

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Поглощение и преобразование поляризации терагерцового излучения в
планарных периодических массивах графеновых микролент**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса 401 группы
направления 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»
физического факультета

Мельниковой Вероники Сергеевны

Научный руководитель
д. ф.-м. н., профессор



Попов В.В.

Саратов 2018

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исследование электронных и оптических свойств графена составляет одно из актуальных направлений современной физики. Уникальные электронные и оптические свойства графена, вытекающие из двумерной природы этого материала и линейного энергетического спектра носителей заряда, весьма перспективны для создания принципиально новых устройств наноэлектроники, оптоэлектроники и нанофотоники. В то же время, малая (одноатомная) толщина графена создает принципиальные сложности для его применения в устройствах оптоэлектроники и нанофотоники вследствие малого объема взаимодействия электромагнитного поля с графеном, что особенно важно в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне, где длина волны электромагнитного излучения составляет 30-1000 мкм. В связи с этим, актуальным является изучение физических эффектов, позволяющих сконцентрировать электромагнитное поле вблизи графена и, таким образом, значительно повысить эффективность взаимодействия электромагнитного излучения с графеном. С этой целью, представляется привлекательным использовать плазменные колебания носителей заряда в графене. Практически важным является то, что частоты плазменных колебаний в графене находятся в ТГц частотном диапазоне. Дело в том, что в настоящее время проводятся интенсивные исследования новых физических принципов создания компактных оптоэлектронных и фотонных ТГц устройств, характеризующихся малым энергопотреблением и работающих при комнатной температуре. Это связано, прежде всего, со многими важными потенциальными практическими применениями ТГц излучения, а также с тем фактом, что традиционные физические принципы имеют фундаментальные физические и технологические ограничения, затрудняющие их использование для создания устройств управления ТГц излучением.

Известно, что преобразование поляризации электромагнитной волны (в том числе в ТГц диапазоне частот), может иметь место исключительно в системах, не обладающих зеркальной плоскостью симметрии. Обычно для нарушения зеркальной симметрии используют внешнее постоянное магнитное поле. В практическом плане это приводит к существенному росту габаритов и веса преобразователей поляризации. В данной работе исследовано преобразование поляризации ТГц волны при возбуждении плазменных резонансов в массивах графеновых микролент как в режиме прохождения, так и в режиме отражения (в том числе полного внутреннего отражения) ТГц волны без приложения внешнего постоянного магнитного поля. Асимметрия возникает при несовпадении плоскости падения волны и плоскости зеркальной симметрии планарного массива графеновых микролент. Плазменные колебания (плазмоны) в графеновых структурах могут возбуждаться в широком диапазоне ТГц частот и характеризуются очень малыми длинами волн (на 2-3 порядка величины меньшими, чем длина ТГц волны) и сильной локализацией ТГц поля вблизи графена. Это позволяет сконцентрировать ТГц поле в очень малом объеме (с субмикронными размерами) и, таким образом, значительно увеличить эффективность взаимодействия ТГц поля с графеном. Таким образом, исследования плазменных колебаний в графене в качестве платформы для создания эффективных компактных устройств управления ТГц излучением является крайне актуальным.

Цель данной работы:

Теоретическое исследование плазменных колебаний в планарном массиве графеновых микролент с целью нахождения оптимальных условий для полного преобразования и полного поглощения ТГц излучения.

Основными задачами данной работы являются:

1. Разработать математический алгоритм для решения задачи о падении ТГц волны на планарный массив графеновых микролент в широком диапазоне углов падения.
2. На основе разработанного алгоритма создать компьютерную программу и рассчитать спектры поглощения и коэффициент преобразования ТГц излучения в исследуемой структуре.
3. Найти параметры, при которых поглощение ТГц излучения исследуемой структурой будет максимально.
4. Найти оптимальные условия для полного преобразования поляризации ТГц излучения в исследуемой структуре.

Объектом исследования является планарный массив графеновых микролент, расположенных на подложке с высоким показателем преломления.

Предметом исследования являются плазменные колебания в массиве графеновых микролент, преобразование поляризации и поглощение ТГц излучения падающего на исследуемую структуру.

Теоретическая и методологическая основы исследования.

Теоретические исследования проводились с использованием самосогласованного электродинамического описания плазмонных явлений в периодических графеновых структурах. Вследствие периодичности рассматриваемой структуры большая роль в теоретических исследованиях уделялась фурье-анализу изучаемых явлений. Электродинамическая часть подхода основана на методе интегрального уравнения. Полученная система связанных интегральных уравнений решалась численно методом Галеркина с разложением искомым функций по ортогональным полиномам Лежандра. По разработанному алгоритму была создана компьютерная программа для расчета коэффициента преобразования поляризации и спектров поглощения ТГц излучения в массиве графеновых микролент в зависимости от частоты падающего излучения, толщины диэлектрического слоя и положения уровня Ферми в графене. Для численных расчетов спектров ТГц поглощения были

использованы реалистичные параметры структуры при комнатной температуре.

Обоснованность и достоверность результатов исследования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих электродинамических методов расчета и широкой апробацией результатов работы при их обсуждении на многих международных и всероссийских конференциях.

Научная новизна работы.

Предсказан эффект широкоапертурного полного поглощения ТГц волны в периодическом массиве графеновых микролент, расположенных на подложке с высоким показателем преломления. Эффект достигается в режиме полного внутреннего отражения ТГц волны от графеновой структуры на частоте плазменного резонанса в широком диапазоне углов падения. Показано, что эффект полного поглощения падающего ТГц излучения на частотах плазменных колебаний в графене возможен при соблюдении условия баланса диссипативных и радиационных потерь. Диссипативные потери определяются феноменологической скоростью внутризонного рассеяния электронов, а радиационные потери зависят от концентрации свободных носителей заряда и определяются положением уровня Ферми в графене. Резонансная частота плазменных колебаний в графене может варьироваться как при изменении положения уровня Ферми так и ширины графеновых полосок.

Показана возможность получения гигантских (до 70%) значений коэффициента преобразования поляризации отраженной ТГц волны по отношению к падающей волне на частоте плазмонного резонанса без использования внешнего магнитного поля при комнатной температуре. Часть мощности (порядка 30%) падающей волны теряется за счет поглощения в графене, главным образом, в результате внутризонных процессов рассеяния

свободных носителей заряда. В то же время, отраженная от массива графеновых микролент ТГц волна имеет строго ортогональную поляризацию электрического поля по отношению к падающей волне.

Показано, что в структуре с активным графеном происходит усиление интенсивности отраженной волны с ортогональной поляризацией, по отношению к интенсивности падающей волны с исходной поляризацией.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

В настоящее время активно развивается новая область – графеновая наноплазмоника (ТГц нанофотоника). Периодические плазмонные метаповерхности на основе графена представляют собой физически интересный объект. Поскольку длина возбуждаемой в такой структуре плазменной волны соизмерима с периодом структуры, данная структура образует планарный плазмонный кристалл. С другой стороны, поскольку пространственный период графеновой структуры на 2-3 порядка величины меньше, чем длина волны падающего ТГц излучения, эту структуру можно рассматривать как планарную резонансную ТГц метаповерхность, сильно связанную с ТГц излучением. Такие метаповерхности можно использовать для эффективного управления ТГц излучением.

Данная работа направлена на исследование плазменных колебаний в периодических структурах на основе графена с целью разработки теоретических основ создания новых типов эффективных графеновых управляющих устройств ТГц диапазона волн. Использование плазменных колебаний носителей заряда в графене представляется привлекательным, поскольку позволяет сконцентрировать электромагнитное поле вблизи графена и, таким образом, значительно повысить эффективность взаимодействия ТГц излучения с графеном. Это является важным как с точки зрения изучения физических свойств самого графена, так и для создания ТГц управляющих устройств на основе графена.

Структура работы.

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, и заключения. Первая глава посвящена электродинамическому описанию поглощения и преобразования поляризации терагерцовой волны массивом графеновых микролент. Решается полная система уравнений Максвелла с разложением электрических и магнитных полей по плоским волнам. Индуцированные электрические и магнитные поля раскладываем в ряд Фурье и записываем уравнения Максвелла в каждой среде в фурье-представлении. Накладываются стандартные электромагнитные граничные условия в плоскости массива графеновых микролент.

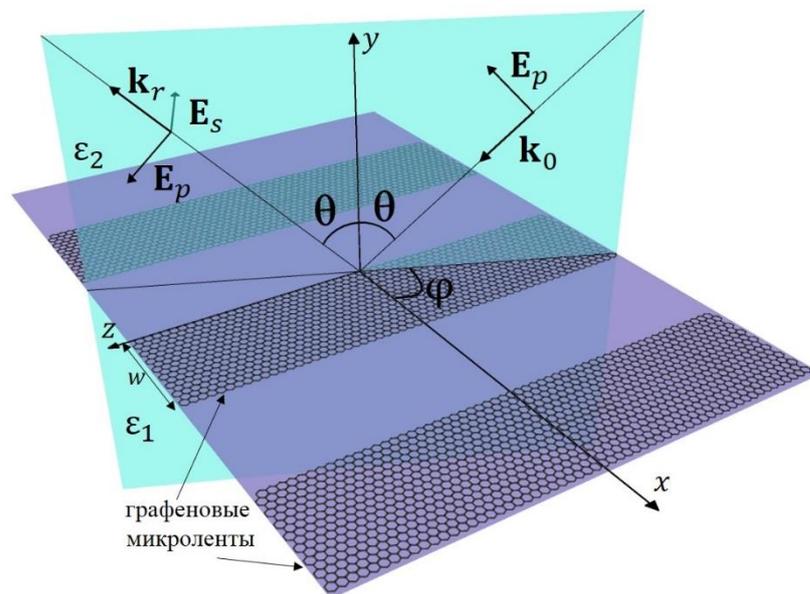


Рисунок 1. Периодический массив графеновых микролент находится на поверхности диэлектрика (призмы) с высокой оптической плотностью, с диэлектрической постоянной $\epsilon_2=11,45$ (Si) (рис. 1). Плоская p -поляризованная ТГц волна падает на графен под углом θ . Направление периодичности массива графеновых микролент образует угол φ по отношению к плоскости падения ТГц волны.

Далее получаем соотношение между амплитудами фурье-гармоник плотности электрического тока и электрического поля в этой плоскости. Используя закон Ома с комплексной поверхностной проводимостью графена совместно с

выражением для плотности электрического тока, получаем систему связанных интегральных уравнений для компонент плотности электрического тока в графеновых микролентах. Полученная система связанных интегральных уравнений решается численно методом Галеркина с разложением искомых функций по ортогональным полиномам Лежандра.

Во второй главе исследуется поглощение ТГц излучения периодическим массивом графеновых микролент. На основе общего решения задачи, изложенного в первой главе, рассмотрен предельный случай, когда внешняя ТГц волна падает на массив графеновых микролент под углом θ в режиме полного внутреннего отражения, направление периодичности массива графеновых микролент лежит в плоскости падения p - поляризованной ТГц волны. Расчеты выполнены для реалистичных параметров массива графеновых микролент при комнатной температуре. Важно, что эффект полного поглощения падающего ТГц излучения на частотах плазменных колебаний в графене возможен при соблюдении условия баланса диссипативных и радиационных потерь. Диссипативные потери определяются феноменологической скоростью внутризонного рассеяния электронов, а радиационные потери зависят от концентрации свободных носителей заряда, определяемой положением уровня Ферми, периода и заполняемости массива графеновых микролент. Резонансная частота плазменных колебаний в графене может варьироваться как при изменении положения уровня Ферми, так и ширины графеновых микролент. Рассмотрено широкоапертурное поглощение ТГц излучения исследуемой структурой. На рисунке 2 показан расчетный спектр ТГц поглощения в зависимости от частоты в широком диапазоне углов падения внешней волны θ при фиксированном значении величины энергии Ферми в режиме полного внутреннего отражения. Видно, что при углах больших угла полного внутреннего отражения и меньших скользящего угла реализуется эффект полного поглощения падающего ТГц излучения на частотах плазменных колебаний в графене (узкий темный лепесток на рисунке 2).

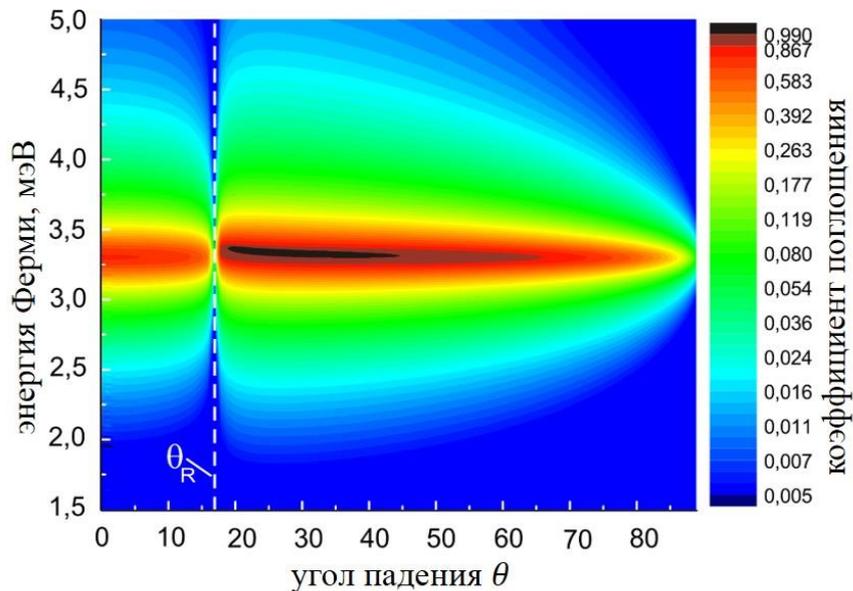


Рисунок 2. Расчетный спектр ТГц поглощения для основного плазмонного резонанса в массиве графеновых микролент шириной 1 мкм с периодом 2 мкм в зависимости от частоты и угла падения внешней волны для величины энергии Ферми $E_F = 200$ мэВ.

В третьей главе исследуется преобразование поляризации ТГц излучения в периодическом массиве графеновых микролент со смещенным уровнем Ферми. Преобразование поляризации ТГц волны возможно только в структурах без зеркальной плоскости симметрии, при этом требуется крупномасштабная асимметрия с характерным масштабом порядка длины ТГц волны. В данной работе крупномасштабная асимметрия возникает при несовпадении плоскости падения волны и плоскости зеркальной симметрии массива графеновых микролент. Кроме того, эффект преобразования поляризации ТГц волны достигается только в режиме полного внутреннего отражения от массива графеновых микролент. Коэффициент преобразования поляризации определен как отношение между потоками мощности s -поляризованной отраженной волны и падающей p -поляризованной волны. Коэффициент преобразования поляризации и ширина резонанса преобразования поляризации возрастают вдоль лепестка плазмонного резонанса с ростом энергии Ферми вследствие того, что межзонное поглощение уменьшается с увеличением энергии Ферми. На рисунке 3 показана возможность достижения

гигантского значения коэффициента преобразования поляризации ТГц излучения (до 70%) при комнатной температуре. В то же время, отраженная от массива графеновых микролент ТГц волна имеет строго ортогональную поляризацию электрического поля по отношению к падающей волне.

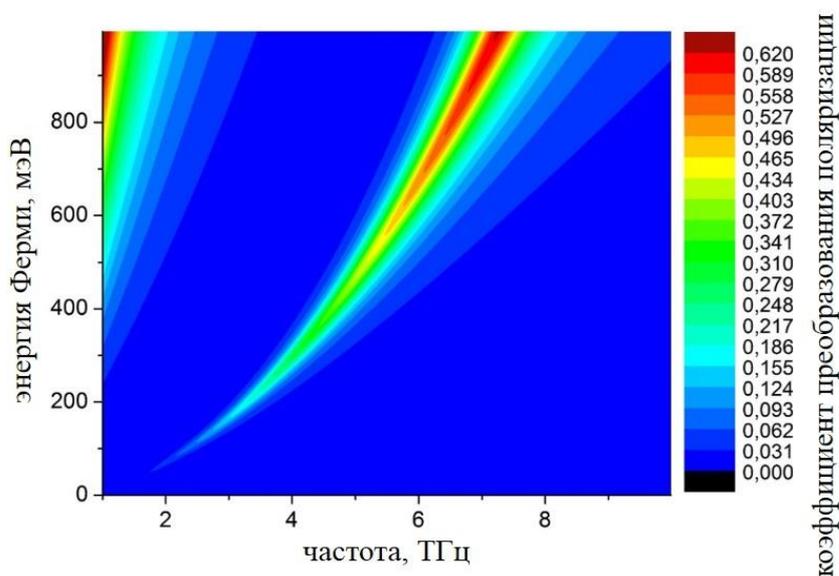


Рисунок 3. Коэффициент преобразования поляризации в основном плазмонном резонансе в режиме полного внутреннего отражения ($\theta=\varphi=45^\circ$) для массива графеновых микролент шириной 1 мкм с периодом 2 мкм как функция энергии Ферми и частоты при $\gamma = 10^{12} \text{с}^{-1}$.

В четвертой главе исследуется преобразование поляризации ТГц излучения в оптически накачанном периодическом массиве графеновых микролент. Показана возможность достижения полного преобразования поляризации ТГц излучения массивом графеновых микролент. Эффективность преобразования поляризации увеличивается на несколько порядков на частотах плазмонного резонанса, что показано на контурной карте (рисунок 4) для коэффициента преобразования поляризации в режиме полного внутреннего отражения ТГц волны для основного плазмонного резонанса в массиве графеновых микролент. Для любой фиксированной ТГц частоты можно получить резонансно большой коэффициент преобразования поляризации за счет возбуждения плазмонного резонанса при определенной величине оптической накачки, определяющей значение квази-энергии Ферми в графене.

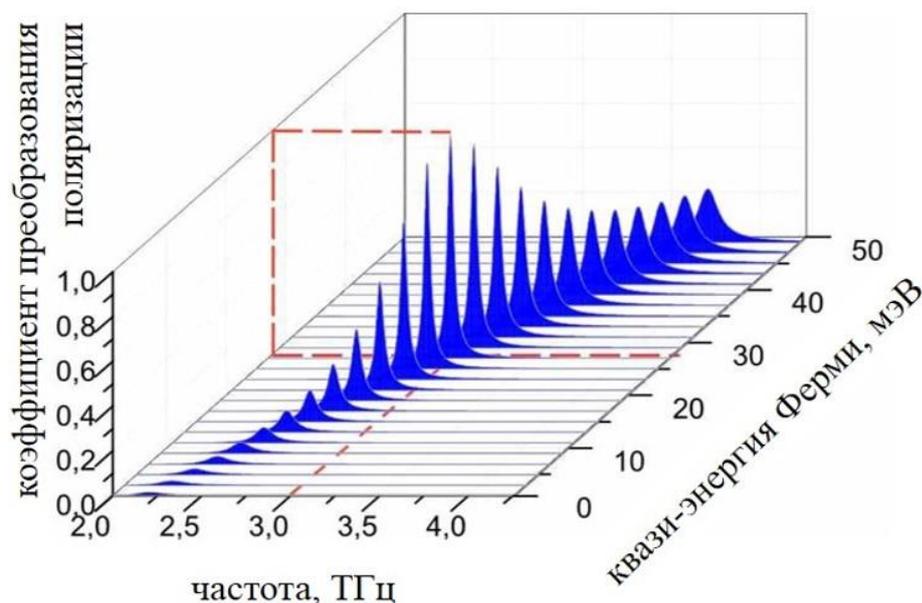


Рисунок 4. Коэффициент преобразования поляризации в режиме полного внутреннего отражения ТГц волны для основного плазмонного резонанса в массиве графеновых микролент с периодом 800 нм и толщиной полоски 400 нм как функция квази-энергии Ферми и частоты при $\gamma = 10^{12} \text{с}^{-1}$.

Полное преобразование поляризации на рисунке 4.1 отмечено красным пунктиром и совпадает с точкой, где действительная часть проводимости оптически накачанного графена равна нулю, что соответствует балансу диссипативных и радиационных потерь в графене. Полное преобразование поляризации происходит только в режиме полного внутреннего отражения, потому что только в этом режиме отраженная волна с исходной *p*-поляризацией может быть полностью скомпенсирована отраженной волной с той же поляризацией, индуцированной плазменными колебаниями в массиве графеновых микролент, расположенных на поверхности диэлектрика.

При достаточно больших значениях величины оптической накачки межзонное стимулирование кванта энергии плазмона превышает внутризонное поглощение в графене, из-за чего действительная часть проводимости графена становится отрицательной. Это соответствует усилению отраженной от массива графеновых микролент ТГц волны. Усиление ТГц волны возрастает до гигантских значений на частотах плазмонного резонанса, соответствующих определенным значениям квази-

энергии Ферми в графене. Плазмонное усиление в заданном частотном интервале насыщается с ростом квази-энергии Ферми вследствие конечной плотности состояний энергии носителей заряда в графене.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. В режиме полного внутреннего отражения ТГц излучения от массива графеновых микролент реализуется эффект полного поглощения падающего ТГц излучения на частотах плазменных колебаний в графене в широком диапазоне углов падения при условии равенства радиационных и диссипативных потерь в исследуемой структуре.
2. Достигается получение гигантских (до 70%) значений коэффициента преобразования поляризации ТГц волны массивом графеновых микролент по отношению к падающей волне. Отраженная от массива графеновых микролент ТГц волна имеет строго ортогональную поляризацию электрического поля по отношению к падающей волне.
3. Происходит полное преобразование ТГц волны в волну с ортогональной поляризацией массивом графеновых микролент на частоте плазмонного резонанса в режиме полного внутреннего отражения, когда диссипативные потери компенсированы оптической накачкой графена.
4. Усиление волны с ортогональной поляризацией в массиве графеновых микролент происходит при мощности накачки, превышающей необходимую для компенсации диссипативных потерь величину.

III. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. Теоретически исследовано преобразование поляризации ТГц излучения периодическим массивом графеновых микролент, расположенных на подложке с высоким показателем преломления. Показано, что полное поглощение ТГц излучения происходит в режиме полного внутреннего отражения ТГц волны от периодического массива графеновых нанолент на частотах плазменных колебаний в графене в широком диапазоне углов падения внешней терагерцовой волны при комнатной температуре.

2. Показано, что возможно полное преобразование поляризации падающей ТГц волны в волну с ортогональной поляризацией в режиме полного внутреннего отражения волны на частоте плазменного резонанса от массива графеновых микролент. Поскольку период рассматриваемого массива графеновых микролент намного меньше, чем длина волны падающей ТГц волны, массив можно рассматривать как анизотропную резонансную метаповерхность. Падающая ТГц волна возбуждает плазмоны в различных графеновых микролентах в одной и той же фазе. В результате в массиве графеновых микролент образуется коллективная плазменная мода, которая возбуждает отраженную волну. При нарушении зеркальной симметрии исследуемой структуры (достигаемой при несовпадении плоскости падения волны и плоскости зеркальной симметрии массива графеновых микролент), излученная массивом графеновых микролент волна имеет поляризацию, отличную от поляризации падающей волны. Преобразование поляризации ТГц волны возникает из-за анизотропии плазмонного отклика массива графеновых микролент для компонент электрического поля, направленных вдоль и поперек графеновых микролент. Полное преобразование поляризации возникает в режиме полного внутреннего отражения падающей волны в том случае, когда отраженная от подложки волна с исходной поляризацией полностью гасится компонентой отраженной волны с той же поляризацией, индуцированной плазменными колебаниями в массиве графеновых микролент. Расчеты, выполненные для реалистичных параметров массива графеновых микролент при комнатной температуре, показывают возможность получения гигантских (до 70%) значений коэффициента преобразования поляризации отраженной ТГц волны по отношению к падающей волне. Часть мощности (порядка 30%) падающей волны теряется за счет поглощения в графене, главным образом, в результате внутризонных процессов рассеяния свободных носителей заряда. В то же время, отраженная от массива графеновых микролент ТГц волна имеет строго ортогональную поляризацию электрического поля по отношению к падающей волне. Показано, что гигантское преобразование поляризации может быть достигнуто в режиме

полного внутреннего отражения ТГц волны от периодического массива графеновых микролент даже при комнатной температуре.

3. В структуре с активным графеном, накачка графена оптической подсветкой позволяет компенсировать потери в плазмонном резонансе. Дальнейшее увеличение накачки приводит к усилению интенсивности отраженной волны с ортогональной поляризацией, по отношению к интенсивности падающей волны с исходной поляризацией. Расчетный коэффициент усиления интенсивности отраженной волны с ортогональной поляризацией, по отношению к интенсивности падающей волны возрастает на три порядка величины вблизи режима самовозбуждения плазмонов в периодическом массиве графеновых микролент.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ) И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

Основные результаты работы докладывались на конференциях:

1. XVIII международный симпозиум «Наноп физика и Наноп электроника». (г.Нижний Новгород 2014г.)
2. Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами». НИ СГУ им. Н.Г.Чернышевского, (г. Саратов 2014г.)
3. The 4th Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies. Институт физики твердого тела РАН, (г.Черноголовка, Московская обл. 2015г.)
4. Конференция молодых учёных "Наноп электроника, наноп фотоника и нелинейная физика" Институт радиотехники и электроники РАН, Саратовский филиал, (г. Саратов 2015, 2017г.)
5. Международный симпозиум по Оптике и Биопотонике «Saratov Fall Meeting» НИ СГУ им. Н.Г.Чернышевского, (г. Саратов 2015, 2016г.)

6. 12-й конкурс научных работ имени Ивана В.Анисимкина, выполненных молодыми учеными, специалистами, аспирантами и студентами за время их работы в Институте. ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, (г. Москва 2015г.)
7. Школа-конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN" Санкт-Петербургский академический университет, (г. Санкт-Петербург 2016, 2017г.)

Публикации автора по теме диссертации в журналах в журналах из списка ВАК:

1. В.С. Мельникова, О.В. Полищук, В.В. Попов. Полное преобразование поляризации терагерцового излучения массивом графеновых микролент без использования магнитного поля. «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика» – №3, 2015г. – С. 51-54. doi: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-51-54
2. В.С. Мельникова, О.В. Полищук, В.В. Попов. Полное преобразование поляризации терагерцового излучения в оптически накачанном графене в отсутствие магнитного поля. Нелинейный мир – Москва Изд-во «Радиотехника» – №1, 2016– С. 32-33.
3. V. S. Melnikova, O. V. Polischuk, V. V. Popov. Graphene-based magnetless converter of terahertz wave polarization // Saratov Fall Meeting 2015: Third Annual Symposium Optics and Biophotonics; Seventh Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS), edited by E. A. Genina, V. L. Derbov, D. E. Postnov, A. B. Pravdin, K. V. Larin, I. V. Meglinski, V. V. Tuchin, Proc. of SPIE Vol. 9917 99172B-1(6) - 2016 SPIE, doi: 10.1117/12.2225205.
4. О.В. Полищук, В.С. Мельникова, В.В. Попов. Широкоапертурное полное поглощение терагерцовой волны в нанопериодической плазмонной структуре на основе графена. Физика и техника полупроводников, 2016, Т. 50, Вып. 11, С. 1565–1569. [O.V. Polischuk, V.S. Melnikova, V.V. Popov, Wide-Aperture Total Absorption of a Terahertz Wave in a Nanoperiodic Graphene-Based Plasmon Structure, Semiconductors, 2016, Vol. 50, No. 11, pp. 1543–1547 (перевод)].

5. O. V. Polischuk, V. S. Melnikova, and V. V. Popov. Giant cross-polarization conversion of terahertz radiation by plasmons in an active graphene metasurface. *Applied Physics Letters* 109, 131101 (2016); doi: 10.1063/1.4963276.
6. V.S. Melnikova, O.V. Polischuk, V.V. Popov. Plasmonic absorption of THz radiation in graphene structure with metal grating. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 917 (2017) 062036, doi :10.1088/1742-6596/917/6/062036