

На правах рукописи

НЕЧЕПУРЕНКО Игорь Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР И ИХ
ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФГБУН Института теоретической и прикладной
электродинамики РАН
Дорофеенко Александр Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физической химии
Института новых материалов и нанотехнологий
НИТУ «МИСиС»
Капуткина Наталья Ефимовна

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник кафедры квантовой
электроники Физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
Щербаков Максим Радикович

Ведущая организация: ФГБУН Институт спектроскопии РАН

Защита состоится " ____ " _____ 2015 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании
Диссертационного совета ДМ 002.262.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной
электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких
температур РАН по адресу: г. Москва, ул. Ижорская, 13, экспозал ОИВТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
высоких температур РАН.

Автореферат разослан " __ " _____ 2015 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

К.И. Кугель

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Основные тенденции в развитии прикладной оптики определяются необходимостью миниатюризации оптических устройств. Для этого разрабатываются новые искусственные гетерогенные материалы (метаматериалы, фотонные кристаллы и т.п.), которые обладают свойствами, не характерными для встречающихся в природе веществ, например, они могут обладать отрицательными значениями диэлектрической и/или магнитной проницаемости. Возникновение таких свойств определяется резонансным взаимодействием излучения с неоднородностями, в частности, плазмонным резонансом или брэгговским резонансным рассеянием.

Использование таких материалов позволило управлять ближними полями [1-3] и конвертировать их в дальние [4, 5]. В частности, использование таких материалов позволило преодолеть критерий Рэлея разрешающей способности оптических приборов [6, 7]. Одним из возможных вариантов создания оптической среды с отрицательной эффективной диэлектрической проницаемостью является система периодически чередующихся слоев металла и диэлектрика (плазмонный фотонный кристалл) [8]. Отличительной особенностью фотонных кристаллов [9, 10] является наличие запрещенных зон в спектре пропускания электромагнитных волн, которые в некотором смысле аналогичны запрещенным зонам электронного спектра в твердом теле [9, 11-14].

Наряду с миниатюризацией приборов возникает задача повышения скорости работы вычислительных устройств, для чего предлагается использовать плазмонные системы (системы, где используются материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью) [15]. Поэтому актуальной задачей становится создание новой элементной базы [16,17]. При этом переход от оптических элементов к плазмонным приводит к существенному уменьшению характерного размера системы. Основным препятствием для использования плазмонных структур являются высокие омические потери. Поэтому в первую очередь современные исследования направлены на компенсацию омических потерь, возникающих в средах с отрицательной диэлектрической проницаемостью [18-20].

Помимо перечисленных приложений, плазмонные явления используются при создании сенсоров [21-23]. Одной из основных сенсорных плазмонных схем является схема Кречманна [24-26], в которой плазмонный резонанс возбуждается на металлической пленке, нанесенной на основание призмы. В

настоящее время ведется активная работа по замене достаточно громоздкой схемы Кречманна на схемы с оптическими световодами, поскольку такие схемы обладают большей помехоустойчивостью, а также просты в использовании [27-30].

Наряду с методом Кречманна, для измерения оптических свойств материалов используют метод внутривибронаторной лазерной спектроскопии [31, 32]. Замена в этом методе фотонов на плазмоны, предложенная в данной диссертационной работе, позволяет перейти от исследований макроскопических количеств анализируемого вещества к исследованию отдельных кластеров или нанослоев.

Одной из наиболее перспективных систем для сенсорных применений плазмоники является графен. Графен – это планарный материал [33, 34], обеспечивающий высокую подвижность носителей [35]. Высокая подвижность носителей в графене приводит к низким потерям плазмонов на частотах от терагерц до ближнего ИК [36]. Таким образом, графен является перспективным плазмонным материалом [37].

Широко используемым методом спектроскопии является метод спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (SERS) [38]. В этом методе использование плазмонных наночастиц приводит к гигантским коэффициентам усиления. Нанесение плазмонных наночастиц на поверхность фотонного кристалла может привести к дополнительному усилению сигнала комбинационного рассеяния. По аналогии с таммовскими состояниями электронов, на границе фотонного кристалла возникают локализованные состояния электромагнитного поля [39-41]. Такие состояния приводят к локальному увеличению интенсивности электромагнитного поля, что может быть использовано для усиления взаимодействия излучения с веществом.

В настоящее время благодаря развитию новых областей электродинамики открываются возможности по разработке принципиально новых измерительных методов и устройств. Поэтому исследования в областях активной плазмоники, физики плазмонных метаматериалов и поиск соответствующих новых приложений чрезвычайно **актуальны**. Диссертация посвящена именно этим задачам.

Целью диссертационной работы является развитие физических основ и применений плазмонных устройств и метаматериалов в сенсорных и вычислительных системах.

В рамках диссертации решались следующие **задачи**.

1. Исследование режимов прохождения электромагнитных волн через плазмонные фотонные кристаллы.

2. Исследование режимов генерации плазмонов в канавке на поверхности металла для применений в перспективных линиях передачи информации.
3. Исследование влияния поглотителя на режимы генерации спазера и возможность применения этого эффекта для внутрирезонаторной лазерной спектроскопии.
4. Исследование свойств поверхностных волн в фотонных кристаллах с целью усиления эффекта гигантского комбинационного рассеяния света.

Научная новизна

1. Впервые получена полная картина возможных типов зонной структуры одномерных плазмонных фотонных кристаллов при всевозможных параметрах системы. Получен критерий возникновения эффекта отрицательного преломления.
2. Впервые предложен генератор плазмонов, распространяющихся в канавке на поверхности металла. Определен порог генерации, когда в качестве усиливающей среды используются квантовые точки.
3. Показано, что добавление насыщаемого поглотителя в резонатор генератора плазмонов на основе параболической канавки приводит к возникновению режима пассивной модуляции добротности. Впервые предложено создать генератор терагерцовой тактовой частоты, используя это явление.
4. Предложен новый метод внутрирезонаторной спектроскопии поглощения на основе плазмонного генератора (спазерная спектроскопия).
5. Предложена схема для реализации метода внутрирезонаторной спазерной спектроскопии поглощения, позволяющая одновременно достичь высокой чувствительности и субволнового пространственного разрешения.
6. Предложена реализация метода внутрирезонаторной спазерной спектроскопии на основе плазмонов графена. Найдена чувствительность метода.
7. Предсказан эффект возникновения генерации спазера при добавлении в систему резонансного узкополосного поглотителя.
8. Предложено использовать поверхностную волну в фотонном кристалле для дополнительного усиления сигнала в схеме SERS. Установлена связь между оптимальным количеством слоев фотонного кристалла и потерями, свойственными самой схеме SERS.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается совпадением теоретических результатов с результатами

экспериментов и численного моделирования. Материал диссертации многократно докладывался на международных конференциях и опубликован в ведущих мировых научных журналах.

Научная и практическая значимость работы

Результаты данной диссертационной работы посвящены широко обсуждаемым научным проблемам, и все они имеют перспективные практические применения. Так, проблема распространения света в фотонных кристаллах, содержащих металлические слои, вызвала широкий интерес в связи с возможностью создания гиперболических сред, а также сред с нулевыми эффективными параметрами. В частности, известно, что электромагнитная волна, падающая из вакуума на границу гиперболической среды, может испытывать отрицательное преломление. Единой теории отрицательного преломления в произвольном плазмонном кристалле до сих пор не существовало.

Всестороннему рассмотрению данной проблемы посвящена вторая глава диссертационной работы. Перспективные применения плазмонных фотонных кристаллов также связаны с возможностью получения квазиоднородной среды с необычными эффективными параметрами [42]. В данной работе исследован вопрос об эффективных параметрах одномерных плазмонных фотонных кристаллов. Показано, что, несмотря на сильную дисперсию, всегда сопровождающую среды с отрицательными диэлектрическими проницаемостями, может быть проведена классификация плазмонных фотонных кристаллов. Разработанная классификация плазмонных фотонных кристаллов может быть использована для разработки сред с нулевыми и отрицательными эффективными параметрами, а также для создания структур, в которых наблюдается отрицательное преломление.

В современных вычислительных устройствах обработка информации обычно осуществляется электронными компонентами схем, а её передача может производиться по оптическим волокнам. Размер соответствующих оптических волокон определяется длиной волны света и не может быть меньше нескольких сотен нанометров. Существует подход к уменьшению размера оптических световодов, основанный на использовании сред с отрицательными диэлектрическими проницаемостями. Такие среды поддерживают распространение поверхностных плазмонов, обладающих существенно лучшей локализацией, чем волна в свободном пространстве. Тем не менее, плазмоны при распространении испытывают существенное затухание. Для компенсации этого затухания было предложено использовать активные среды [43-45],

например, квантовые точки (КТ) [46, 47] или краситель. В диссертации рассмотрена параболическая металлическая канавка в качестве плазмонной линии. Показано, что добавление активных сред способно не только скомпенсировать потери, но и усиливать распространяющиеся плазмоны. Использование брэгговских зеркал может привести к началу генерации плазмонов. Такой одномерный спазер может быть использован в качестве источника плазмонов. Как показано в диссертации, добавление насыщающегося поглотителя в такой спазер может привести к возбуждению импульсного режима работы спазера. Частота колебаний достигает нескольких терагерц при реалистичных параметрах системы.

Высокая степень локализации плазмонов находит применение в методах микроскопии с субволновым пространственным разрешением. В диссертации предложен новый метод спазерной внутрирезонаторной спектроскопии. Проанализирована чувствительность метода. Предложена геометрия спазерного спектроскопа, при которой наряду с высокой чувствительностью спектроскоп обладает субволновым пространственным разрешением. Вычислена чувствительность спазерного спектромикроскопа. Показано, что в силу высокой степени локализации плазмонов на графене и сравнительно низким потерям графен может стать хорошей платформой для спазерного спектроскопа.

Одним из широко используемых на практике методов спектроскопии является спектроскопия комбинационного рассеяния света. В диссертации исследована возможность усиления гигантского комбинационного рассеяния света (SERS) поверхностными волнами фотонного кристалла.

Процесс миниатюризации оптических и плазмонных устройств приводит к появлению принципиально новых физических явлений. В частности, при малом размере лазерного/спазерного резонатора спектральная плотность мод оказывается низкой, в результате чего может наблюдаться такой эффект как лазерная генерация, индуцированная потерями. В диссертации впервые предсказан данный эффект для пространственно однородных систем. Показано, что данный эффект возникает благодаря наличию дисперсии диэлектрических проницаемостей активной среды и поглотителя.

Положения, выносимые на защиту

1. Фотонные кристаллы с двуслойной элементарной ячейкой подразделяются на шесть типов, имеющих качественно различные виды зонной структуры.
2. Компенсация потерь квантовыми точками, находящимися на дне наноразмерной канавки, сформированной на поверхности металла

(серебра), достижима при реалистичных параметрах. В плазмонном резонаторе на основе такой канавки усиление может превзойти потери, что приведет к началу генерации. При добавлении насыщающегося поглотителя в спазере возникает второй порог, выше которого спазер находится в режиме пассивной модуляции добротности и генерирует оптические плазмонные импульсы с терагерцовой частотой.

3. Высокая чувствительность плазмонного лазера к поглощению в резонаторе дает возможность реализации нового метода спектроскопии поглощения – внутрирезонаторной спектроскопии на основе генератора плазмонов в металл-диэлектрических структурах. При появлении анализируемого вещества возможно как гашение суммарного сигнала, так и возникновение провалов в однородно или неоднородно уширенном спектре генерации спазера. Максимальная чувствительность метода достигается вблизи порога генерации.
4. Метод внутрирезонаторной спектроскопии может быть реализован на основе спазера на графене. Эффективность такой реализации связана с высокой добротностью плазмонов по сравнению с реализацией на основе металл-диэлектрических плазмонных структур. Чувствительность метода при работе вблизи порога генерации пропорциональна добротности в степени $3/2$, в результате использование графена существенно повышает чувствительность.
5. Спазер может перейти в режим генерации в результате добавления резонансного поглощения в резонаторе. Этот эффект обусловлен дисперсией диэлектрической проницаемости, сопутствующей поглощению. Дисперсия обеспечивает появление моды резонатора, необходимой для возникновения генерации. На этом принципе может быть построен метод спектроскопии поглощения.
6. Метод усиления комбинационного рассеяния SERS может быть усовершенствован путем использования резонансной подложки в виде многослойной диэлектрической структуры, поддерживающей распространение поверхностных волн.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: 11-я, 12-я, 13-я, 14-я, 15-я, 16-я ежегодные конференции ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 2010-2015; The 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Copenhagen, International conference Days on Diffraction, St. Petersburg,

2011, 2014, 2015; International conference biocatalysis: fundamentals & applications, Moscow, 2013, 2015; ICONO/LAT, Moscow, 2013; TaCoNa Photonics, Bad Honnef, Germany, 2012; The 12th International conference on near-field optics, nanophotonics and related techniques, Donostia - San Sebastian, Basque Country, Spain, 2012.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и других изданиях, включенных в список ВАК.

Личный вклад соискателя

Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке теоретических подходов, численном моделировании и обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 215 наименований. Общий объем 149 страниц, в том числе 70 рисунков.

Краткое содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность темы работы, научная новизна, указаны цели работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан обзор литературы, относящейся к теме работы. Глава состоит из двух разделов. В первом разделе излагается метод описания волн в одномерных фотонных кристаллах. Рассматриваются некоторые плазмонные решения, возникающие в системах с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Во втором разделе приведены уравнения Максвелла-Блоха, которые применяются для описания активных сред, а также для описания лазерной и спазерной генерации. Приведен вывод одномодовых уравнений Максвелла-Блоха.

Во **второй главе** исследуются одномерные плазмонные фотонные кристаллы, ячейка которых состоит из двух слоев – металла и диэлектрика (рис. 1). Проведен анализ разрешенных зон, возникающих благодаря возбуждению плазмонных резонансов на металлических слоях. Соответствующие блоховские волны могут быть интерпретированы как цепочка плазмонных резонансов. Зонная структура плазмонного фотонного кристалла зависит

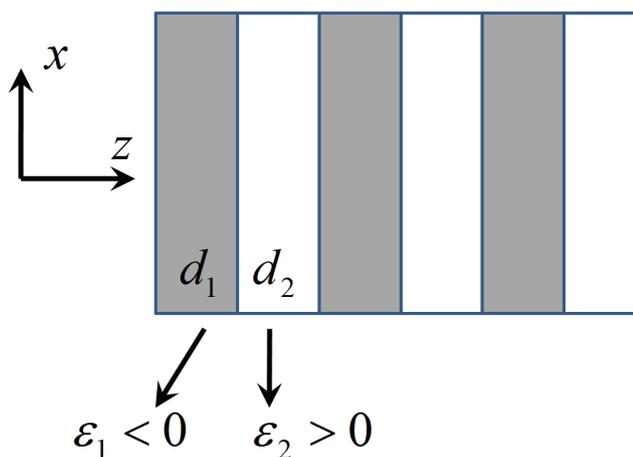


Рис. 1 Одномерный плазмонный фотонный кристалл, ячейка которого состоит из двух слоев.

от параметров элементарной ячейки фотонного кристалла. Разрешенная зона может возникать в результате взаимодействия плазмонов металлического слоя, окруженного двумя диэлектрическими полупространствами, или диэлектрического слоя, окруженного двумя металлическими полупространствами. Данный факт позволяет провести классификацию одномерных плазмонных фотонных кристаллов, ячейка которых состоит из двух слоев. Показано, что такие системы могут быть разбиты на шесть классов с качественно разной зонной структурой.

В третьей главе рассмотрена задача об усилении и генерации плазмонов металлической параболической канавки. В первой части главы показано, что усиление плазмонов параболической канавки может быть достигнуто за счет безызлучательной передачи энергии от квантовых точек, расположенных на дне канавки. Показано, что помещение плазмонных брэгговских зеркал в параболическую канавку позволит создать источник когерентных плазмонов в перспективных плазмонных схемах. С помощью уравнений Максвелла-Блоха проведено моделирование спазера на основе параболической канавки при реалистичных параметрах. Вычислен порог генерации спазера.

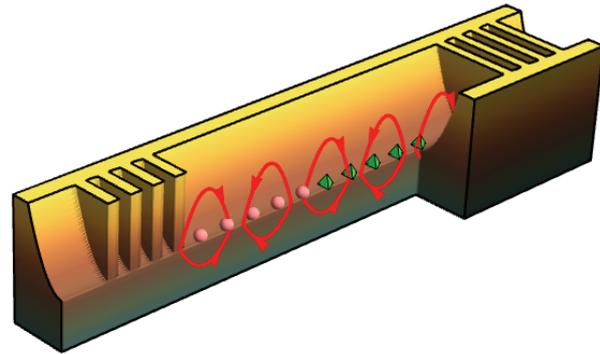


Рис. 2 Схема спазера в режиме пассивной модуляции добротности. Плазмонный резонатор представляет собой металлическую канавку, содержащую брэгговские отражатели, настроенные на длину волны плазмона. На дне канавки находятся накачиваемые и ненакачиваемые квантовые точки.

Во второй части главы рассмотрен источник плазмонных импульсов на основе такой же канавки (рис. 2). Для его реализации предложено использовать спазер в режиме пассивной модуляции добротности. Для перехода к такому режиму предлагается добавить в систему насыщающийся поглотитель в виде квантовых точек. С помощью уравнений Максвелла-Блоха проведено моделирование спазера в режиме пассивной модуляции добротности при реалистичных параметрах. Показано, что параметры системы могут быть выбраны так, что порог генерации импульсов лишь незначительно превосходит порог стационарной генерации.

Четвертая глава посвящена сенсорным применениям плазмоники. В первом разделе дано описание классической схемы Кречманна и ее аналогов в геометрии цилиндрического световода. Приводятся расчеты параметров схемы возбуждения плазмонного резонанса на основе оптического световода, покрытого слоем меди. Приведены экспериментальные данные. Проводится анализ полученных данных и исследуется возможность применения схемы для измерения показателя преломления.

Во второй части главы предлагается метод внутриврезонаторной спазерной спектроскопии поглощения. Метод основан на возникновении провалов в спектре генерации плазмонов. Исследуется внутриврезонаторная спектроскопия на основе поверхностных плазмон-поляритонов (рис. 3). Спектр генерации поверхностных плазмон-поляритонов вычислен с учетом неоднородного уширения линии, вызываемого различием в параметрах различных квантовых точек. Показано влияние поглотителя на спектр генерации. Показано, что плазмон-поляритонный квантовый генератор принципиально отличается от обычного лазера и не может быть описан с помощью одномодовых уравнений Максвелла-Блоха. Это отличие возникает вследствие того, что лазерная мода возникает только при добавлении в систему активной среды. В рамках описанной модели проведена оценка чувствительности к добавлению дополнительных потерь в поле плазмон-поляритона.

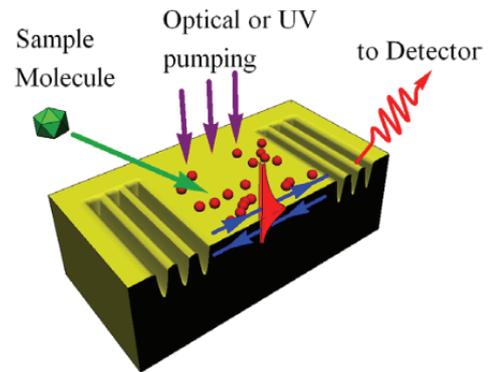


Рис. 3 Схема метода спазерной внутриврезонаторной спектроскопии поглощения. Плазмонный резонатор реализован в виде плоской поверхности металла, на которую нанесены периодические канавки, формирующие брэгговский отражатель. В качестве активной среды предлагается использовать квантовые точки.

Предложен метод внутриврезонаторной спазерной спектроскопии с субволновым пространственным разрешением (рис 4). Высокое пространственное разрешение достигается за счет использования плазмонных мод металлической иглы сканирующего туннельного микроскопа. Разрешение такого метода определяется степенью локализации плазмона на острие иглы также, как и в безапертурной схеме ближнепольной оптической микроскопии. В отличие от ближнепольной оптической микроскопии, возбуждение плазмонов предлагается осуществлять посредством безызлучательных переходов квантовых точек вместо освещения всей системы в целом лазерным лучом. Для описания рассматриваемой системы использовались уравнения

Максвелла-Блоха с учетом квантовых шумов. Вычислен спектр генерации спазера. Показано, что добавление в систему узкополосных поглотителей приводит к возникновению узких провалов в однородно уширенном спектре генерации. Показано, что наибольшая чувствительность метода достигается вблизи порога генерации спазера.

Проанализирован метод спазерной внутриволноводной спектроскопии на основе плазмонов графена. Показано, что резонаторный вклад в чувствительность метода по сравнению с обычной безрезонаторной спектроскопией поглощения пропорционален добротности плазмонного резонанса Q , который достигает двух порядков. Показано, что добавление в резонатор активной среды приводит к дополнительному увеличению чувствительности в \sqrt{Q} .

Значительное увеличение чувствительности связано с увеличением длины распространения плазмона и ограничено лишь процессами декогеренции. Проведена аналитическая оценка чувствительности к потерям, вызванным анализируемыми частицами (молекулами, наночастицами и т.д.). Использование наночешуйки графена в качестве плазмонного резонатора позволяет достичь высокого пространственного разрешения наряду с высокой чувствительностью.

В третьей части четвертой главы теоретически предсказано контринтуитивное явление, заключающееся в том, что увеличение поглощения в спазерной системе при постоянной накачке может привести к началу генерации. Данное явление лазерования, индуцированного потерями, объясняется появлением дополнительных лазерных мод, созданных добавлением поглощающей среды с узкой линией. Данное явление может быть использовано для создания сенсора, чувствительного к узкочастотному

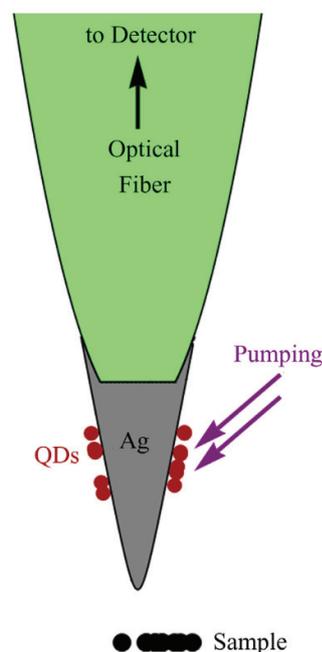


Рис. 4 Схема метода спазерной внутриволноводной спектроскопии поглощения с субволновым пространственным разрешением. Плазмонный резонатор реализован в виде металлической иглы, нанесенной на заострение оптического волновода. В качестве активной среды предлагается использовать квантовые точки.

резонансному поглощению, причем добавление потерь в систему будет приводить не к срыву, а к началу генерации.

В четвертой части четвертой главы предлагается метод усиления гигантского комбинационного рассеяния света (SERS) с использованием одномерного фотонного кристалла в качестве подложки. Свет падает через фотонный кристалл под углом, обеспечивающим полное отражение от дальней границы фотонного кристалла (рис. 5). На этой границе возбуждается поверхностная волна, приводящая к увеличению локальной интенсивности поля и к усилению SERS. Путем численных расчетов показано, что предлагаемый метод может повысить чувствительность традиционных методов SERS на два-три порядка.

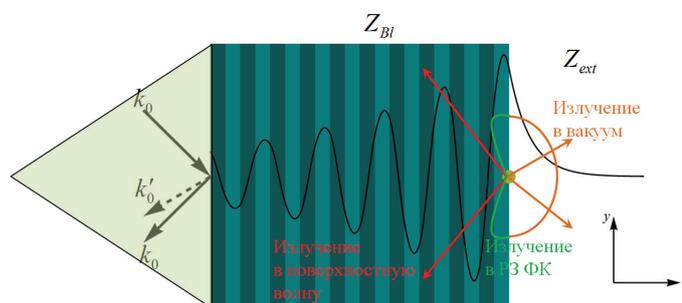


Рис. 5 Схема метода усиления комбинационного рассеяния света с помощью поверхностных волн одномерного фотонного кристалла.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Проведена классификация одномерных плазмонных фотонных кристаллов, элементарная ячейка которых состоит из пары слоев – металла и диэлектрика. Исследованы различные типы зонной структуры плазмонных фотонных кристаллов. Определены условия отрицательного преломления света, падающего на плазмонный фотонный кристалл.
2. Исследована генерация плазмонов в параболической металлической канавке, на дне которой находятся квантовые точки. Определен порог генерации. Разработана модель для описания одномерного спазера. Предложен метод генерации плазмонных импульсов с терагерцовой частотой за счет добавления насыщаемого поглотителя в параболическую канавку.
3. Исследован эффект Кречмана на поверхности металла, нанесенного на оптический световод, содержащий наклонную брэгговскую решетку. Проанализирована возможность использования реализованного в эксперименте световода в качестве датчика показателя преломления.

4. Предложен метод внутрирезонаторной спазерной спектроскопии на основе одномерного спазера. Вычислена чувствительность внутрирезонаторной спазерной спектроскопии.
5. Предложен метод внутрирезонаторной спазерной спектроскопии поглощения с субволновым пространственным разрешением. Вычислен спектр генерации спазера. Показано, что взаимодействие спазера с небольшим количеством поглотителя приводит к возникновению провалов в спектре генерации.
6. Исследована внутрирезонаторная спазерная спектроскопия на основе графена. Определена чувствительность спазерной внутрирезонаторной спектроскопии на основе графена.
7. Предсказано контринтуитивное явление уменьшения порога генерации спазера при увеличении резонансных потерь. Этот эффект обусловлен дисперсией диэлектрической проницаемости поглотителя.

Список публикаций

Основные результаты диссертации представлены в 20 печатных работах, включая 12 статей *в реферируемых научных журналах из перечня ВАК*:

1. Vinogradov A.P., Dorofeenko A.V., Nechepurenko I.A., Analysis of plasmonic Bloch waves and band structures of 1D plasmonic photonic crystals. //Metamaterials – 2010. –V. 4. – №. 4. – P. 181-200.
2. Lisyansky A. A., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Vinogradov A. P., Pukhov A. A., Channel spaser: Coherent excitation of one-dimensional plasmons from quantum dots located along a linear channel //Physical Review B – 2011. V. 84 – № 15. – P. 153409.
3. Нечепуренко И. А., Дорофеев А. В. Отрицательное преломление в одномерных плазмонных фотонных кристаллах // Радиотехника и электроника – 2011. Т. 56. – №. 9. – С. 1132-1141.
4. Dorofeenko A.V., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Andrianov E. S., Pukhov A. A. Spaser for sensing applications // AIP Conference Proceedings – 2012. – V. 1475. – №. 1. – P. 53-55.
5. Dorofeenko A.V., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Andrianov E. S., Pukhov A. A. Surface spaser spectroscopy //2014 8th International Congress on

6. Dorofeenko A.V., Nechepurenko A. V., Pukhov, A. A. Passive mode-locked spaser for clock generation in plasmonic devices //2014 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – 2014 – P. 103 - 105
7. Lozovik Y.E., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Andrianov E. S., Pukhov A. A. Spaser spectroscopy with subwavelength spatial resolution //Physics Letters Section A – 2014. – V. 378 – №. 9.– P. 723-727.
8. Lozovik Y.E., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Andrianov E. S., Pukhov A. A. Highly sensitive spectroscopy based on a surface plasmon polariton quantum generator //Laser Physics Letters, – 2014. – 11(12).
9. Нечепуренко И.А., Дорофеенко А.В., Виноградов А.П., Евтушенко Е.Г., Курочкин И.Н. Усиление сигнала флуоресцентно меченных экзосом: теоретическое исследование флуоресценции в присутствии плазмонных наночастиц //Вестн. Моск. Ун-Та. Сер. 2. Химия. – 2015. – Т. 56. – № 3
10. Нечепуренко И.А., Дорофеенко А.В., Виноградов А.П., Курочкин И.Н. Усиление комбинационного рассеяния поверхностной волной в фотонном кристалле //Вестн. Моск. Ун-Та. Сер. 2. Химия. – 2015. – Т. 56. – № 3
11. Нечепуренко И.А., Дорофеенко А. В., Томышев К. А., Бутов О. В. Исследование плазмонного резонанса на медной пленке, напыленной на световод с наклонной брэгговской решеткой. //Журнал Радиоэлектроники – 2015. – №4
12. Nechepurenko I. A., Baranov D. G., Dorofeenko A. V. Lasing induced by resonant absorption //Optics Express. – 2015. – V. 23. – №. 16. – P. 20394-20401.

Цитированная литература

1. Pendry J. B. Negative refraction makes a perfect lens // Physical Review Letters. – 2000. – V. 85, № 18. – P. 3966.
2. Engheta N. An idea for thin subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability // Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE. – 2002. – V. 1, № 1. – P. 10-13.

3. Lagarkov A., Kissel V. Near-perfect imaging in a focusing system based on a left-handed-material plate // *Physical Review Letters*. – 2004. – V. 92, № 7. – P. 077401.
4. Liu Z., Lee H., Xiong Y., Sun C., Zhang X. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects // *Science*. – 2007. – V. 315, № 5819. – P. 1686-1686.
5. Belov P. A., Simovski C. R., Ikonen P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals // *Physical Review B*. – 2005. – V. 71, № Copyright (C) 2009 The American Physical Society. – P. 193105.
6. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // *Успехи физических наук*. – 1967. – Т. 92, № 7. – С. 517-526.
7. Belov P. A., Hao Y. Subwavelength imaging at optical frequencies using a transmission device formed by a periodic layered metal-dielectric structure operating in the canalization regime // *Physical Review B*. – 2006. – Т. 73, № 11. – С. 113110.
8. Hojo H., Mase A. Dispersion relation of electromagnetic waves in one-dimensional plasma photonic crystals // *J. Plasma Fusion Res.* – 2004. – V. 80, № 2. – P. 89-90.
9. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // *Physical Review Letters*. – 1987. – V. 58, № 23. – P. 2486.
10. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Physical Review Letters*. – 1987. – V. 58, № 20. – P. 2059.
11. Zouhdi S., Dorofeenko A., Merzlikin A., Vinogradov A. Theory of zero-width band gap effect in photonic crystals made of metamaterials // *Physical Review B*. – 2007. – V. 75, № 3. – P. 035125.
12. Виноградов А. П., Дорофеев А. В. Блоховские волны ближнего поля в фотонных кристаллах // *Радиотехника и электроника*. – 2005. – Т. 50, № 10. – С. 1246 – 1251.
13. Vabishchevich P., Shcherbakov M., Bessonov V., Dolgova T., Fedyanin A. Femtosecond pulse shaping with plasmonic crystals // *JETP Letters*. – 2015. – V. 101, № 11-12. – P. 885.
14. Christ A., Zentgraf T., Kuhl J., Tikhodeev S., Gippius N., Giessen H. Optical properties of planar metallic photonic crystal structures: Experiment and theory // *Physical Review B*. – 2004. – V. 70, № 12. – P. 125113.
15. Квантовая наноплазмоника. / Е.С. Андрианов, А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.А. Зябловский, А.А. Лисянский, Пухов А. А. – Москва: Интеллект, 2015. – 368 с.
16. Kim J. T., Ju J. J., Park S., Kim M.-s., Park S. K., Lee M.-H. Chip-to-chip

optical interconnect using gold long-range surface plasmon polariton waveguides // *Optics Express*. – 2008. – V. 16, № 17. – P. 13133-13138.

17. Andrianov E., Pukhov A., Dorofeenko A., Vinogradov A., Lisyansky A. Forced synchronization of spaser by an external optical wave // *Optics Express*. – 2011. – V. 19, № 25. – P. 24849-24857.

18. Bergman D. J., Stockman M. I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems // *Physical Review Letters*. – 2003. – V. 90, № 2. – P. 027402.

19. Noginov M., Zhu G., Belgrave A., Bakker R., Shalaev V., Narimanov E., Stout S., Herz E., Suteewong T., Wiesner U. Demonstration of a spaser-based nanolaser // *Nature*. – 2009. – V. 460, № 7259. – P. 1110-1112.

20. Zheludev N. I., Prosvirnin S., Papasimakis N., Fedotov V. Lasing spaser // *Nature Photonics*. – 2008. – V. 2, № 6. – P. 351-354.

21. Kano H., Kawata S. Surface-plasmon sensor for absorption-sensitivity enhancement // *Applied Optics*. – 1994. – V. 33, № 22. – P. 5166-5170.

22. Kurihara K., Suzuki K. Theoretical understanding of an absorption-based surface plasmon resonance sensor based on Kretschmann's theory // *Analytical Chemistry*. – 2002. – V. 74, № 3. – P. 696-701.

23. Наноплазмоника. / Климов В. В. – Москва: Физматлит, 2009. – 480 с.

24. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. / Raether H. – Berlin: Springer Verlag, 1988.

25. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред /. – Москва: Наука, 1985.

26. Kretschmann E. Decay of non radiative surface plasmons into light on rough silver films. Comparison of experimental and theoretical results // *Optics Communications*. – 1972. – V. 6, № 2. – P. 185-187.

27. Erdogan T. Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters // *JOSA A*. – 1997. – V. 14, № 8. – P. 1760-1773.

28. Thomas J., Jovanovic N., Becker R. G., Marshall G. D., Withford M. J., Tünnermann A., Nolte S., Steel M. Cladding mode coupling in highly localized fiber Bragg gratings: modal properties and transmission spectra // *Optics Express*. – 2011. – V. 19, № 1. – P. 325-341.

29. Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors // *Laser & Photonics Reviews*. – 2013. – V. 7, № 1. – P. 83-108.

30. Shevchenko Y. Y., Albert J. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32, № 3. – P. 211-213.

31. Sviridenkov E. A. Intracavity laser spectroscopy // *Intracavity Laser Spectroscopy* –International Society for Optics and Photonics, 1998. – P. 1-21.

32. Baev V., Sarkisov I., Sviridenkov E., Suchkov A. Intracavity laser spectroscopy // *Journal of Soviet Laser Research*. – 1989. – V. 10, № 1. – P. 61-85.
33. Novoselov K., Geim A. K., Morozov S., Jiang D., Grigorieva M. K. I., Dubonos S., Firsov A. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // *Nature*. – 2005. – V. 438, № 7065. – P. 197-200.
34. Zhang Y., Tan Y.-W., Stormer H. L., Kim P. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene // *Nature*. – 2005. – V. 438, № 7065. – P. 201-204.
35. Bolotin K. I., Sikes K., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P., Stormer H. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene // *Solid State Communications*. – 2008. – V. 146, № 9. – P. 351-355.
36. Balandin A. A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C. N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene // *Nano Letters*. – 2008. – V. 8, № 3. – P. 902-907.
37. Hwang E., Sarma S. D. Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene // *Physical Review B*. – 2007. – V. 75, № 20. – P. 205418.
38. Introduction to infrared and Raman spectroscopy. / Colthup N.: Elsevier, 2012.
39. Meade R. D., Brommer K. D., Rappe A. M., Joannopoulos J. Electromagnetic Bloch waves at the surface of a photonic crystal // *Physical Review B*. – 1991. – V. 44, № 19. – P. 10961.
40. Виноградов А. П., Дорофеенко А. В., Мерзликин А. М., Лисянский А. А. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах // *Успехи физических наук*. – 2010. – Т. 180, № 3. – С. 249-263.
41. Moskalenko V. V., Soboleva I. V., Fedyanin A. A. Surface wave-induced enhancement of the Goos-Hänchen effect in one-dimensional photonic crystals // *JETP Letters*. – 2010. – V. 91, № 8. – P. 382-386.
42. Vinogradov A. P., Dorofeenko A. V., Zouhdi S. On the problem of the effective parameters of metamaterials // *Physics-Uspekhi*. – 2008. – V. 51, № 5. – P. 485-492.
43. Виноградов А. П., Андрианов Е. С., Пухов А. А., Дорофеенко А. В., Лисянский А. А. Квантовая плазмоника метаматериалов: перспективы компенсации потерь при помощи спазеров // *Успехи физических наук*. – 2012. – Т. 182, № 10. – С. 1122-1130.
44. Andrianov E., Baranov D., Pukhov A., Dorofeenko A., Vinogradov A., Lisyansky A. Loss compensation by spasers in plasmonic systems // *Optics Express*. – 2013. – V. 21, № 11. – P. 13467-13478.
45. Ramakrishna S. A., Pendry J. B. Removal of absorption and increase in

resolution in a near-field lens via optical gain // *Physical Review B*. – 2003. – V. 67, № 20. – P. 201101.

46. Оптические свойства полупроводниковых квантовых точек. / Федоров А. В., Рухленко И. Д., Баранов А. В., Кручинин С. Ю. – Санкт-Петербург: Наука, 2011.

47. Kaputkina N., Lozovik Y. E. “Horizontal” and “vertical” quantum-dot molecules // *Physics of the Solid State*. – 1998. – V. 40, № 11. – P. 1929-1934.

НЕЧЕПУРЕНКО Игорь Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР И ИХ

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Автореферат
