокусировке света на нановершине металлического микроострия // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 2. С. 159.
- 18) Петрин А. Б., О фокусировке света на нановершине металлического микроострия, расположенного над плоскостью диэлектрика или металла // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 9. С. 848.
- 19) Петрин А. Б., Вольпян О. Д., Сигов А. С., Оптимизация сенсоров на поверхностных волнах в плоскостных структурах // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. №5. С. 786.
- 20) Петрин А. Б., Термополевая эмиссия электронов из параболоидального металлического острия // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. № 6. С. 1005.
- 21) Петрин А. Б., Метод расчета электрического поля вблизи параболоидального металлического острия над проводящей плоскостью // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 2. С. 163.
- 22) Петрин А. Б., Вольпян О. Д., Сигов А. С., Возбуждение поверхностных волн в плоскостных структурах и разработка модуляторов света // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. №3. С. 433.
- 23) Петрин А. Б., О дифракционных явлениях в сенсорах на поверхностных волнах // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 3. С. 375.
- 24) Петрин А. Б., О возбуждении поверхностных волн световыми пучками ограниченной апертуры // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 6. С. 830.
- 25) Петрин А. Б., Нанофокусировка света на вершине металлического микроострия, расположенного вблизи многослойной тонкопленочной структуры: теория и возможные приложения // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 1. С. 20.
- 26) Петрин А. Б., О нелокальности отражения электромагнитной волны от плоской поверхности при возбуждении поверхностных волн // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. №3. С. 258.
- 27) Петрин А. Б., О фокусировке поверхностных плазмонных волн на свободной поверхности металлической пленки // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 3. С. 350.

- 28) Петрин А. Б., Об эффекте Гуса-Хенхена при наличии возбуждения поверхностных волн в схеме Кречмана // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 4. С. 654.
- 29) Петрин А. Б., Сравнительный анализ чувствительности оптических датчиков на поверхностных волнах, возбуждаемых по схеме Кречмана // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 6. С. 1051.
- 30) Петрин А. Б., Об электронной эмиссии из фокальной области симметрично сходящейся поверхностной плазмонной волны на свободной поверхности металлической пленки // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 8. С. 1179.
- 31) Петрин А. Б., Элементарный излучатель, расположенный на границе или внутри слоистой структуры // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 11. С. 1676.
- 32) Петрин А. Б., Излучение в дальней зоне элементарного излучателя, расположенного на границе плоскостойкой структуры // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 12. С. 1874.
- 33) Петрин А. Б., О теории плоской линзы из материала с отрицательным преломлением // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 1. С. 55.
- 34) Петрин А. Б., Элементарный излучатель на границе плоскостойкой структуры // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. № 1. С. 35.
- 35) Петрин А. Б., Об излучении поверхностного источника по нормали к границе полупространства и плоскостойкой структуры // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 7. С. 903.