

На правах рукописи

Евсеев Дмитрий Александрович

Направляемые волны в
планарных нанокompозитных и графеновых структурах

01.04.05 – Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ульяновск – 2020

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель: Семенцов Дмитрий Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Зюзин Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва», кафедра экспериментальной и теоретической физики, заведующий кафедрой

Безус Евгений Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Институт систем обработки изображений РАН — филиал федерального государственного учреждения (ФГУ) «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», лаборатория дифракционной оптики, научный сотрудник

Ведущая организация: Ульяновский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Защита состоится «24» апреля 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.278.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте <https://www.ulsu.ru>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан 19 марта 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.278.01,
кандидат физико-математических наук

Л.Н. Вострцова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее время значительный теоретический и практический интерес представляют поверхностные волны, которые распространяются вдоль поверхности метаматериала с гиперболическим типом дисперсии диэлектрической или магнитной проницаемости. Изучение режимов распространения поверхностных волн в таких материалах привело к возникновению нового раздела оптики, получившего название «плазмоники». Основной задачей плазмоники является определение оптимальных условий генерации, распространения и управления дисперсионными свойствами волны посредством физических и геометрических параметров исследуемой структуры. Перспективными направлениями фундаментальных и прикладных исследований в области плазмоники на данный момент являются разработка оптических компьютеров, как альтернативы полупроводниковой техники, синтез пленочных покрытий с отрицательной рефракцией для передачи изображений со сверхразрешением (преодоление критерия Рэля), создание узкополосных фильтров, поглотителей, резонаторов и поляризаторов, улучшение технических характеристик материалов для интерференционной нанолитографии, разработка маскировочных покрытий оптического диапазона [1] (предельно малая диэлектрическая проницаемость) и симуляция черных дыр [2] (предельно большая диэлектрическая проницаемость).

Плазмон-поляритоны характеризуются высокой степенью локализации энергии вблизи границы раздела сред. В свою очередь плазмон-поляритоны подразделяются на типичные и нетипичные. Их отличие заключается в направлении распространения волны по отношению направления переноса энергии вдоль поверхности раздела сред. У типичных плазмонов эти направления совпадают, а у нетипичных – они противоположны.

Для искусственных метаматериалов, поддерживающих распространение поверхностных волн, обычно характерно наличие в спектре резонансных и фотонных запрещенных зон, обусловленных физическими свойствами составных материалов структуры и их геометрическими пропорциями. Примерами таких структур могут быть металлодиэлектрические нанокомпозиты и мелкослоистые структуры «графен-диэлектрик». Графен на данный момент является одним из наиболее перспективных материалов плазмоники и фотоники, так как обладает высокой подвижностью носителей заряда, низкими омическими потерями в широком диапазоне частот и относительно простой технологией изготовления. При этом разрабатываются и иные проводящие двумерные графеноподобные материалы [3-5]. Благодаря нулевой ширине запрещенной зоны, графен может быть использован для создания узкополосных фильтров, усилителей, генераторов, работающих при комнатной температуре в широком диапазоне частот – от дальнего инфракрасного до ближнего ультрафиолетового.

В настоящее время для ряда прикладных задач уже недостаточно возможностей полупроводниковых лазерных диодов или волоконных лазеров. Необходимость генерации поверхностных плазмон-поляритонов

привела к созданию устройства, выполненного на основе графена и названного позже «спазер» [6-10]. А поскольку существует возможность генерации подобных волн, возникает необходимость исследовать структуры, в которых возможно, как распространение таких волн на достаточное расстояние, так и возможность эффективного и предсказуемого управления ими при помощи внешних воздействий [11-13]. В связи с этим важной и актуальной задачей является исследование дисперсионных характеристик собственных поверхностных мод планарных структур на основе металлodieлектрических нанокомпозитов с разными типами нановключений [14-20] и метаматериале на основе чередующихся слоев диэлектрика и графена [7, 10-13, 21-22].

Цель и задачи представляемой работы

В данной работе представлено исследование характерных особенностей распространения электромагнитных волн поверхностного и волноводного типов вдоль планарных структур. Рассмотрено распространение волн в направляющих структурах с одной и двумя границами раздела. Исследуются два типа метаматериалов: первый представляет собой металлodieлектрический нанокомпозит, второй – диэлектрик с параллельными слоями графена. Основное внимание сосредоточено на влиянии резонансной частотной дисперсии метаматериалов на дисперсионные зависимости собственных волн в них. Целью работы является изучение особенностей распространения собственных направляемых волн в неоднородных планарных структурах, выполненных на основе анизотропного металлodieлектрического нанокомпозита или метаматериала «графен-диэлектрик», заключенных между слоями диэлектриков, а также нахождение оптимальных режимов распространения собственных волн и способов эффективного управления их поведением для нужд плазмоники и фотоники.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование волновых характеристик поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося вдоль границы раздела изотропного диэлектрика и анизотропного нанокомпозита, представляющего собой диэлектрическую матрицу с включениями наночастиц серебра.
2. Исследование возможных режимов распространения (волноводных, излучательных и поверхностных мод) собственных ТЕ и ТМ волн в планарной волноводной структуре, состоящей из слоя анизотропного нанокомпозита и обкладок изотропного диэлектрика.
3. Анализ влияния химического потенциала графена на дисперсионные и волновые характеристики поверхностного плазмон-поляритона на границе изотропного диэлектрика и мелкослоистой (в пределе эффективной среды) структуры «графен-диэлектрик».

Научная новизна

1. Получены выражения для компонент тензора эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита с анизотропными по форме металлическими наночастицами. Выявлены особенности дисперсионных

зависимостей и волновых характеристик поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границы анизотропного нанокompозита и диэлектрика, связанные с формой, ориентацией, размерами и объемной долей наночастиц.

2. Выявлено существование в волноводной структуре с анизотропным нанокompозитом типичных плазмон-поляритонов ТЕ поляризации с единственным плазмонным резонансом и нетипичных плазмон-поляритонов ТМ поляризации с двумя плазмонными резонансами.

3. Аналитически и численно определено влияние физических свойств и объемной доли графена и диэлектриков в структуре «графен-диэлектрик» в рамках модели эффективной среды в длинноволновом приближении.

4. Обнаружено возникновение поверхностных и волноводных мод ТМ поляризации в тонкой планарной направляющей структуре «графен-диэлектрик» в области частот, в которой аналогичный диэлектрический волновод никаких волн не поддерживает.

Теоретическая и практическая значимость

Применение анизотропного металлодиэлектрического нанокompозита и слоистой эффективной среды «графен-диэлектрик» в качестве среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью расширяет возможности оптоэлектроники, фотоники и плазмоники по сравнению с изотропными аналогами. В частности, наличие одинаково ориентированных анизотропных наночастиц внутри нанокompозита позволяет достаточно долго существовать и распространяться внутри структуры нетипичным поверхностным плазмон-поляритонам. Помимо этого, любые анизотропные структуры способны осуществлять дополнительную селекцию собственных волн по поляризации в рабочем спектре. Наличие же изолированных друг от друга слоев графена позволяет поддерживать на каждом из слоев свой собственный наведенный внешним источником электрический потенциал, что вызывает сильную зависимость дисперсионных характеристик распространяющейся в структуре волны от его величины и знака. Этот факт позволяет эффективно перестраивать пространственное распределение электромагнитного поля волны, а также, ее групповую и фазовую скорости распространения. Основными практическими результатами являются следующие утверждения:

1. Применение анизотропного нанокompозита с металлическими наночастицами эллипсоидальной формы позволяет создать дополнительный плазмонный резонанс в дисперсионном спектре ТМ волны. Благодаря этому становится возможным существование двух типичных и одного нетипичного поверхностного плазмон-поляритона с высокой степенью замедления, длиной пробега и одинаковым направлением распространения и переноса энергии волны вдоль границы раздела сред.

2. Показано искажение спектра волноводных мод ТЕ и ТМ поляризации планарного волновода под влиянием дисперсии эффективной диэлектрической проницаемости анизотропного нанокompозита. Наличие областей аномальной дисперсии приводит сильному замедлению скорости

распространения мод вблизи резонансных частот и локализации электромагнитного поля вблизи границ раздела сред.

3. Обнаружена высокая чувствительность плазмон-поляритонов на границе диэлектрика и эффективной среды «графен диэлектрик» к диэлектрической проницаемости внешней среды, что позволяет реализовать газовые сенсоры высокой точности.

4. Установлена возможность эффективного управления частотной дисперсией проводимости графена с помощью внешнего потенциала позволяет создавать на его основе периодические высокочувствительные структуры, решающие задачи замедления, усиления и генерации поверхностных плазмон-поляритонов в широком диапазоне частот.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анизотропия металлических включений в металлодиэлектрическом нанокompозите приводит к появлению нетипичного поверхностного плазмон-поляритона ТМ поляризации на границе раздела диэлектрика и нанокompозита в диапазоне частот между двумя плазмонными резонансами структуры.

2. В волноводной структуре на основе металлодиэлектрического нанокompозита в непосредственной близости к плазмонному резонансу волноводные моды ТЕ поляризации преобразуются в поверхностные плазмон-поляритоны, амплитуда которых определяется номером моды. Для волноводных ТМ мод такое преобразование происходит на двух резонансных частотах, определяемых анизотропией нановключений.

3. На границе раздела диэлектрик - эффективная среда «графен-диэлектрик» возможно распространение поверхностного плазмон-поляритона и эффективное управление его дисперсионными и волновыми характеристиками за счет изменения химического потенциала графена внешним электрическим полем.

4. Наличие слоев графена в планарной структуре «графен-диэлектрик» позволяет формировать поверхностные волны с различной степенью локализации волновых полей в области частот, в которой волноводные моды диэлектрического планарного волновода той же толщины не реализуются.

Личный вклад автора

Совместно с научным руководителем доктором физико-математических наук, профессором Семенцовым Д.И. диссертант непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении научных результатов, разработке базовых публикаций, подготовке и представлении очных докладов на научных конференциях. Автор самостоятельно выполнял все необходимые аналитические и численные расчеты и проанализировал их.

Достоверность результатов обеспечена применением широко известных математических методов, приближений и моделей Максвелл-Гарнетта и Винера, а также правильностью предельных переходов к ранее известным результатам, не противоречащим общим физическим представлениям. Полученные в работе результаты сравнивались с

результатами работ других авторов, выполненных при решении близких по тематике задач.

Апробация работы и публикации

В ходе выполнения исследований по теме диссертации опубликовано 12 научных работ. Из них 9 работ в рецензируемых журналах из списка ВАК, 2 работы, рецензируемые в системе Scopus, а также был получен один патент на полезную модель. Основные результаты работы докладывались на 12 конференциях:

XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2015;

«III Международная конференция "Моделирование структур, строение вещества, нанотехнологии", Тула, 2016»;

«IX Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 2016»;

«XIX Всероссийская молодежная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», Ульяновск, 2016.»;

XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2017;

«II Научного форума «ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ» ТТТ-2017, Казань, 2017»;

«XIX Всероссийская молодежная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», Ульяновск, 2017.»;

XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2018;

XVI Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2018») Можайск, 2018;

XXVI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2019;

XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2019»), Можайск, 2019;

XXII Всероссийская молодежная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», Ульяновск, 2019.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, и списка литературы. Материал изложен на 138 страницах текста, содержит 72 рисунка, 289 наименований использованной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава представляет собой литературный обзор работ, посвященных распространению поверхностных плазмон-поляритонов. Дана классификация нанокомпозитов по типу материалов, типу пространственного распределения частиц, типу симметрии самих частиц, количеству различных сортов частиц, отличающихся размером и формой. Рассмотрены модели эффективной среды: мелкодисперсной смеси Ландау-Лифшица, двухкомпонентной смеси Лоуенга, модели Бруггемана и Максвелла-Гарнетта. Представлен краткий вывод дисперсионного соотношения для поверхностной волны на металлической пленке в вакууме.

Вторая глава посвящена поверхностным плазмон-поляритонам, распространяющимся вдоль границы диэлектрика и металлодиэлектрического нанокомпозита с включениями сферической или эллипсоидальной формы. Диэлектрическая проницаемость материала сферических нановключений (серебро), построенная на основе модифицированной формулы Друде

$$\varepsilon_p(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega(\gamma_0 + Av_F/a)}, \quad (1)$$

представлена на рис. 1. Здесь ω – частота распространяющейся волны, a – радиус наночастиц, $\varepsilon_0 = 5$ – вклад кристаллической решетки серебра, $\omega_p = 1.36 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ – плазменная частота серебра, $\gamma_0 = 3.3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ – параметр релаксации, характеризующий поглощение электронами энергии волны, $v_F = 1.4 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ – скорость Ферми электронов, коэффициент $A \approx 1$, определяемый деталями процесса рассеяния электронов на поверхности Ферми [13, 16, 17].

Для описания компонент тензора эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита используется формула Максвелла-Гарнетта

$$\varepsilon_{ef}^{x,y,z} = \varepsilon_m \left(1 + \frac{\eta(\varepsilon_p - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + g^{x,y,z}(1-\eta)(\varepsilon_p - \varepsilon_m)} \right), \quad (2)$$

где η – объемная доля нановключений, $\varepsilon_m = 2.25$ – диэлектрическая проницаемость материала матрицы нанокомпозита, $g = 1/3$ – фактор формы сферических наночастиц. На рис. 2 приведены частотные зависимости ε_{ef}

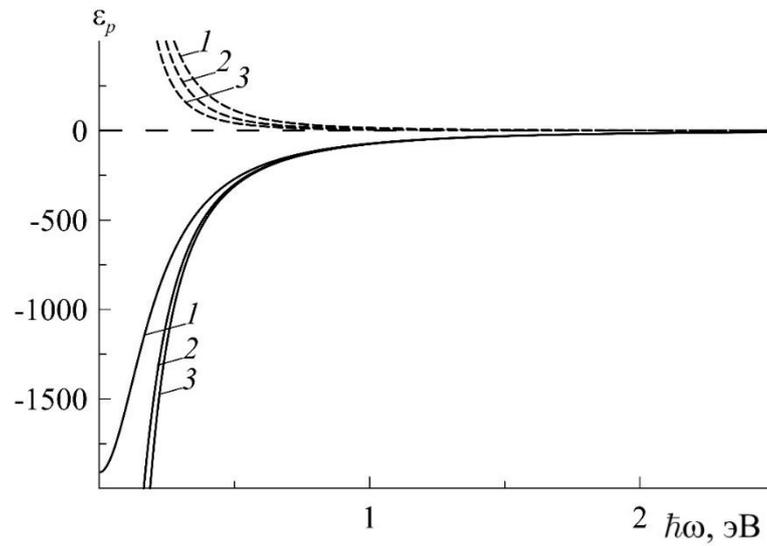


Рис. 1. Частотная зависимость действительной и мнимой части (сплошная и пунктирная линии) ДП серебра, кривые 1, 2, 3 соответствуют радиусам наночастиц $a = 5, 10, 20$ нм.

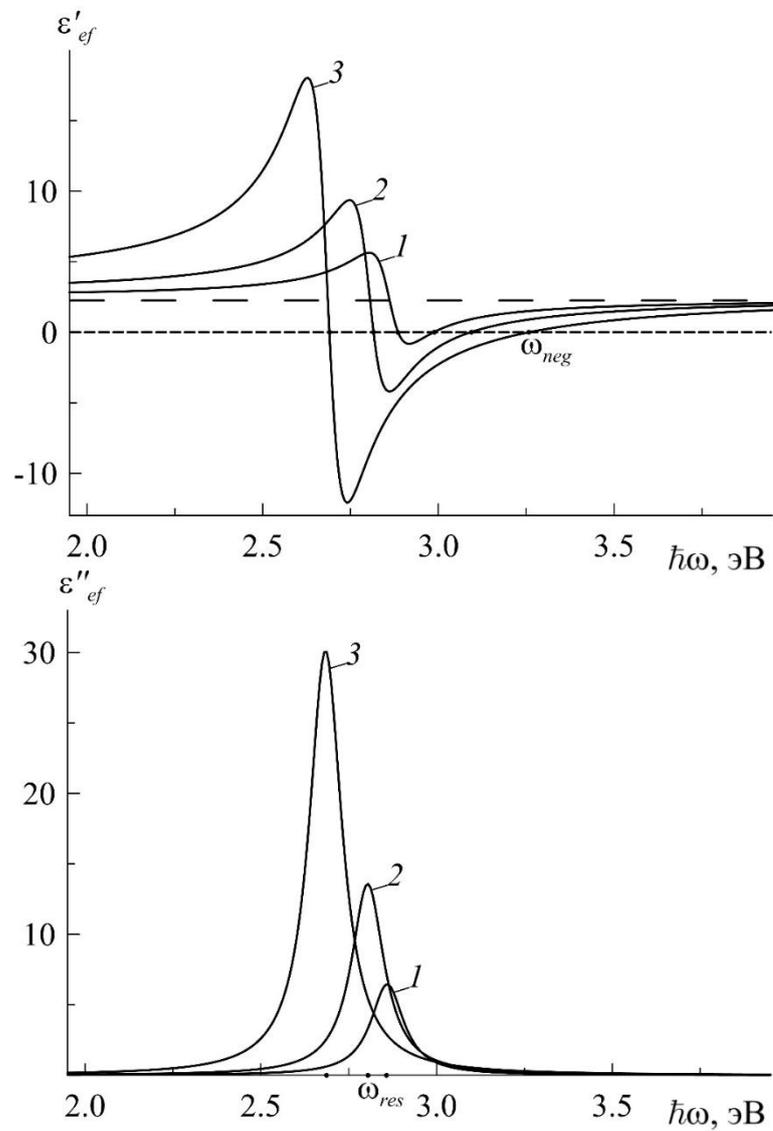


Рис. 2. Частотная зависимость действительной и мнимой частей эффективной ДП нанокompозита при объемной доле частиц $\eta = 0.5, 1, 2$ (кривые 1-3).

для случая сферических наночастиц при $\eta = 0.05 - 0.2$. Для случаев наночастиц с формой эллипсоидов вращения величина фактора формы вдоль полярной оси наночастицы определяется выражениями (3):

$$g^{(z)} = \begin{cases} \frac{1}{1-\xi^2} \left(1 - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \arcsin \sqrt{1-\xi^2} \right), & \xi < 1, \\ \frac{1}{\xi^2-1} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \ln \left(\xi + \sqrt{1-\xi^2} \right) - 1 \right), & \xi > 1, \end{cases} \quad (3)$$

где ξ – эллиптичность, а $g^{(x,y)} = (1 - g^{(z)}) / 2$ – величина фактора формы частицы вдоль ее экваториальных осей. Были проанализированы основные дисперсионные характеристики волн ТМ поляризации, распространяющихся вдоль границы изотропного нанокомпозита, такие, как: константа распространения, поперечные компоненты волнового вектора в каждой из сред, групповая, фазовая скорости и интегральная плотность потока энергии плазмон-поляритона. С применением формул (2) и (3) был проведен аналогичный анализ с учетом анизотропии эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита. Закон дисперсии для сферических и эллипсоидальных частиц имеет вид

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_c \varepsilon_p}{\varepsilon_c + \varepsilon_p}}, \quad \beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{zz} \varepsilon_c (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_c)}{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{zz} - \varepsilon_c^2}}, \quad (4)$$

где k_0 – волновой вектор в вакууме, $\varepsilon_c, \varepsilon_p$ – диэлектрические проницаемости внешней среды и металла, $\varepsilon_{\alpha\alpha}$ – соответствующие диагональные элементы тензора эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита. Были проанализированы три ориентации полярных осей наночастиц вдоль каждого из направлений декартовой системы координат. Из симметрии задачи следовало, что при ориентации полярной оси наночастиц вдоль магнитного поля анизотропия нанокомпозита не имеет значения. Для двух ориентаций наночастиц вдоль электрических полей ТМ волны было показано, что из-за различия резонансных частот наночастиц для продольного и поперечного электрического поля волны на дисперсионной кривой резонанс раздваивается и в образовавшемся частотном окне становится возможным существование нетипичных поверхностных плазмон-поляритонов, у которых направление переноса энергии совпадает с направлением распространения. Также выявлено, что при повороте наночастиц вокруг направления магнитного поля волны амплитуды и формы резонансов меняются местами.

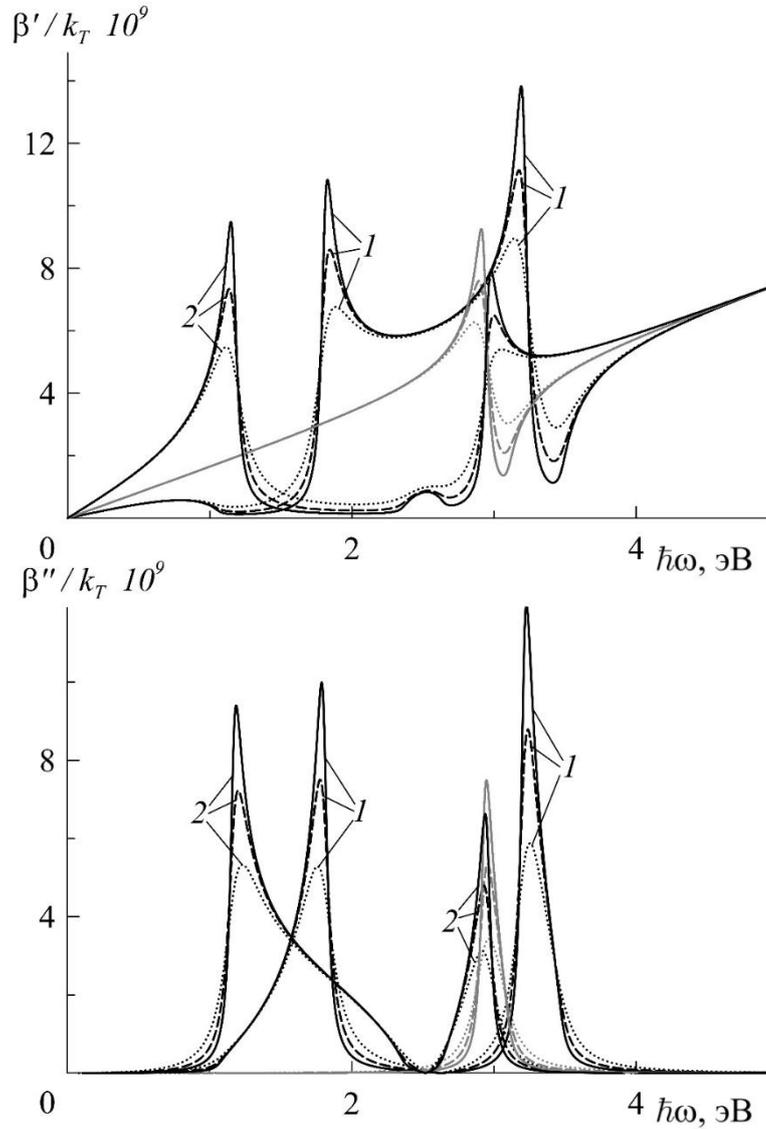


Рис. 3. Частотная зависимость действительной и мнимой части константы распространения при $\xi = 0.5, 2$ (кривые 1,2), серые кривые $\xi = 1$ и $\varepsilon_c = 3.5$.

В **третьей главе** рассмотрена структура с двумя границами раздела сред. Она представляет собой планарный волновод с диэлектрическими обкладками и металлодиэлектрическим нанокомпозитом между ними. Были получены дисперсионные соотношения для собственных ТЕ и ТМ волн направляющей структуры:

$$q_{ef}d + \pi m + \arctan\left(\frac{q_s}{q_{ef}}\right) + \arctan\left(\frac{q_c}{q_{ef}}\right) = 0, \quad TE, \quad (5)$$

$$q_{ef}d + \pi m + \arctan\left(\frac{\varepsilon_{xx}q_s}{\varepsilon_s q_{ef}}\right) + \arctan\left(\frac{\varepsilon_{xx}q_c}{\varepsilon_c q_{ef}}\right) = 0, \quad TM,$$

где d – толщина волновода, m – номер волноводной моды. Проанализирована дисперсия характеристик собственных волн планарного волновода ТЕ и ТМ поляризации. Выявлено, что изменение величины эллиптичности наночастиц ξ приводит к эффекту, аналогичному изменению ориентации или поперечного размера наночастицы. Волна ТЕ поляризации бесконечного пла-

нарного волновода имеет лишь одну компоненту электрического поля, поэтому при ориентации полярной оси эллипсоидальных наночастиц вдоль любой из декартовых осей частотные зависимости ее волновых характеристик не могут обладать одновременно двумя резонансными частотами.

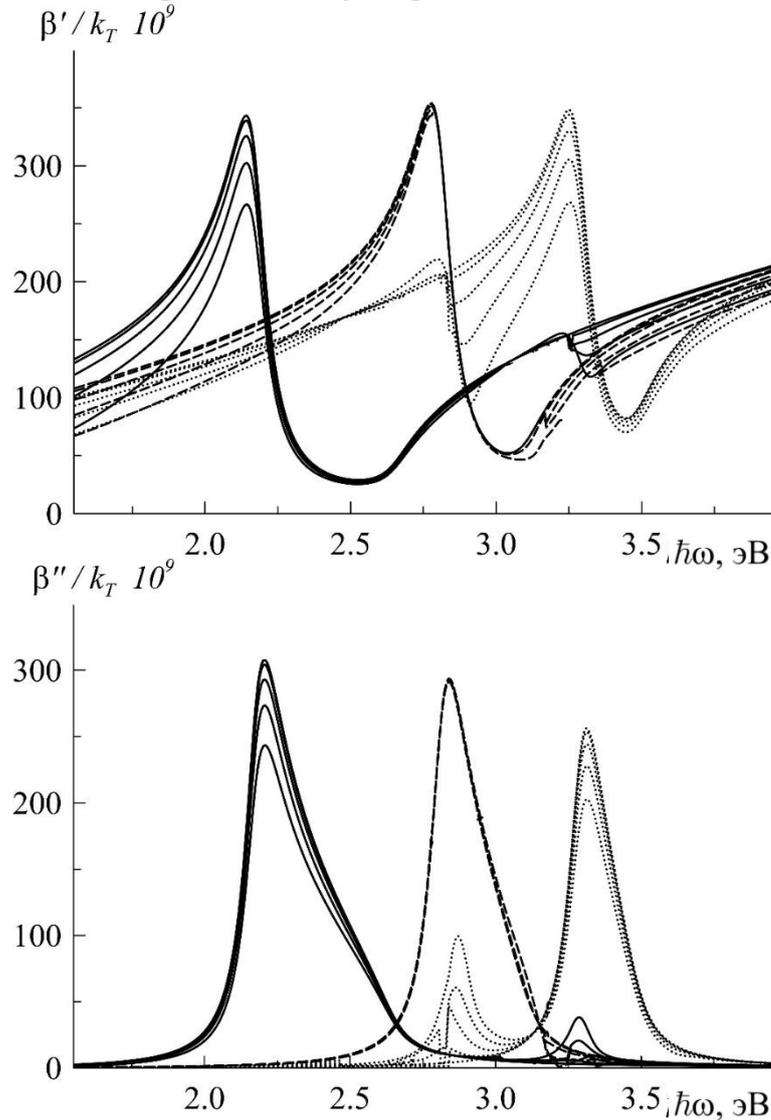


Рис. 4. Частотная зависимость действительной и мнимой части константы распространения ТМ мод планарного волновода при $\xi = 0.5, 1, 2$ (точки, пунктир, сплошная линия).

Характеристики волны ТМ поляризации, у которой электрическое поле имеет две компоненты, напротив, имеют два резонансных пика, вызванных анизотропией структуры. Исключением является ориентация полярной оси наночастиц вдоль магнитного поля волны, так как в этом случае резонансные частоты наночастиц совпадают. Из-за малости толщины направляющего слоя эффективной среды волновода резонансы, вызванные поперечной компонентой электрического поля ТМ волны, оказываются менее выраженными. В работе показано искривление дисперсионных кривых направляемых ТМ мод вблизи резонансных частот нанокомпозита и между ними.

В **четвертой главе** рассмотрено распространение собственной поверхностной ТМ моды вдоль границы диэлектрика и эффективной среды, которая представляет собой слои диэлектрика, отделенные друг от друга параллель-

ными проводящими слоями графена. Слои графена лежат в плоскостях, параллельных границе раздела эффективной среды с внешней средой. Для расчета дисперсионных свойств эффективной среды, содержащей графен, применялась формула проводимости $\sigma = \sigma_{inter} + \sigma_{intra}$, учитывающая внутризонный и межзонный вклады.

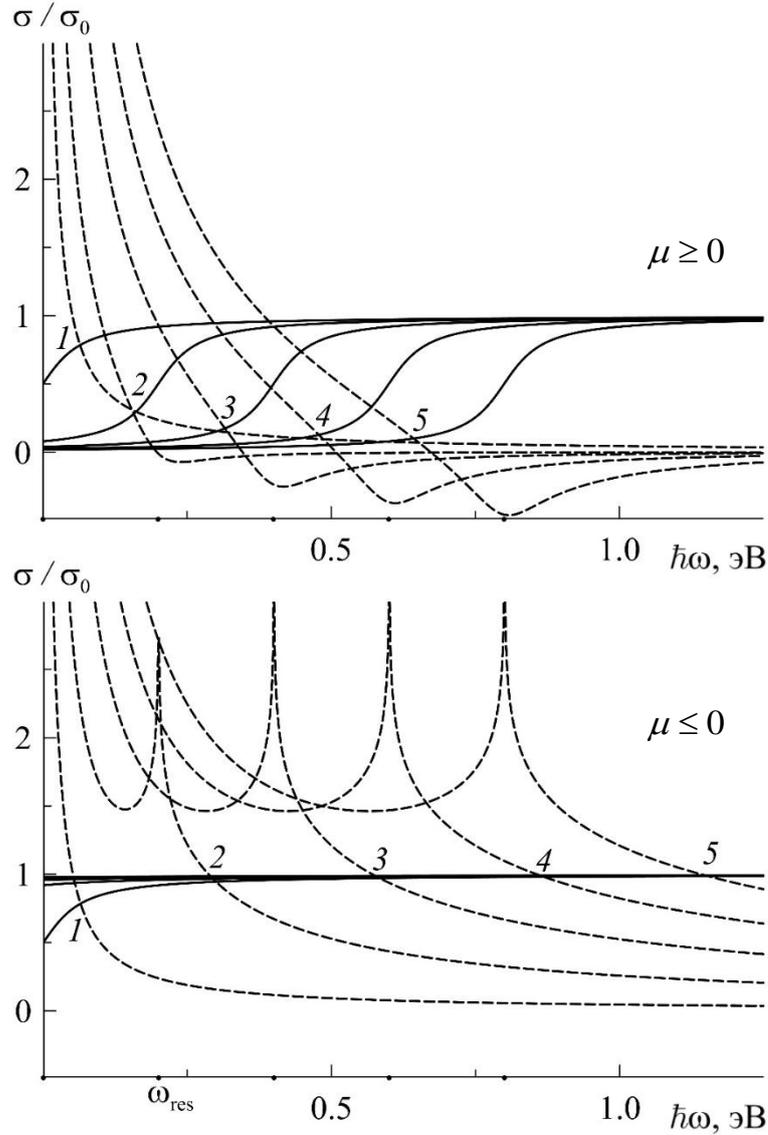


Рис. 5. Частотная зависимость реальной и мнимой части (сплошная и пунктирная линии) проводимости графена при $|\mu| = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ эВ (кривые 1-5).

На рис. 5. показана частотная зависимость проводимости монослоя графена σ , рассчитанная по формуле (6) при различной величине химического потенциала носителей заряда:

$$\frac{\sigma_{intra}}{\sigma_0} = i \frac{1}{2\pi} \frac{16k_b T}{\hbar\omega} \ln(2 \cosh(\mu / 2k_b T)),$$

$$\frac{\sigma_{inter}}{\sigma_0} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{\hbar\omega - 2\mu}{2k_b T}\right) - i \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{(\hbar\omega + 2\mu)^2}{(\hbar\omega - 2\mu)^2 + (2k_b T)^2}\right), \quad (6)$$

где $\sigma_0 = e^2 / 4\hbar$ – статическая проводимость графена, e – заряд электрона, \hbar – постоянная планка, k_b – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, ω – частота распространяющейся волны, $\mu = \hbar v_F \sqrt{\pi v_F}$ – химический потенциал носителей заряда в графене, а n_0 и v_F – концентрация носителей заряда и скорость Ферми в графене. В рамках длинноволнового приближения с применением формулы (6) получены компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости слоистого метаматериала, обладающего существенной одноосной анизотропией.

$$\varepsilon_{xx,yy} = \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_g \theta}{1 + \theta}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{(\theta + 1)\varepsilon_d \varepsilon_g}{\varepsilon_d \theta + \varepsilon_g}, \quad (7)$$

где ε_d – диэлектрическая проницаемость среды между слоями графена, θ – доля графена в эффективной среде, $\varepsilon_g = i4\pi\sigma / (\omega d_g)$ – диэлектрический вклад слоев графена, $d_g = 0.335$ нм – толщина моноатомного слоя графена, а закон дисперсии собственных волн полностью соответствует уравнению (4).

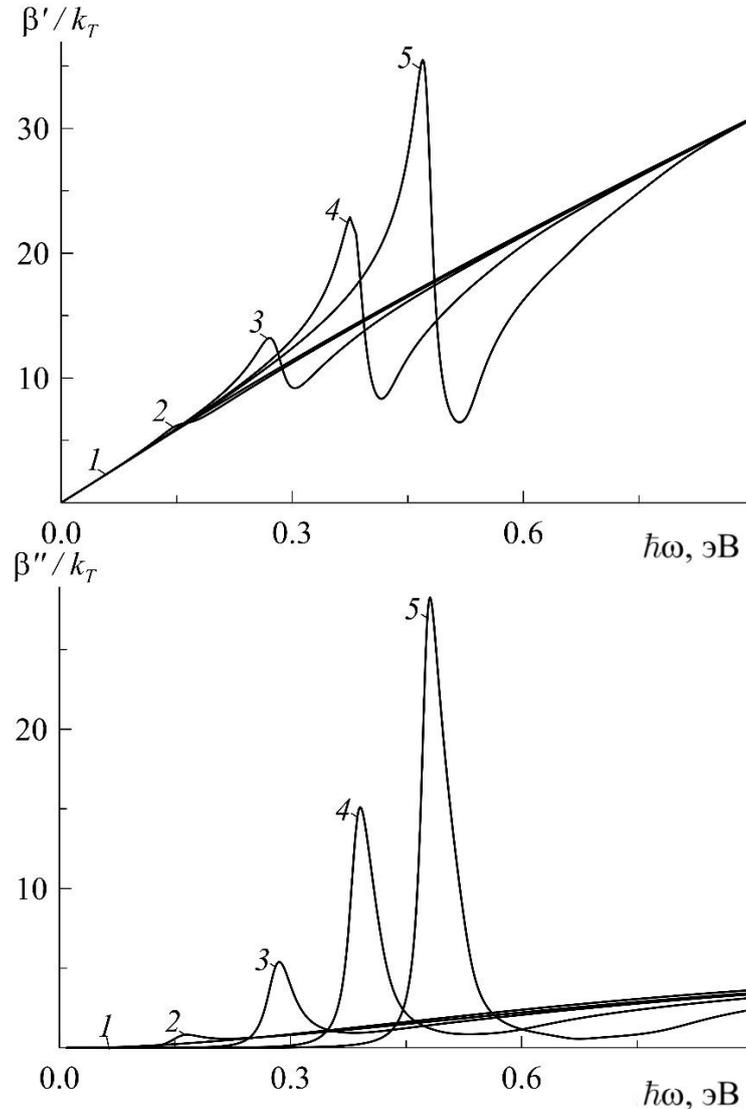


Рис. 6. Действительная и мнимая часть константы распространения поверхностной ТМ волны на границе диэлектрика и эффективной среды при различном химическом потенциале $\mu = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ эВ (кривые 1-5).

Частотная зависимость константы распространения представлена на рис. 6 при различных значениях химического потенциала графена. Также в работе проанализированы аналогичные зависимости при различных значениях диэлектрической проницаемости диэлектрика между слоями графена, покровного диэлектрика волн и при различной доле графена в эффективной среде. Для всех рассмотренных случаев показаны частотные зависимости константы распространения, поперечной компоненты волнового вектора в каждом из граничащих материалов, групповая и фазовая скорости волны, обладающие широкими областями отрицательности и сильного замедления.

В **пятой главе** рассмотрено поведение собственных волн планарного волновода со структурой «графен-диэлектрик», а также поведение собственных волн тонкого планарного диэлектрического волновода с проводящими слоями графена на границах направляющего слоя.

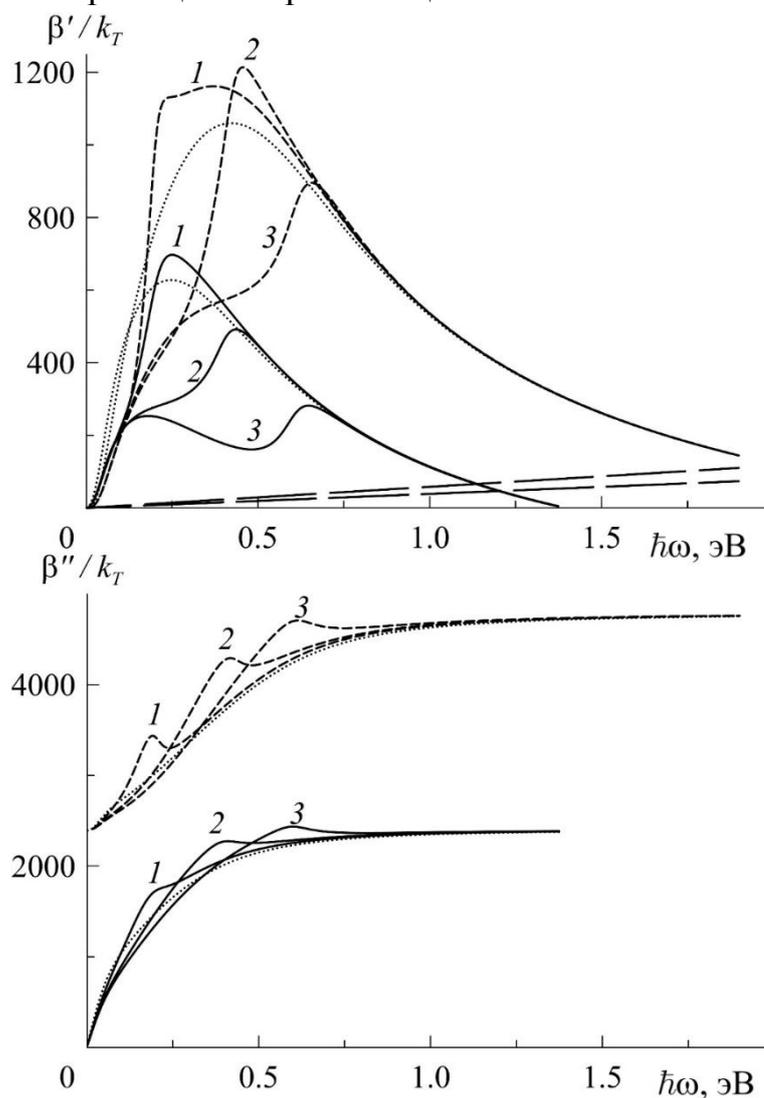


Рис. 7. Частотная зависимость реальной и мнимой части константы распространения ТМ волны тонкого планарного волновода с проводящими обкладками при одностороннем управлении $\mu_c = 0.1, 0.2, 0.3$ эВ, $\mu_s = 0$ (кривые 1-3 отражают). Пунктир отражает случай $\mu_c = \mu_s = 0$. Сплошными линиями показана симметричная мода, пунктирными – анти-симметричная.

Для волновода с эффективной средой «графен-диэлектрик» показаны зависимости дисперсионных характеристик волн от толщины волновода, степени наполненности эффективной среды слоями графена, потенциала носителей заряда в слоях графена и диэлектрической проницаемости диэлектриков снаружи и внутри структуры. Показано, что в такой структуре тип распространяющейся волны изменяется от поверхностного до волноводного как плавно, так и скачкообразно в зависимости от степени наполненности метаматериала проводящими слоями графена.

Для тонкого планарного диэлектрического волновода с проводящими обкладками был получен закон дисперсии для собственных ТМ мод с учетом поправок на проводимость границ волновода:

$$q_d d + \pi m + \arctan\left(\frac{\varepsilon_d q_s}{\varepsilon_s q_d} \left(1 + i \frac{4\pi\sigma_c q_c}{\omega\varepsilon_c}\right)\right) + \arctan\left(\frac{\varepsilon_d q_c}{\varepsilon_c q_d} \left(1 + i \frac{4\pi\sigma_s q_s}{\omega\varepsilon_s}\right)\right) = 0, \quad (8)$$

где $\sigma_{c,s}$ - поверхностные проводимости бесконечно тонких слоев графена на каждой из двух границ раздела диэлектриков. Показано существенное влияние на характеристики волн дисперсии слоев графена при малой толщине волновода и отсутствие такого влияния при ее существенном увеличении. Показаны и проанализированы различные режимы управления поведением поверхностных волн в структуре с помощью внешнего напряжения, влияющего на величину химического потенциала носителей заряда в приповерхностных слоях графена. Подробно рассмотрены режимы симметричной, несимметричной и антисимметричной величины как положительного, так и отрицательного потенциала на границах волновода.

Основные результаты и выводы:

Наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Определена зависимость частоты плазмонного резонанса поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося вдоль границы нанокompозита и диэлектрика, от характерного размера и формы нановключений, их объемной доли и диэлектрических проницаемостей серебра, матрицы нанокompозита и внешней среды. Увеличение каждого из этих параметров, кроме размера включений, приводит к возрастанию амплитуды плазмонного резонанса и уменьшению его резонансной частоты. Изменение размера наночастиц при постоянной их объемной доле не вызывает смещения резонансной частоты нанокompозита. Наличие анизотропии нанокompозита из-за одинаково ориентированных включений эллипсоидальной формы вращения («иглы» и «чешуйки») вызывает существование двух плазмонных резонансов и нетипичного поверхностного плазмон-поляритона. Разность резонансных частот и спектральная форма дисперсионной кривой определяется ориентацией оси симметрии наночастиц. Если ось симметрии частиц параллельна магнитному полю ТМ волны, раздвоение резонанса не произойдет.

2. Пленка анизотропного нанокompозита представляет собой направляющую структуру, в которой вдали от частот плазмонного резонанса

реализуются волноводные моды TE и TM поляризаций. Вблизи частот плазмонных резонансов они трансформируются в поверхностные моды, резонансная амплитуда которых зависит от номера моды. Амплитуда резонансных пиков существенно зависит от толщины волновода, и при уменьшении толщины амплитуда одного из резонансов оказывается меньше амплитуды другого. Это приводит к тому, что степень локализации и длина пробега плазмон-поляритонов на резонансных частотах существенно различаются в случае тонких слоев нанокompозита ($d \approx 2\lambda$). Если полярная ось наночастиц направлена перпендикулярно границам раздела сред, TE волны имеют одну, а TM волны - две резонансные частоты. Если диэлектрическая проницаемость матрицы нанокompозита оказывается меньше диэлектрической проницаемости внешней среды, волноводные моды в ней не реализуются, а вблизи резонансных частот возможно распространение поверхностных TE и TM плазмон-поляритонов.

3. Для плазмон-поляритона, распространяющегося вдоль границы раздела эффективной среды «графен-диэлектрик» и диэлектрика, обнаружена высокая чувствительность дисперсионных характеристик волны к изменению диэлектрических свойств граничащих сред, объемной доли в структуре слоев графена и его химическим потенциалом, что позволяет эффективно управлять волновыми характеристиками плазмон-поляритона. Величина плазменной частоты и амплитуда резонанса поверхностного плазмон-поляритона может эффективно перестраиваться за счет изменения химического потенциала графена, который связан концентрацией носителей заряда в слоях графена и управляется внешним электрическим полем (потенциалом). В зависимости от знака химического потенциала возможна реализация двух принципиально разных типов резонансов поверхностных плазмон-поляритонов.

4. Высокая проводимость графена снимает ограничение на возможность распространения в направляющей структуре «графен-диэлектрик» собственных мод поверхностного, излучательного или волноводного типов даже в случае диэлектрической пленки нанометровой толщины. Уменьшение толщины направляющей структуры приводит к возрастанию амплитуды плазмонного резонанса и степени локализации поверхностных плазмон-поляритонов, а также сильному замедлению скорости их распространения. Увеличение количества слоев графена в эффективной среде приводит к снижению амплитуды резонансного пика константы распространения и увеличению частоты резонанса. В тонком планарном волноводе слои графена поддерживают существование в длинноволновой области поверхностных плазмон-поляритонов с симметричным и антисимметричным распределением поля. Их дисперсионные кривые обладают большой амплитудой резонанса и оптическими потерями, а независимое управление химическими потенциалами графена на каждой из сторон пленки позволяет изменять спектральную форму дисперсионных кривых благодаря разности потенциалов между обкладками структуры.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Плазмон-поляритонные волны на границе диэлектрика и нанокompозита с металлическими включениями / Л. Д. Филатов, Д. Г. Санников, Д. И. Семенцов, [и др.] // Физика твердого тела. – 2014, – Т. 56, вып. 7. – С. 1372-1378. – ISSN 0367-3294. (BAK)
2. Evseev, D. A. Surface plasmon polaritons at the interface between dielectric and anisotropic nanocomposite / D. A. Evseev, D. G. Sannikov, D. I. Sementsov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2015. – Vol. 60, №2. – P. 158–165. – ISSN 1064-2269. (BAK, Scopus)
3. Evseev, D. A. Plasmon polaritons at the boundary between a dielectric and a nanocomposite with metallic inclusions / D. A. Evseev, D. I. Sementsov // The physics of metals and metallography, – 2015, – Vol. 116, № 8. P. 787–794. – ISSN 0031-918X. (BAK, Scopus)
4. Евсеев, Д. А. Поверхностные плазмон-поляритоны на границе мелкослоистой среды на основе графена / Д. А. Евсеев, Д. И. Семенцов // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, вып. 3. – С. 609-613. – ISSN 0367-3294. (BAK)
5. Евсеев, Д. А. Волноводные моды в планарной мелкослоистой структуре «графен-диэлектрик» / Д. А. Евсеев, Д. И. Семенцов // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, вып. 2, – С. 235-240. – ISSN 0030-4034. (BAK)
6. Dispersion of bulk waves in a grapheme-dielectric-graphene structure / A. S. Abramov, D. A. Evseev, I. O. Zolotovskii, [et all] // Optics and spectroscopy. – 2019. – Vol. 126, №. 2. – P. 154-160. – ISSN 0030-400X. (BAK, Scopus)
7. Abramov, A. S. Surface plasmon polaritons in a graphene–semiconductor–graphene thin film / A. S. Abramiv, D. A. Evseev, D. I. Sementsov // Physics of the solid state. – 2019. – Vol. 61, №. 8. – P. 1502-1508. – ISSN 1063-7834. (BAK, Scopus)
8. Afanas'ev, S. A. Interference of counterpropagating waves in a “graphene–dielectric” planar lamellar structure / S. A. Afanas'ev, D. A. Evseev, D. I. Sementsov // Optics and spectroscopy. – 2019. – Vol. 127, №. 3. – P. 468-474. – ISSN 0030-400X. (BAK)
9. Evseev, D.A. Dispersion of surface waves at the interface between a dielectric and a finely layered ferrite–graphene medium / D. A. Evseev, D. I. Sementsov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2019. – Vol. 64, I. 5. – P 503–509. – ISSN 1064-2269. (BAK, Scopus)
10. Evseev, D. A. Waves in a plane graphene – dielectric waveguide structure / D. A. Evseev, S. V. Eliseeva, D. I. Sementsov, // Eur. Phys. J. Appl. Phys., – 2017, – Vol. 80. – P. 10501–1–10501–6. – ISSN 1286-0042. (Scopus)
11. Abramov, A.S. Dispersion of a surface plasmon polaritons in a thin dielectric films surrounded by a two graphene layers / A. S. Abramov, D. A. Evseev, D. I. Sementsov // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2019. – Vol. 195. – P. 163105–1–163105–10. – ISSN 0030-4026.

(Scopus)

12. Патент № 189 437 Российская Федерация, МПК H01L 29/02 (2006.01), G02F1/00 (2006.01). Устройство для управления фазовой и групповой скоростью поверхностной электромагнитной волны инфракрасного диапазона на основе тонкой пленки полупроводника с графеновыми обкладками : № 2018144572 : заявл. 14.12.2018 : опубл. 22.05.2019. Бюл. № 15 / Абрамов А. С., Евсеев Д. И., Семенцов Д. И. ; заявитель УлГУ. – 9 с. – Текст : непосредственный.

Цитируемая литература

1. Designs for optical cloaking with high-order transformations / W. Cai, U. K. Chettiar, A. V. Kildishev, [et al.] // *Optics express*. – 2008. – Т/ 8, Vol. 16. – P. 5444–5452. – ISSN 1094-4087.
2. Narimanov, E. E. Optical black hole: Broadband omnidirectional light absorber / E. E. Narimanov, A. V. Kildishev // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95. – P. 041106-1–041106-3 – ISSN 0003-6951.
3. Enhanced valley splitting in monolayer WSe₂ due to magnetic exchange field / C. Zhao, T. Norden, P. Zhang, [et al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2017. – Vol. 12, № 8. – P. 757–762. – ISSN 1748-3395.
4. Gate-induced superconductivity in a monolayer topological insulator / E. Sajadi, T. Palomaki, Z. Fei, [et al.] // *Science*. – 2018. – Vol. 362, № 6417. – P. 922–925. – ISSN 1095-9203.
5. Large area planar stanene epitaxially grown on Ag(1 1 1) / J. Yuhara, Y. Fujii, K. Nishino, [et al.] // *2D Materials*. – 2018. – Vol. 2, № 5. – P 025002–1–025002–8. – ISSN 2053-1583.
6. A room-temperature semiconductor spaser operating near 15 μm / R. A. Flynn, C. S. Kim, I. Vurgaftman, [et al.] // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19, № 9. – P. 8954-8961. – ISSN 1094-4087.
7. Apalkov, V. Proposed graphene nanospaser / V. Apalkov, M. I. Stockman // *Light: Science and Applications*. – 2014. № 3. – P. 1–6. – ISSN 2047-7538.
8. Spaser as a biological probe / E. I. Galanzha, R. Weingold, D. A. Nedosekin, [et al.] // *Nature Communications*. – 2017. Vol. 8. – P. 1–7. – ISSN 2041-1723.
9. Stockman, M. I. The spaser as a nanoscale quantum generator and ultrafast amplifier / M. I. Stockman // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2010. – Vol. 12, № 2. – P. 024004–1–024004–13. – ISSN 1464-4258.
10. Terahertz lasers based on optically pumped multiple graphene structures with slot-line and dielectric waveguides / V. Ryzhii, A. A. Dubinov, T. Otsuji, [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 107, № 5. – P. 1–5. – ISSN 0021-8979.
11. Плазмоны в волноводных структурах из двух слоев графена / П. И. Буслаев, И. В. Иорш, И. В. Шадривов, [и др.] // *Письма в Журнал экспериментальной и технической физики*. – 2013. – Т. 97, вып. 9. – С. 619–623. – ISSN 0370-274X.

12. Berman, O. L. Graphene-based one-dimensional photonic crystal / O. L. Berman, R. Y. Kezerashvili // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2012. – Vol. 24, № 1. – P. 015305. – ISSN 0953-8984.
13. Falkovsky, L.A. Optical properties of graphene / L. A. Falkovsky // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2008. – Vol. 129. – P. 012004. – ISSN 1742-6588.
14. Лавров, И. В. Оптические свойства текстурированных наноконструкций с металлическими эллипсоидальными включениями / И. В. Лавров, М. И. Завгородняя // *Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России*. – 2013. № 3. – С. 48–55. – ISSN 1729-6552.
15. Моисеев, С. Г. Оптические свойства композитной среды Максвелла-Гарнета с серебряными включениями несферической формы / С. Г. Моисеев // *Известия вузов. Физика*. – 2009. № 11. – С. 7–12. – ISSN 0021-3411.
16. Моисеева, Н. М. Расчёт собственных волн планарного анизотропного волновода для различных положений оптической оси / Н. М. Моисеева // *Компьютерная оптика*. – 2013. Т. 37, № 1. – С. 13–18. – ISSN 0134-2452.
17. О модели эффективной среды для частиц со сложной структурой / Л.А. Апресян, Д.В. Власов, Д.А. Задорин [и др.] // *Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 87, вып. 1. – С. 10. – ISSN 0044-4642.
18. Санников, Д. Г. Поверхностные поляритоны в системе диэлектрик-анизотропный наноконструктив / Д. Г. Санников, Д. И. Семенцов, Л. Д. Филатов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1033–1038. – ISSN 0368-7147.
19. Koledintseva, M.Y. Maxwell Garnett rule for dielectric mixtures with statistically distributed orientations of inclusions / M. Y. Koledintseva, R. E. DuBroff, R. W. Schwartz // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2009. – Vol. 99. – P. 131–148. – ISSN 1070-4698.
20. Sehmi, H.S. Optimizing the Drude-Lorentz model for material permittivity: Method, program, and examples for gold, silver, and copper / H. S. Sehmi, W. Langbein, E. A. Muljarov // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. – 2017. – Vol. 95, № 11. – P. 1–9. – ISSN 2469-9950.
21. Voltage-controlled surface plasmon-polaritons in double graphene layer structures / D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 113, № 5. – P. 17–22. – ISSN 0021-8979.
22. Multilayer graphene waveguides / D. A. Smirnova, I. V. Iorsh, I. V. Shadrivov, [et al.] // *Pis'ma v ZhETF*. – 2014. – Vol. 99, № 8. – P. 527–531. – ISSN 0370-274X.