

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

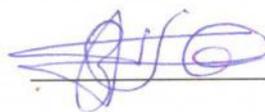
**Выпрямление терагерцового излучения в плазмонных периодических  
структурах на основе графена**

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

Машинского Константина Викторовича

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



\_\_\_\_\_  
Попов В.В.

Саратов, 2018

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

В последнее время активно изучается выпрямление терагерцового (ТГц) излучения за счет нелинейных эффектов, связанных с плазменными колебаниями свободных носителей заряда (плазмонами) в двумерных электронных системах (2МЭС). Традиционно, такие 2МЭС создаются на основе полупроводниковых гетероструктур с двумерным электронным газом с высокой подвижностью носителей заряда. За счет использования резонансного возбуждения плазмонов, внешняя волна индуцирует электрические поля в 2МЭС с большими величинами напряженности, что приводит к росту чувствительности выпрямления. Так как длина волны плазмона на два-три порядка величины короче длины электромагнитной волны, с той же частотой, для возбуждения плазмонов внешней электромагнитной волной используются различные элементы связи. Одним из таких элементов является периодический решеточный затвор.

Подвижность носителей заряда в традиционных 2МЭС падает с ростом температуры, что не позволяет достигать высокодобротных плазменных эффектов при комнатной температуре. В то же время, в графене достижима рекордно большая подвижность носителей заряда даже при комнатной температуре (до  $250000 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$ ). Графен характеризуется бесщелевым линейным энергетическим спектром и нулевой эффективной массой носителей заряда. Однако коллективные колебания носителей заряда в плазменной волне могут быть описаны динамической массой, зависящей от концентрации носителей заряда и действующего электрического поля.

Использование двойного периодического решеточного затвора в графеновой структуре с элементарной ячейкой, асимметричной вдоль направления распространения плазменной волны, дает возможность создавать асимметрию распределения электрического поля плазмона в структуре. Приложение постоянного напряжения между затворными электродами и

графеном позволяет создать распределение концентрации носителей заряда, асимметричное в направлении распространения плазменной волны. В зависимости от знака напряжения, возможно создание в графене областей с электронным и с дырочным типами проводимости.

**Целью** данной работы является теоретическое исследование выпрямления ТГц излучения в периодических графеновых структурах с двойным металлическим решеточным затвором с асимметричной элементарной ячейкой для разработки теоретических основ создания ТГц детекторов.

**Основными задачами** данной работы являются:

1. Построение гидродинамической теории выпрямления ТГц излучения в пространственно однородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой. Построение гидродинамической теории выпрямления ТГц излучения в пространственно неоднородной периодической графеновой структуре, в том числе, когда неоднородность достигается за счет создания областей графена с разными типами проводимости.
2. Разработка программного комплекса для моделирования выпрямления ТГц излучения в пространственно однородной и неоднородной периодических графеновых структурах с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой.
3. Исследование возбуждения плазмонов и плазмонного выпрямления в пространственно однородной и неоднородной периодических графеновых структурах с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой.

**Объектом** исследования являются пространственно однородная и неоднородная периодические графеновые структуры с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой.

**Предмет** исследования:

- электрическая проводимость графена;

- напряженность электрического поля плазмона в графене;
- коэффициенты поглощения по мощности для графеновых структур;
- плотность тока, выпрямленного в структуре за счет эффектов плазмонного разностного увлечения носителей заряда и эффекта плазмонного электронно-дырочного хараповика;
- токовая чувствительность выпрямления ТГц излучения в структуре.

### **Методология и методы исследования.**

Плазменные колебания носителей заряда в графене не могут быть описаны с помощью традиционных уравнений движения классической механики, так как носители заряда в графене имеют нулевую эффективную массу. Удобно описывать их движение с помощью гидродинамических уравнений, содержащих средние импульс и плотность носителей заряда. Динамическая масса носителей заряда в графене приводит к возникновению новых нелинейных слагаемых в гидродинамических уравнениях в дополнение к конвекционной и токовой нелинейностям, приводящих к выпрямлению ТГц излучения. Уравнения решаются с использованием теории возмущений путем разложения скорости носителей заряда, энергии Ферми и плотности выпрямленного тока по степеням амплитуды действующего электрического поля с сохранением линейных и квадратичных членов разложения. Используются приближения нулевой температуры и малой гидродинамической скорости носителей заряда в сравнении со скоростью Ферми. С использованием этих преобразований, получены выражения для линейной проводимости графена и плотности выпрямленного тока в периодической графеновой структуре.

Для теоретического исследования электродинамической части работы используется самосогласованный электродинамический подход, основанный на методе интегрального уравнения. Подход заключается в формировании и численном решении системы интегральных электродинамических уравнений относительно искомым величин электрических полей (или токов),

формируемых на различных участках рассматриваемой графеновой структуры. Необходимой частью электродинамического подхода является использование закона Ома для описания связи электрических токов и полей на различных участках структуры.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается точностью используемых методов и согласованностью результатов с теоретическими и экспериментальными работами отечественных и зарубежных ученых, опубликованными в ведущих отечественных и зарубежных изданиях. Результаты работы были представлены и обсуждены на ряде всероссийских и международных конференций.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые установлено, что выпрямление ТГц излучения в однородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой обусловлено действием эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда, за счет чего токовая чувствительность выпрямления ТГц излучения может достигать 0.1 мА/Вт.
2. Впервые установлено, что в случае выпрямления ТГц излучения в неоднородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой к эффекту плазмонного разностного увлечения носителей заряда добавляется эффект плазмонного электронно-дырочного хараповика, а токовая чувствительность выпрямления ТГц излучения может достигать 2 А/Вт.
3. Впервые показано, что наибольшая эффективность выпрямления ТГц излучения в неоднородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой достигается в случае возбуждения гибридных плазмонных мод, позволяющих повысить токовую чувствительность выпрямления ТГц излучения до 3 А/Вт.

4. Впервые показано, что наибольшая эффективность выпрямления ТГц излучения в неоднородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного хrapовика происходит в режимах работы, при которых энергия Ферми носителей заряда на одном из подзатворных участках графена стремится к нулю.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследования:**

- Теоретическая значимость работы состоит в описании выпрямления ТГц излучения в периодических графеновых структурах с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой. Предсказаны эффекты плазмонного разностного увлечения носителей заряда и эффект плазмонного электронно-дырочного хrapовика в графене. Полученные результаты позволяют объяснить известные экспериментальные данные по наблюдения ТГц отклика в графеновых структурах с периодическим решеточным затвором.
- Практическая значимость работы заключается в том, что проведенные теоретические исследования могут послужить основой для создания эффективного резонансного перестраиваемого по частоте детектора ТГц электромагнитного излучения.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Выпрямление ТГц излучения в пространственно однородном графене с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой происходит за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда. Величина плотности тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда, зависит от величины и асимметрии гармоник электрического поля.

2. Выпрямление ТГц излучения в пространственно неоднородном графене с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой с участками электронной и дырочной проводимости возможно как за счет эффекта разностного увлечения носителей заряда плазмонами, так и за счет эффекта плазмонного хrapовика. Эффект плазмонного хrapовика отсутствует в случае наличия в элементарной ячейке участков только электронной или только дырочной проводимости. Величина плотности тока, выпрямленного за счет действия эффекта плазмонного хrapовика, зависит от величины и неоднородности электрического поля в графене и от смещения плоскости симметрии профиля концентрации носителей заряда относительно плоскости симметрии электрического поля плазмона.
3. Эффективность выпрямления ТГц излучения за счет эффекта плазмонного хrapовика доминирует над эффективностью выпрямления за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда в терагерцовом диапазоне частот.
4. Наибольшая эффективность выпрямления ТГц излучения в пространственно неоднородном графене с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой с участками электронной и дырочной проводимости достигается в случае возникновения эффекта антипересечения двух близко расположенных плазмонных мод, существенно увеличивающих асимметрию распределения и неоднородность электрического поля плазмона.
5. Эффективность выпрямления ТГц излучения в неоднородном графене с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного хrapовика повышается при стремящейся к нулю энергии Ферми носителей заряда на подзатворных участках графена за счет эффекта накопления заряда в графене на границах обедненных участков.

## **Личный вклад автора**

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема теоретических работ, в создании теоретических моделей, проведении компьютерного моделирования и анализе полученных результатов. Постановка исследовательских задач осуществлялась профессором, д.ф.-м.н. Поповым В.В. (СНИГУ им. Н.Г. Чернышевского, СФ ИРЭ им В.А. Котельникова РАН) и старшим научным сотрудником, к.ф.-м.н. Фатеевым Д.В. (СФ ИРЭ им В.А. Котельникова РАН).

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, и заключения. Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, ее новизна и практическая значимость, определена цель работы, представлены основные результаты, полученные в ходе работы и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена построению теории движения носителей заряда в пространственно однородной периодической графеновой структуре.

В первом разделе главы описана исследуемая структура (рис. 1) и ее основные характеристики.

Второй раздел посвящен пределам применимости низкотемпературного приближения, используемым в дальнейших математических преобразованиях.

В третьем разделе главы представлена гидродинамическая модель описания движения носителей заряда. В рамках этой модели, используется система, состоящая из уравнений, описывающих число носителей заряда в графене и их импульс в пространственно однородном графене, а так же выражение плотности тока в графене. Используются приближения малости гидродинамической скорости и температуры. Неизвестные величины уравнения, описывающие гидродинамическую скорость носителей заряда, их энергию Ферми, а так же плотность выпрямленного тока, раскладываются в ряд теории возмущений до второго порядка

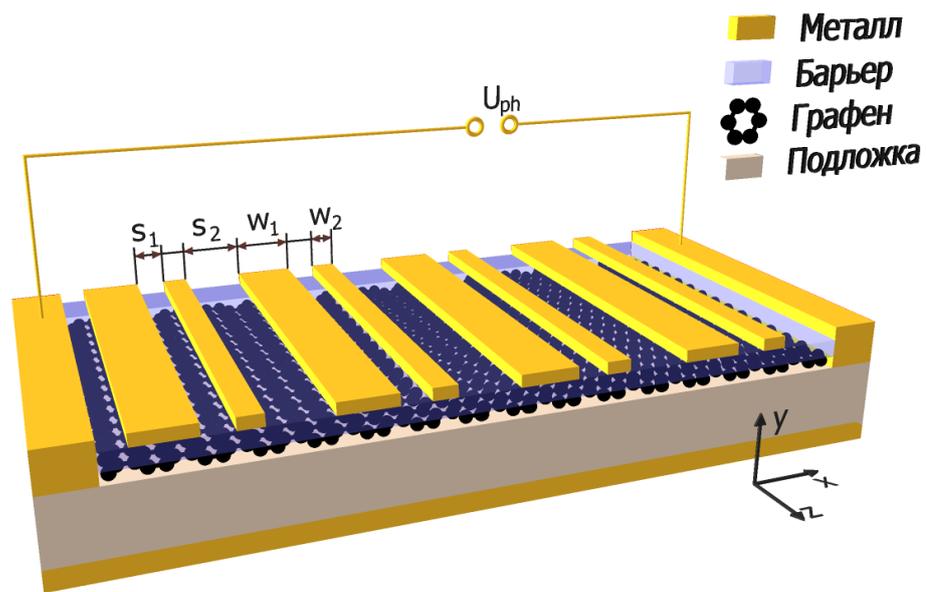


Рис. 1. Графеновая структура с двойным металлическим периодическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой

включительно. В силу отсутствия тока смещения в графене и однородности распределения носителей заряда в элементарной ячейке, равновесные величины не зависят от времени и пространственной координаты. Линейные и квадратичные составляющие скорости, энергии Ферми и плотности тока раскладываются во временной ряд Фурье. После всех вышеописанных преобразований, из системы гидродинамических уравнений и выражения плотности тока получены для графена следующие выражения: плотность линейного тока в графене, линейная проводимость графена и плотность выпрямленного тока в графене. Выражение проводимости соответствует виду проводимости Друде с точностью до всех вышеописанных преобразований и справедливо как в случае электронной, так и в случае дырочной проводимости графена. Выражение плотности выпрямленного тока описывает выпрямление ТГц излучения в пространственно однородной периодической графеновой структуре за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда.

**Вторая глава** посвящена построению теории движения носителей заряда в пространственно неоднородной периодической графеновой структуре с участками электронной и дырочной проводимости.

В первом разделе описывается гидродинамическая модель в случае пространственно неоднородного графена. В процессе математических преобразований используются те же приближения малости гидродинамической скорости и температуры, что и в случае однородного графена. Разложение гидродинамической скорости носителей заряда, их энергии Ферми и плотности выпрямленного тока в ряд теории возмущений так же ограничено вторым порядком. Но, в силу неоднородности распределения носителей заряда в графене, равновесная энергия Ферми имеет зависимость от координаты  $x$ , вдоль которой распространяется движение плазмонов в графене. Разложение линейных и квадратичных составляющих скорости, энергии Ферми и плотности тока во временной ряд Фурье имеет тот же вид, что и в случае пространственно однородного графена. После всех вышеописанных преобразований, из системы гидродинамических уравнений и выражения плотности тока получены следующие выражения для графена: плотность линейного тока в графене, линейная проводимость графене и плотность выпрямленного тока в графене. Это выражение описывает выпрямление ТГц излучения в графене за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда и эффекта плазмонного электронно-дырочного хараповика.

Во втором разделе рассмотрено выражение плотности выпрямленного тока в частном случае распределения концентрации и типов носителей заряда в элементарной ячейке графеновой структуры. В этом случае, энергия Ферми носителей заряда равна по модулю на всех участках элементарной ячейки, но на одном из участков имеет иной тип проводимости, нежели на всех остальных (рис. 2). При этом, плотность тока, выпрямленного в графене, может быть представлена в виде двух вкладов, один из которых описывает выпрямление за счет эффекта плазмонного разностного

увлечения носителей заряда, а другой - за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного храповика. Вид выражения плотности тока, выпрямленного за счет эффекта увлечения, говорит о том, что его величина зависит от величины и асимметрии распределения электрического поля плазмона, а так же равна нулю в случае равных по размеру областей с электронным и дырочным типами проводимости в элементарной ячейке графеновой структуры. Вид выражения плотности тока, выпрямленного за счет эффекта храповика, говорит о том, что его величина зависит от геометрической асимметрии структуры, величины и неоднородности распределения электрического поля плазмона, а так же равна нулю в случае наличия только одного типа проводимости в элементарной ячейке графеновой структуры.

Третий раздел главы посвящен оценке чувствительности выпрямления терагерцового излучения за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда и эффекта плазмонного электронно-дырочного храповика. Для оценки чувствительности за счет эффекта увлечения взято выражение электрического поля в простейшем случае монохроматической волны и подставлено в выражение плотности тока, выпрямленного в пространственно однородном графене. Токовая чувствительность определяется как отношение плотности тока, выпрямленного в структуре к поглощенной мощности волны, падающей на  $1 \text{ см}^2$  структуры. Полученное выражение использовано для построения графика спектра токовой чувствительности (рис. 3). Для оценки чувствительности за счет эффекта храповика взято выражение электрического поля в случае стоячей волны и подставлено в выражение плотности тока, выпрямленного в пространственно неоднородном графене. Токовая чувствительность в этом случае так же определяется отношением плотности тока к поглощенной мощности волны. Полученное выражение использовано для построения графика спектра токовой чувствительности (рис. 3). Как видно из графика, эффект плазмонного электронно-дырочного храповика доминирует над

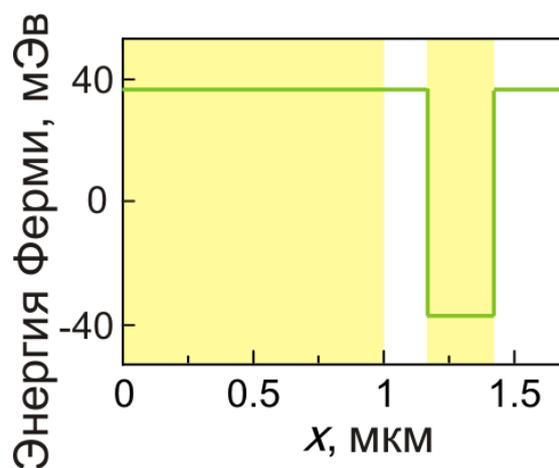


Рис. 2. Пространственно неоднородное распределение энергии Ферми в элементарной ячейке периодической графеновой структуры. Желтым цветом обозначено местоположение электродов затворных решеток элементарной

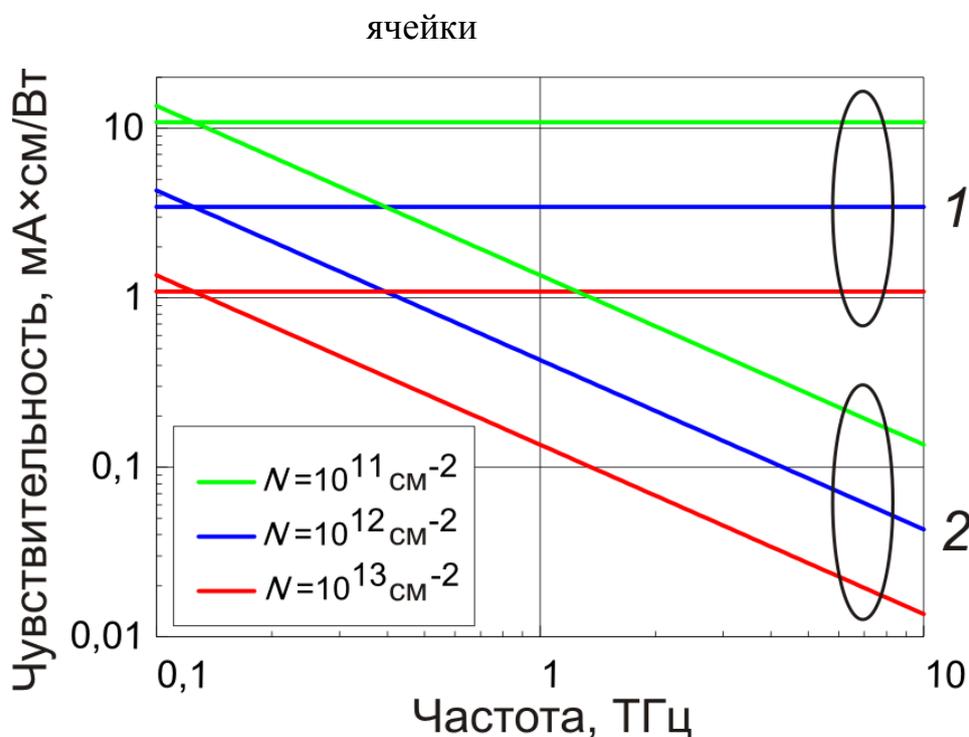


Рис. 3. Спектр токовой чувствительности выпрямления ТГц излучения в графене за счет эффекта плазмонного хриповика (1) и эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда (2) в случае трех разных значений концентрации носителей заряда в графене

эффектом плазмонного разностного увлечения носителей заряда практически во всем диапазоне терагерцовых частот, а в диапазоне частот от 1 до 10 ТГц превосходит на порядок. Таким образом, можно сказать, что

эффект увлечения мал в сравнении с эффектом храповика достаточно для того, что бы и в дальнейшем рассматривать выпрямление ТГц излучения в неоднородном графене только за счет действия эффекта храповика.

В **третьей главе** рассматривается компьютерное моделирование выпрямления ТГц излучения в графене.

В первом разделе приводится блок-схема программного комплекса (рис. 4) и описаны шаги электродинамического подхода, позволяющего вычислить электрическое поле и плотность выпрямленного тока во всех точках структуры.

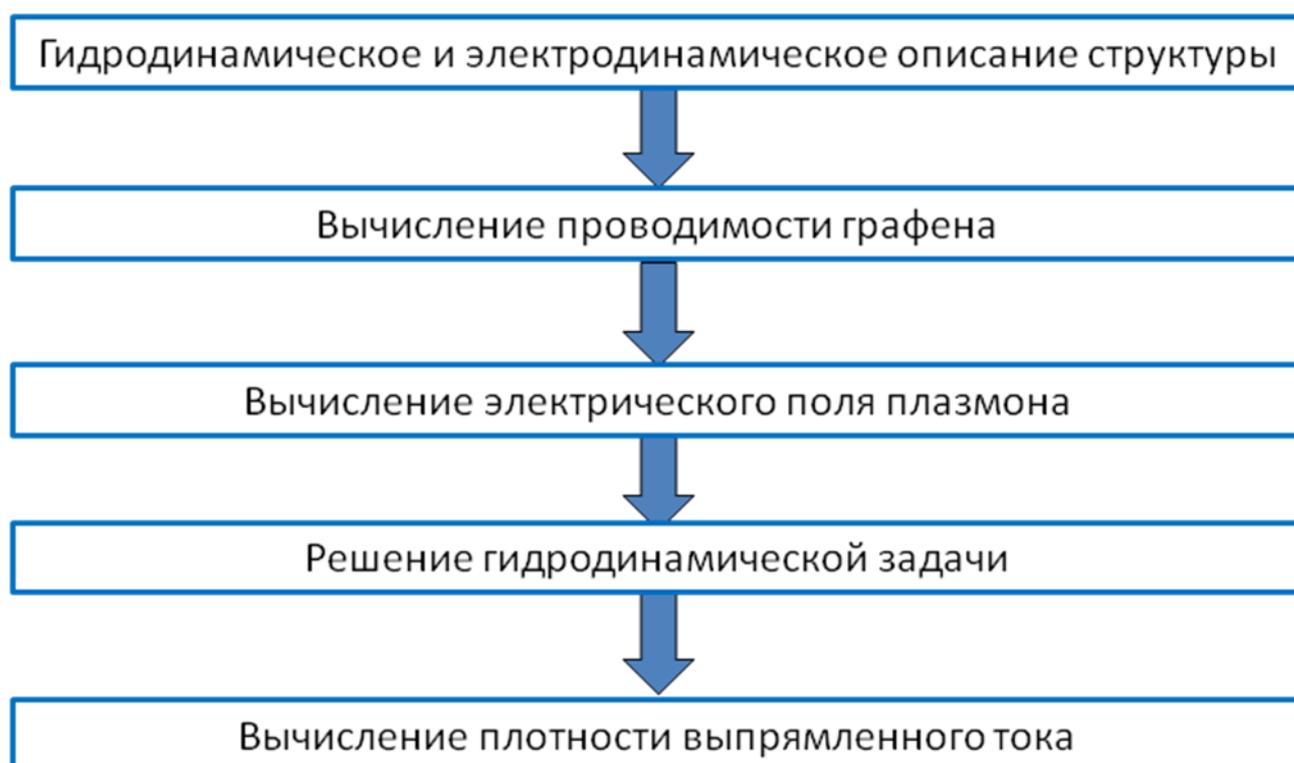


Рис. 4. Блок-схема программного комплекса для моделирования выпрямления ТГц излучения в пространственно однородном и неоднородном графене

Второй раздел главы посвящен исследованию спектра коэффициента поглощения ТГц излучения и плотности выпрямленного тока в пространственно однородном графене. Как видно из графика спектра этих величин (рис. 5), выпрямление терагерцового излучения происходит в резонансном режиме, с расположением резонансов на частотах 1.5 ТГц, 2.6

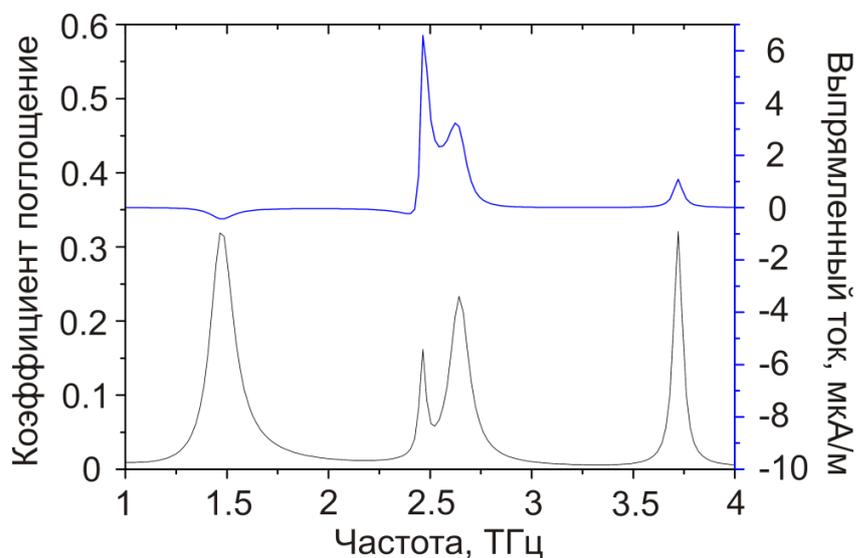


Рис. 5. Спектр коэффициента поглощения (нижняя линия) и плотности выпрямленного тока (верхняя линия) в пространственно однородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой

ТГц и 3.7 ТГц. Эквидистантное расположение резонансов вдоль оси частот говорит о возбуждении мод с линейной дисперсией, характерной для подзатворных плазмонных мод. Двойная форма второго плазмонного резонанса говорит об одновременном возбуждении двух подзатворных мод разных решеток. Взаимодействие плазмонных мод в графене с двойным периодическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой приводит к возрастанию асимметрии распределения электрического поля плазмонов. В частности, асимметрия поля увеличивается в результате действия эффекта антипересечения плазмонных мод. В однородной графеновой структуре выпрямление обусловлено только действием эффекта плазмонного дифференциального увлечения носителей заряда плазмонами, что позволяет достичь плотности тока до 6 мкА/м, что на порядок превышает достижимые величины плотности выпрямленного тока в полупроводниковых гетероструктурах с периодическим решеточным затвором.

Третий раздел посвящен исследованию спектра коэффициента поглощения ТГц излучения и плотности выпрямленного тока в пространственно неоднородном графене. На Рис. 6 представлен график спектра этих величин.

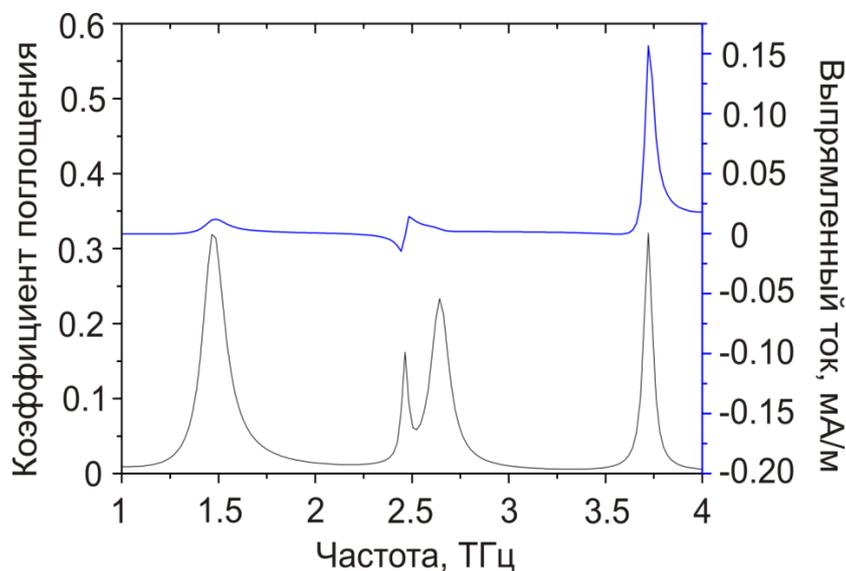


Рис. 6. Спектр коэффициента поглощения (нижняя линия) и плотности выпрямленного тока (верхняя линия) в пространственно неоднородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой

Геометрические параметры однородной и неоднородной структур не отличаются, вследствие чего первый, второй и третий плазмонный резонансы расположены на тех же частотах, что и в однородном случае. Но введение пространственной неоднородности за счет ступенчатого распределения энергии Ферми (рис. 3) позволило увеличить плотность выпрямленного тока на порядок и достичь его величины, равной 160 мкА/м. Такой результат связан с тем, что к действию эффекта плазмонного разностного увлечения, обусловленного асимметрией распределения электрического поля плазмона, добавляется действие эффекта плазмонного электронно-дырочного хруповика, обусловленного смещением плоскости симметрии профиля концентрации носителей заряда относительно плоскости симметрии электрического поля плазмона. Так же, можно

сравнить плотности тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей заряда и эффекта плазмонного электронно-дырочного хrapовика. Для этого, на Рис. 7, помимо спектра коэффициента поглощения, изображены спектр плотности выпрямленного тока в случае пространственно однородного графена и неоднородного графена, а так же - разность этих величин. Так как в однородном случае

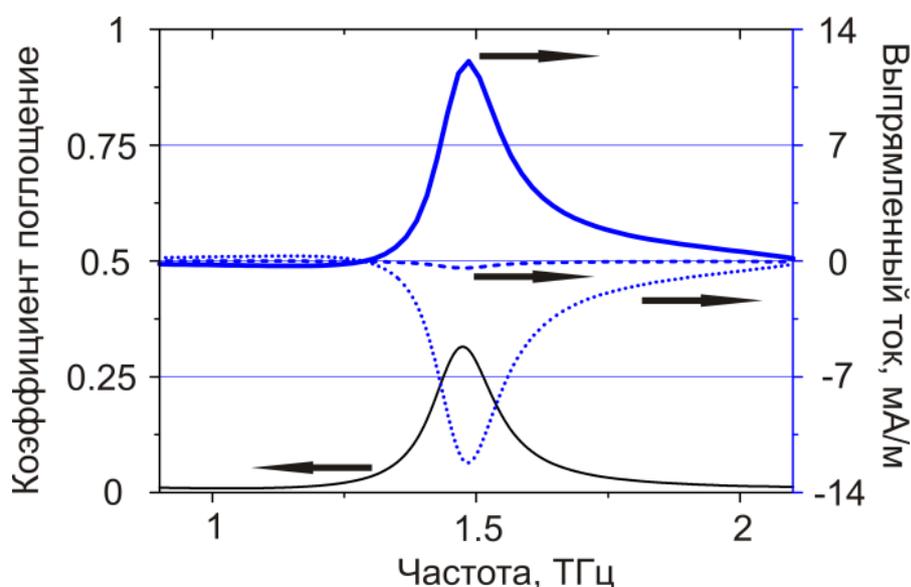


Рис. 7. Спектр коэффициента поглощения (тонкая сплошная линия) и плотности выпрямленного тока в случае пространственно неоднородного графена (толстая сплошная линия), пространственно однородного графена (штриховая линия), а так же - разность плотности тока в однородном и неоднородном случаях (точечно-пунктирная линия) в периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой

действует только эффект увлечения, а в неоднородном, помимо него, действует эффект хrapовика, то разность плотностей токов наглядно демонстрирует величину тока, выпрямленного за счет только лишь эффекта хrapовика. Таким образом, хорошо видно, что плотность тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного хrapовика, на порядок превышает плотность тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного дифференциального увлечения.

В четвертом разделе исследуется спектр коэффициента поглощения ТГц излучения и токовой чувствительности выпрямления ТГц излучения в пространственно неоднородном графене в зависимости от величины геометрической асимметрии структуры  $K=1-s_1/s_2$ , где  $s_1$  и  $s_2$  – величины просветов между электродами подрешеток. Рассмотрим графики пространственного распределения электрического поля плазмона в элементарной ячейке структуры в зависимости от частоты для трех различных коэффициентов асимметрии (рис. 8). Так как эффект плазмонного электронно-дырочного хруповика доминирует над эффектом плазмонного разностного увлечения в исследуемом диапазоне, то, фактически, рассматриваем здесь именно эффект плазмонного электронно-дырочного хруповика. При коэффициенте асимметрии  $K=0.4$  наблюдается эффект антипересечения плазмонных мод, расположенных на частотах 3.2 ТГц и 3.4 ТГц, существенно увеличивающий величину и неоднородность электрического поля плазмона, что приводит к росту коэффициента поглощения и токовой чувствительности выпрямления ТГц излучения в графене (рис. 9).

Пятый раздел главы посвящен исследованию выпрямления ТГц излучения в периодически обедненном неоднородном графене. Рассмотрена элементарная ячейка структуры в случае фиксированного напряжения на широком затворном электроде и изменяющегося напряжения - на узком электроде (рис. 10, а). Значительное увеличение плотности выпрямленного тока (рис. 10, б) происходит в случае малой энергии Ферми на одном из подзатворных участков элементарной ячейки. Это увеличение связано с накоплением заряда на границах участков с малой энергией Ферми, что приводит как к локальному росту величины электрического поля плазмона и его неоднородности (рис. 10, с).

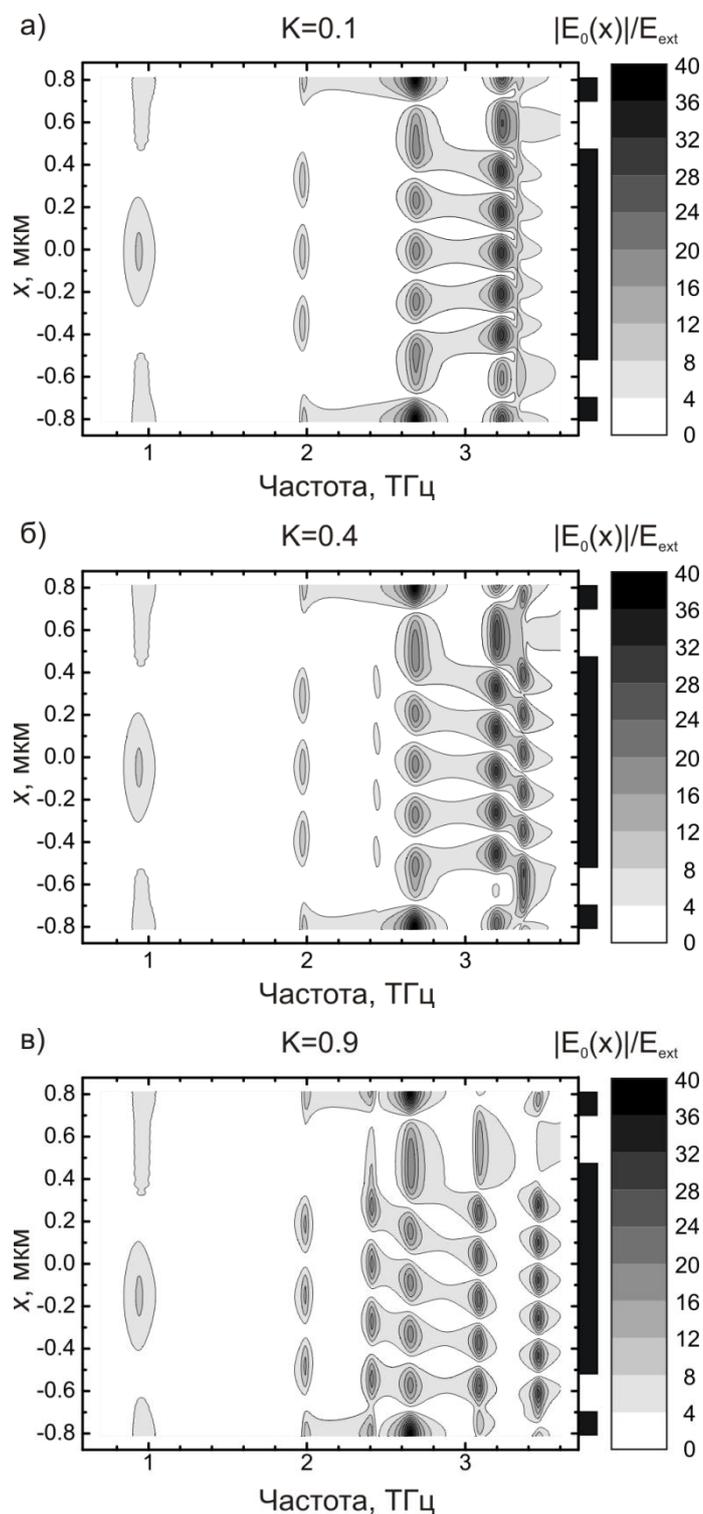


Рис. 8. Пространственная дисперсия спектра действующего электрического поля плазмона в элементарной ячейке периодической неоднородной графеновой структуры с двойным металлическим решеточным затвором для случаев коэффициента асимметрии  $K = 0.1$  (а),  $K = 0.4$  (б) и  $K = 0.9$  (в). Черными прямоугольниками обозначено расположение затворных электродов в элементарной ячейке

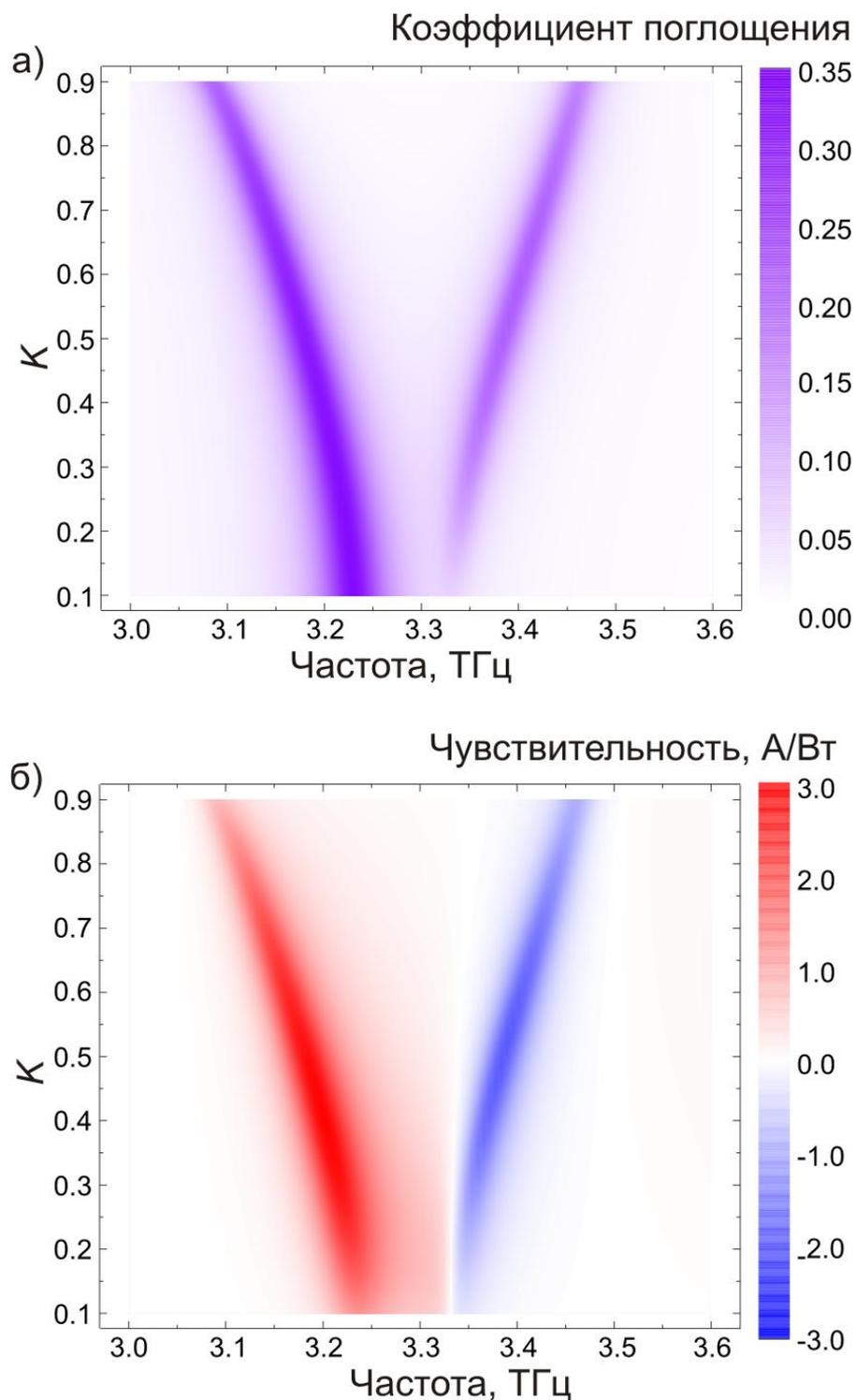


Рис. 9. Спектр коэффициента поглощения (а) и токовой чувствительности детектирования (б) ТГц излучения в периодической неоднородной графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором в зависимости от величины коэффициента геометрической асимметрии элементарной ячейки для плазмонных резонансов на частотах 3.2 и 3.4 ТГц

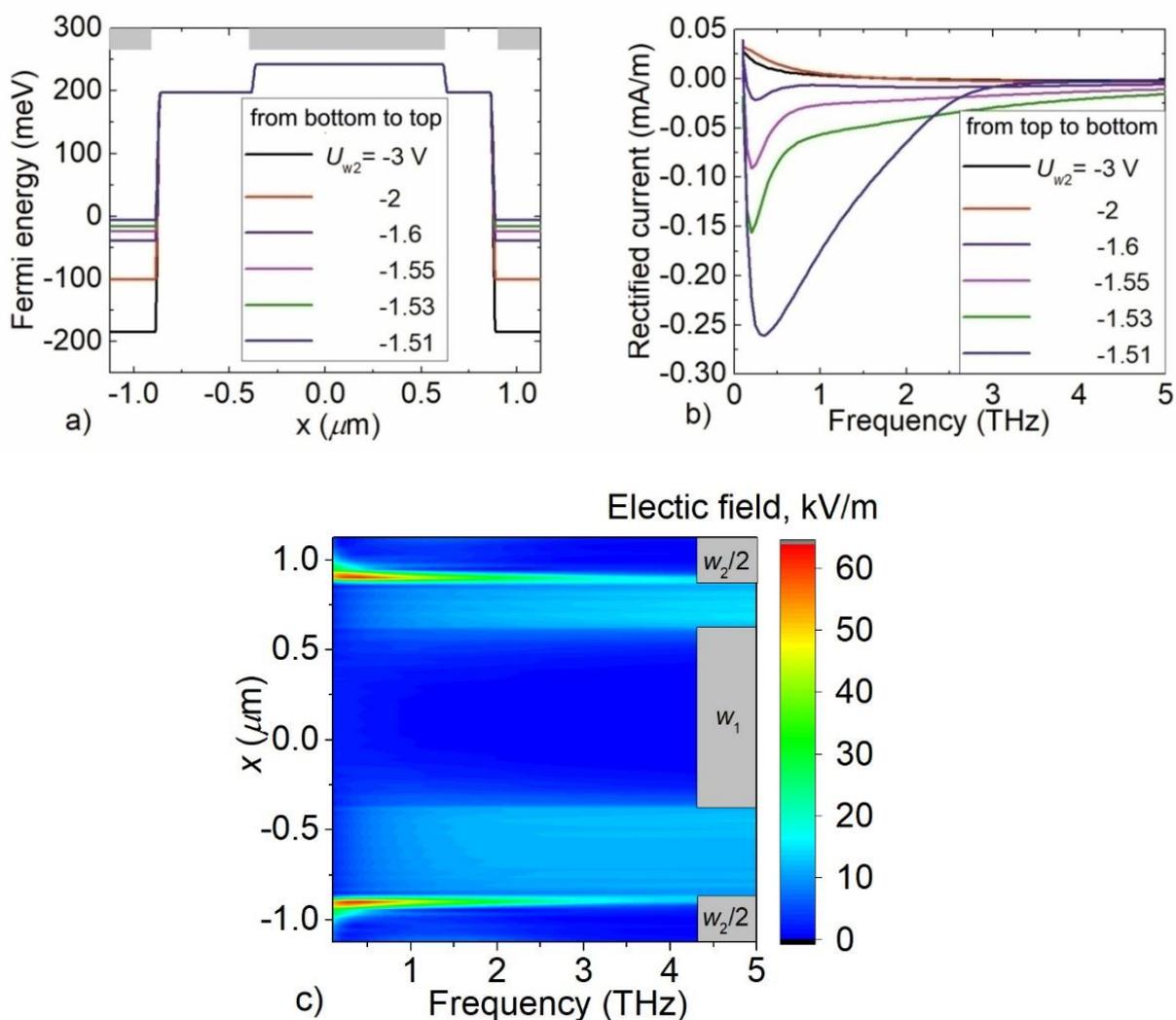


Рис. 9. (a) Пространственное распределение энергии Ферми в элементарной ячейке графеновой структуры для различных значений напряжения на узком электроде. (b) Дисперсия плотности выпрямленного тока для различных величин напряжения на узком электроде. (c) Спектр пространственного распределения электрического поля плазмона в периодической элементарной ячейке графеновой структуры

Полный объём работы составляет 65 страниц, включая 20 рисунков. Список литературы содержит 23 наименования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы данной работы заключаются в следующем:

1. Получены выражения линейной проводимости графена, плотности линейного тока и плотности выпрямленного тока в пространственно однородной и неоднородной периодических графеновых структурах.
2. Получено выражение для плотности выпрямленного тока для частного случая ступенчатого распределения концентрации носителей заряда в элементарной ячейке рассматриваемой графеновой структуры.
3. Разработан программный комплекс для моделирования выпрямления ТГц излучения в пространственно однородной и неоднородной периодических графеновых структурах с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой..
4. Показано, что плотность тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей зарядов в пространственно однородной и неоднородной периодической графеновой структуре с асимметричным двойным металлическим решеточным затвором, на порядок превышает аналогичную величину, достижимую в полупроводниковых гетероструктурах.
5. Показано, что плотность тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного хруповика в пространственно неоднородной периодической графеновой структуре с асимметричным двойным металлическим решеточным затвором с участками электронной и дырочной проводимости, более чем на порядок превышает величину плотности тока, выпрямленного за счет эффекта плазмонного разностного увлечения носителей зарядов в ТГц частотном диапазоне.
6. Показано, что наибольшая чувствительность выпрямления ТГц излучения в пространственно неоднородной периодической графеновой структуре с асимметричным двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой с участками электронной и дырочной проводимости достигается в случае возбуждения гибридных

плазмонных мод, существенно увеличивающих асимметрию и неоднородность распределения электрического поля плазмона.

7. Показано, что эффективность выпрямления ТГц излучения в неоднородной периодической графеновой структуре с двойным металлическим решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного хараповика повышается в режимах работы, при которых равновесная энергия Ферми носителей заряда на одном из подзатворных участков графена стремится к нулю.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались на **конференциях**:

- The The 4th Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (г. Черноголовка, 2015 г.).
- Международная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике Saratov Fall Meeting (г. Саратов, 2015, 2016, 2017 гг.).
- Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2015, 2016, 2017 гг.).
- Конференция с международным участием «Saint-Petersburg OPEN» (г. Санкт-Петербург, 2016, 2017 гг.).
- Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокоочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (г. Саратов, 2016, 2017, 2018 гг.).
- The 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (Japan, Sendai, 2016 г.)
- International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).
- Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 2017, 2018 гг.).

- International graphene innovation conference "GRAPCHINA" (China, Nanjing, 2017 г.)
- Annual International Conference "Days on Diffraction " (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).

**Публикации** автора по теме диссертации в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Машинский К.В. Плазмонное детектирование терагерцового излучения в графеновой структуре с двойным решеточным затвором / К. В. Машинский, Д. В. Фатеев, В. В. Попов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2015. – Т. 15, Вып. 4. – С. 10–12.
2. Terahertz ratchet effects in graphene with a lateral superlattice / P. Olbrich, J. Kamann, M. König, J. Munzert, L. Tutsch, Ming-Hao Liu, J. Eroms, D. Weiss, L. E. Golub, E. L. Ivchenko, V. V. Popov, D. V. Fateev, K. V. Mashinsky, F. Fromm, Th. Seyller, and S. D. Ganichev // *Physical Review B*. – 2016. – Vol. 93. – P. 075422.
3. Fateev D.V. Terahertz plasmonic rectification in a spatially periodic graphene / D. V. Fateev, K. V. Mashinsky, V. V. Popov // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 110. – P. 061106.
4. Машинский К.В. Влияние пространственной неоднородности графена на плазмонное детектирование терагерцового излучения / К.В. Машинский, Д.В. Фатеев, В.В. Попов // *Нелинейный мир*. - 2017. – Т. 15, Вып. 2. – С. 37-38.
5. Фатеев Д.В. Гигантский эффект выпрямления терагерцового излучения в периодических графеновых плазмонных структурах / Д. В. Фатеев, К. В. Машинский, В. В. Попов // *Физика и техника полупроводников*. – 2017. – Т. 51, Вып. 11. - С. 1552–1556.
6. Mashinskiy K.V. Graphene plasmonic terahertz detector with high responsivity / K. V. Mashinsky, D. V. Fateev, V. V. Popov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017, Vol. 917. – P. 062045.

7. Машинский К.В. Высокочувствительный детектор терагерцового излучения на основе периодической графеновой структуры / К.В. Машинский, Д.В. Фатеев, В.В. Попов // Нелинейный мир. - 2018. – Т. 16, Вып. 2. – С. 5-6.