

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Безуса Евгения Анатольевича на диссертационную работу Евсеева Дмитрия Александровича «Направляемые волны в планарных нанокompозитных и графеновых структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 — «Оптика»

(Диссертационный совет Д 212.278.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»)

### **1. Актуальность работы**

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся в анизотропных средах с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Рассматривалось распространение плазмон-поляритонов в таких материалах, как металлодиэлектрический нанокompозит и эффективная среда «графен-диэлектрик».

Поверхностные электромагнитные волны представляют значительный интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. Изучение свойств таких волн, распространяющихся в металлодиэлектрических структурах, привело к возникновению нового раздела современной фотоники — плазмоники. Это связано не только с фундаментальным интересом, но и с наличием широких перспектив создания устройств оптоэлектроники на основе поверхностных волн. Поверхностные плазмон-поляритоны в метаматериалах и композитных средах активно исследуются на протяжении последних двадцати лет в связи с задачами генерации и управления излучением в широком частотном диапазоне. Большая значимость поверхностных волн обусловлена высокой степенью локализации энергии поля волны на границе раздела сред. Это приводит к усилению ряда оптических эффектов и позволяет эффективно управлять электромагнитным

излучением. Также высокая локализация поля вблизи границ раздела, значительно более сильная по сравнению с вакуумом, позволяет эффективно связывать оптические элементы и устройства электроники.

Развитие технологий на основе плазмон-поляритонов постепенно приводит к миниатюризации вычислительной техники на основе оптических логических элементов, а также созданию малых высокочастотных антенн с высокой энергетической эффективностью. Использование направляющих структур для возбуждения плазмон-поляритонов позволяет значительно улучшить характеристики устройств оптоэлектроники, таких, как датчики, переключатели и поляризаторы. Применение поверхностных плазмон-поляритонов представляет значительный интерес в области разработок модуляторов света и биосенсоров. В связи с этим теоретическое исследование взаимодействия электромагнитных поверхностных волн с метаматериалами, в качестве которых выступают металлодиэлектрический нанокомпозит и эффективная среда «графен-диэлектрик» имеющие частотную область отрицательности диэлектрической проницаемости, является важной и актуальной задачей в настоящее время.

## **2. Структура работы**

Диссертация Евсеева Д.А. состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Текст диссертации включает 138 страниц машинописного текста, 72 рисунка и список из 289 библиографических наименований цитируемой литературы.

Во введении раскрыта актуальность выбранного направления исследования, сформулированы цель и задачи работы. Приведены положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость диссертационного исследования, а также список опубликованных работ и конференций, на которых были представлены полученные результаты.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертационной работы. Приведен анализ современного состояния исследований по тематике, близкой к тематике диссертационной работы.

Описаны используемые в работе приближения Максвелл-Гарнетта и Винера, а также рассмотрена задача о распространении поверхностного плазмон-поляритона на поверхности металлической пленки.

Во второй главе подробно исследованы частотные характеристики поверхностного плазмон-поляритона, который распространяется вдоль границы диэлектрика и металлодиэлектрического нанокompозита. Представлен анализ для трех разных типов нанокompозитов, отличающихся формой и ориентацией наночастиц. На основании решения линейной задачи, показано 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 направление вектора напряженности магнитного поля ТМ-поляризованного 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.

В третьей главе исследована дисперсия собственных волн планарного волновода с диэлектрическими обкладками и анизотропным нанокompозитом. Наночастицы, по условию рассмотренной задачи, имеют одинаковую ориентацию, ось симметрии наночастиц предполагается перпендикулярной границе раздела сред. Показана дисперсия собственных волн структуры ТЕ- и ТМ-поляризации. При данной ориентации наночастиц их анизотропия не оказывает влияние на дисперсию волн ТЕ-поляризации, а дополнительный резонанс волн ТМ-поляризации оказывается мал.

В четвертой главе рассмотрено распространение ТМ-волны вдоль границы диэлектрика и «эффективной» среды (среды, описываемой эффективными материальными параметрами) «графен-диэлектрик». Эффективная среда представляет собой диэлектрические пленки, отделенные друг от друга параллельными слоями графена. Ось анизотропии структуры

перпендикулярна границе раздела среды с внешним диэлектриком. Помимо влияния геометрических и материальных свойств материалов, подробно исследовано воздействие на поведение собственных волн структуры постоянного внешнего электрического потенциала, вызывающего изменение величины химического потенциала носителей заряда в монослоях графена. Приведены результаты численного анализа и выявлена высокая чувствительность характеристик ТМ-поляризованных волн структуры к диэлектрической проницаемости внешней среды и знаку внешнего электрического потенциала. Выявлено существенное различие формы резонансных пиков 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 плоскопараллельному 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.

### **3. Научная новизна работы**

В работе получены следующие новые результаты:

1. В рассмотренной модели Максвелла-Гарнетта учтено влияние анизотропии формы наночастиц при условии, что они одинаково ориентированы в пространстве. Для поверхностного плазмон-поляритона на границе диэлектрика и анизотропного нанокомпозита показана и исследована связь характеристик плазмон-поляритона с материальными и геометрическими параметрами наночастиц и матрицы.

2. Обнаружено возникновение дополнительного плазмонного резонанса на дисперсионной кривой поверхностной волны ТМ-поляризации при выраженной анизотропии наночастиц в планарных структурах с одной и двумя границами раздела сред. Для ТЕ-мод волноводных структур показана невозможность появления дополнительного резонанса в рассмотренных геометриях.

3. Проанализировано влияние геометрических и материальных параметров эффективной среды «графен-диэлектрик» на поведение поверхностной волны на ее границе. Выявлены способы эффективного контроля параметров структуры с помощью измерений резонансной частоты и амплитуды резонансных пиков.

4. Показано наличие как поверхностных, так и волноводных мод многослойной структуры «графен-диэлектрик» в низкочастотной области спектра, в которой обыкновенный диэлектрический волновод локализованных мод не поддерживает.

#### **4. Теоретическая и практическая значимость**

Диссертационная работа Евсеева Д.А. содержит ряд новых научных результатов. На основании решения краевой задачи изучены характеристики поверхностных плазмон поляритонов на границе раздела диэлектрика и метаматериала с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Автор исследовал влияние материальных и геометрических характеристик металлодиэлектрического нанокompозита и эффективной среды «графен-диэлектрик» на поведение собственных волн систем с одной и двумя плоскими бесконечными границами. Представлены обширные результаты численного моделирования, которые качественно согласуются с теоретическими и экспериментальными работами других авторов. В работе продемонстрирована и теоретически обоснована целесообразность использования анизотропных метаматериалов на основе металлодиэлектрических нанокompозитов и мелкослоистых структур со слоями графена для эффективного управления дисперсионными и энергетическими характеристиками поверхностной волны,

что крайне востребовано для увеличения степени локализации энергии излучения в устройствах плазмоники.

Результаты диссертационного исследования представляют интерес для разработчиков устройств малогабаритных лазеров и систем телекоммуникаций. Предложенные в диссертационном исследовании метаматериалы позволяют создавать на их основе маломощные генераторы с заданной рабочей частотой излучения, что позволит построить вычислительные устройства, работающие на основе взаимодействия поверхностных плазмон-поляритонов с носителями заряда в веществе. Уменьшение числа необходимых компонент устройства и увеличение скорости передачи данных между соседними элементами системы приведет к уменьшению габаритов и увеличению общей скорости работы таких компьютеров.

Полученные в работе результаты, а также исследованные способы управления поверхностными плазмон-поляритонами представляют особый интерес в таких областях как нелинейная и волоконная оптика, наноплазмоника, оптика фотонных кристаллов и др.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований подтверждается корректным использованием общепризнанных теоретических моделей и математических приближений. Полученные в диссертации результаты хорошо согласуются с результатами других авторов.

Полученные Евсеевым Д.А. научные и практические результаты соответствуют п. п. 1, 2, 3 паспорта специальности 01.04.05 – «Оптика».

#### **5. Замечания**

Несмотря на общую положительную оценку работы, к ней имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Автору следовало бы провести сравнение длины пробега и глубин залегания полей распространяющихся в структурах волн с характерными размерами этих структур для более информативного представления полученных результатов.
2. Полученные в работе результаты носят частный характер. Было бы полезным построение и исследование функциональных зависимостей исследуемых характеристик поверхностных плазмон-поляритонов от материальных параметров структуры для выявления наиболее удачных комбинаций параметров для прикладных задач.
3. Несмотря на то, что работа носит теоретический характер, был бы полезным комментарий по поводу изготовления рассматриваемых структур (как принципиальной возможности, так и конкретных технологических подходов: в частности, возможности и методов изготовления нанокompозитов с обеспечением одинакового размера и ориентации металлических наночастиц, а также слоистых структур с чередующимися слоями диэлектрика и графена).
4. В части работы, относящейся к структурам, содержащим нанокompозитный слой с металлическими наночастицами, применяется следующий подход к описанию собственных мод: сначала на основе теории эффективной среды находят эффективные материальные параметры, а затем они используются в соответствующих дисперсионных соотношениях. Верифицировались ли каким-то образом полученные результаты (свойства волноводных мод исследуемых структур), например, с помощью численного моделирования в рамках строгой электромагнитной теории дифракции?
5. Дисперсионные кривые обычных поверхностных плазмон-поляритонов имеют смысл тогда, когда знаки диэлектрических проницаемостей материалов с разных сторон от границы раздела различны (в противном случае получается выражение, описывающее

угол Брюстера). Рассматриваемые в главе 2 нанокomпозиты имеют область отрицательных значений эффективной диэлектрической проницаемости, однако приведенные графики, характеризующие свойства мод, построены (и анализируются) в более широком диапазоне параметров. Следовало бы более явно описать, какой смысл имеют приведенные дисперсионные кривые вне области отрицательности эффективной диэлектрической проницаемости нанокomпозитной среды.

6. Работа изобилует мелкими языковыми ошибками (неточностями) и опечатками (приведу лишь несколько характерных примеров: стр. 7: «Основными практическими результатам являются»; стр. 14: «в подробно рассматриваются» (пропущена ссылка); стр. 15: «и в тот же нанокomпозит будет представлять собой»; стр. 32: «волны Циннке-Зоммерфельда» (должно быть «Ценнека»); подпись к рис. 3 и рис. 9–11:  $\eta = 0.5, 1, 2$  (должно быть  $\eta = 0.05, 0.1, 0.2$ ); заголовки подразделов 2.3.2 и 2.3.3: «распростанения» и «расространения»; стр. 110: «для полоительного значениях химического потенциала»; наконец, на протяжении всей работы попеременно с термином «действительная часть» используется калька с англ. «реальная часть»).

Тем не менее, указанные замечания и недостатки не меняют общего положительного впечатления от диссертации и не снижают ценности полученных результатов. Диссертация Евсеева Д.А. является законченным научным трудом, в котором изложен подробный анализ дисперсионных характеристик поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся в структурах с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Основные научные положения и результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены в статьях автора, а также апробированы на различных научных конференциях.

## 6. Заключение

Учитывая все вышеизложенное, считаю, что диссертационная работа «Направляемые волны в планарных нанокompозитных и графеновых структурах» соответствует паспорту специальности 01.04.05 – Оптика, отвечает всем требованиям ВАК, а ее автор, Евсеев Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник лаборатории  
дифракционной оптики Института систем  
обработки изображений РАН — филиала  
федерального государственного  
учреждения «Федеральный научно-  
исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника» Российской  
академии наук»

Безус Евгений  
Анатольевич

### Подпись Безуса Евгения Анатольевича заверяю:

Ученый секретарь ИСОИ РАН —  
филиала ФНИЦ «Кристаллография  
и фотоника» РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

В. В. Котляр

### Сведения об оппоненте:

Безус Евгений Анатольевич,

Кандидат физико-математических наук

Специальность, по которой защищена диссертация: 01.04.05 — Оптика

Адрес: 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Телефон: +7 (846) 337-80-84

e-mail: bezus.ssau@gmail.com

Место работы: Институт систем обработки изображений РАН — филиал федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Должность: научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики

1 июня 2020 года