

УТВЕРЖДАЮ



Директор Ульяновского филиала
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской
академии наук, д.т.н., профессор
В.А. Сергеев
« 27 » 05 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Евсеева Дмитрия Александровича «Направляемые волны в планарных нанокompозитных и графеновых структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 «Оптика»

Актуальность работы

Диссертационная работа Д.А.Евсеева посвящена изучению дисперсионных свойств поверхностных плазмон-поляритонных волн в планарных нанокompозитных и графеновых структурах.

В настоящее время существует большой интерес к изучению свойств поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) – коллективных электрон-фотонных возбуждений на границе проводящих сред. ППП находят применение в субволновой оптике и нано-фотонике, оптических переключателях, оптическом манипулировании, химических и биосенсорах и других элементах. Применение ППП основывается на малости их длины волны по сравнению с длиной волны в вакууме, сильной зависимости их дисперсионных свойств от параметров окружающей среды и сильной локализации поля вблизи поверхности.

Известно, что свойства ППП могут регулироваться путем использования специально подобранных металл-диэлектрических нанокompозитов с периодическим или случайным расположением включений. Изучение возможности изменения и контроля свойств ППП путем изменения параметров нановключений является актуальной задачей. Диссертационная работа Д.А.Евсеева рассматривает один из случаев такого контроля путем изменения в том числе и формы нановключений.

Активную область исследований составляют исследования ППП на поверхности графеновых структур. Отлаженная технология переноса графеновых пленок на различные подложки стимулировала исследования по разработке плазмонных структур на основе графена с уникальными свойствами. Логичным развитием исследований по распространению ППП в монослоях графена является исследование многослойных графеновых структур, что и рассматривается в диссертационной работе Д.А.Евсеева.

Из вышесказанного следует, что тематика диссертации Д.А. Евсеева является актуальной.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка литературы. Объём работы составляет 138 страницы, включая 72 рисунка, 46 формул и списка литературы из 289 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранного направления исследования, формулируется цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, излагаются научные положения, выносимые на защиту, а также список конференций и опубликованных статей.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу известных из литературы сведений об оптических свойствах металлодиэлектрических нанокompозитов различных типов и описанию модели поверхностной проводимости графена. Приведен вывод формулы эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозита для случая равномерно распределенных сферических нановключений. Показан вывод закона дисперсии для поверхностной моды на поверхности металлической пленки.

Вторая глава посвящена исследованию частотных характеристик поверхностного плазмон-поляритона, который распространяется вдоль границы диэлектрика и металлодиэлектрического нанокompозита с анизотропными включениями. Рассмотрены несколько частных случаев ориентации наночастиц металлодиэлектрического нанокompозита. Исследовано влияние материальных характеристик диэлектрика и нанокompозита на частоту и амплитуду плазмонного резонанса структуры. Выявлено, что одинаково ориентированные наночастицы анизотропной формы вызывают возникновение двух плазмонных резонансов, если магнитное поле ТМ плазмон-поляритона не совпадает с осью анизотропии структуры. Результаты проведенного моделирования показывают, как изменяется вид дисперсионных кривых поверхностного плазмон-поляритона на границе нанокompозита с наночастицами эллипсоидальной формы тел вращения.

В **третьей главе** представлены результаты компьютерного моделирования закона дисперсии собственных мод планарного волновода с диэлектрическими обкладками и анизотропным нанокompозитом. Наночастицы по условию рассмотренной задачи имели одинаковую ориентацию, ось симметрии наночастиц предполагалась перпендикулярной границе раздела сред. Представлены частотные зависимости дисперсионных кривых собственных волн структуры ТЕ и ТМ поляризации. Показано, что при рассмотренной ориентации наночастиц их анизотропия не оказывает влияния на дисперсию волн ТЕ поляризации, а дополнительный резонанс волн ТМ поляризации имеет малую амплитуду.

В **четвертой главе** рассмотрено распространение ТМ волны вдоль границы диэлектрика и эффективной среды «графен-диэлектрик». Эффективная среда представляет собой диэлектрические пленки, отделенные друг от друга слоями графена. Ось анизотропии структуры перпендикулярна границе раздела среды с внешним диэлектриком. Кроме влияния геометрических и материальных свойств материалов, подробно исследовано воздействие на поведение собственных волн величины химического потенциала носителей заряда в монослоях графена. Приведены результаты численного анализа и выявлена высокая чувствительность характеристик ТМ волн структуры к диэлектрической проницаемости внешней среды и знаку внешнего электрического потенциала. Выявлено существенное различие формы резонансных линий структуры от знака внешнего потенциала, а также существенный рост амплитуды и частоты резонанса при увеличении абсолютного значения внешнего потенциала.

В пятой главе рассмотрена планарная структура на основе слоев графена, аналогичная плоскому волноводу на основе эффективной среды "графен-диэлектрик", заключенной между полубесконечными диэлектрическими обкладками. Рассмотрены собственные моды структуры и проанализированы частотные зависимости основных характеристик волн. Также в главе подробно рассмотрен случай независимого управления внешним электрическим потенциалом каждой из обкладок тонкого диэлектрического волновода. Выявлены существование поверхностных плазмон-поляритонов в рассмотренной структуре и возможность управления амплитудой и спектральной формой резонансного пика.

В заключении приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы содержит обширную и достаточную библиографию по тематике диссертации.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. В диссертации впервые получены выражения для компонент тензора эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозита с анизотропными по форме металлическими наночастицами. При этом 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. Установлено существование в волноводной структуре с анизотропным нанокompозитом типичных плазмон-поляритонов TE поляризации с единственным плазмонным резонансом и нетипичных плазмон-поляритонов TM поляризации с двумя плазмонными резонансами.

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

Научная и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Применение анизотропного нанокompозита с металлическими наночастицами эллипсоидальной формы («иглы» и «чешуйки») позволяет создать дополнительный плазмонный резонанс в дисперсионном спектре TM волны.

2. Условия и режимы появления нетипичного ППП TM поляризации на границе раздела диэлектрика и нанокompозита с анизотропными включениями расширяют и дополняют представления о физических процессах в нанокompозитных структурах. Возможной перспективной областью применения обнаруженных эффектов могут быть медико-биологические (например, воздействие плазмонных волн на внутриклеточные структуры для клеток на подложке) и другие приложения микрофлюидики.

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 высокочувствительные структуры, решающие задачи замедления, усиления и генерации поверхностных плазмон-поляритонов в широком диапазоне частот.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается использованием общепринятых методов исследования, стандартных пакетов программ численного моделирования, а также использованием общепринятых моделей Максвелл-Гарнетта и Винера для описания оптических свойств метаматериалов. Полученные в работе результаты хорошо согласуются с работами других авторов, выполненных при решении близких по тематике задач.

Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором

Основные результаты исследований опубликованы в 12 работах, из которых 9 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 работы в журналах, индексируемых реферативной базой данных Scopus и 1 патент РФ на полезную модель, а также представлены 12 докладов на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы Евсеева Д.А. можно рекомендовать для использования в таких организациях как Национальный исследовательский университет ИТМО (г. Санкт-Петербург); Московский физико-технический институт; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург); ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), Ульяновский государственный университет и в других научных организациях и вузах России.

Замечания по диссертационной работе:

1. Текст диссертации перенасыщен графиками дисперсионных кривых для множества частных случаев. Основной упор должен был быть сделан на подробный анализ полученных зависимостей, выявление закономерностей и разработку рекомендации по наиболее эффективному использованию предлагаемых структур. Не обсуждается и согласие (отличие) теоретических предсказаний с имеющимися многочисленными экспериментальными данными по наблюдению ППП на поверхности композитных или графен-диэлектрических сред.

2. Диссертант упоминает многочисленные применения поверхностных плазмонных волн: создание узкополосных фильтров, поглотителей и других оптических компонент, применения в интерференционной литографии и т.д. Однако в самой диссертации совершенно нет указаний и рекомендаций для выбора наилучших параметров для этих приложений. В этом случае, исследователи, заинтересованные в возможном применении разработанных структур, просто не смогут применить результаты диссертационного исследования для своих задач.

3. Заявленная высокая чувствительность плазмон-поляритонов на границе диэлектрика и эффективной среды «графен диэлектрик» не анализировалась. Какого рода изменения диэлектрической проницаемости внешней среды можно детектировать?

4. Заявленные как основной результат работы нетипичные ППП не обсуждаются и не анализируются, а упоминаются в основном тексте диссертации буквально в одном предложении.

Представленные замечания, тем не менее, не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Евсеева Д.А. содержит значимые научные результаты по специальности 01.04.05 «Оптика».

В целом, диссертационная работа Евсеева Д.А. является законченным исследованием, в котором решена актуальная задача определения эффективных способов управления характеристиками поверхностных плазмон-поляритонов на границе метаматериалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью. По объему и научному уровню полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Евсеев Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании секции Ученого совета УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 25 марта 2020 года, протокол № 3.

Ученый секретарь, к.т.н.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Тел.: (842) 244-29-96

E-mail: a-tchertor@yandex.ru

А.А. Черторийский

Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Тел.: (842) 244-29-96

E-mail: ssukhov@ulireran.ru

С.В. Сухов

Адрес: 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2, Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).