

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).