На правах рукописи

Turpos

Гайдученко Игорь Андреевич

Асимметричные устройства на основе углеродных нанотрубок и графена как детекторы терагерцового диапазона

01.04.07 - Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Долгопрудный - 2019

Работа прошла апробацию на кафедре общей и экспериментальной физики факультета физики и информационных технологий Московского педагогического государственного университета (МПГУ).

Научный руководитель Кандидат физико- математических наук, Доцент кафедры Общей физики МФТИ Федоров Георгий Евгеньевич

Ведущая организация:

Защита состоится ______ на заседании диссертационного совета ______ по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (государственного университета):

https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php

Работа представлена «29» апреля 2019 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В последнее время наблюдается повышенный интерес к так называемому терагерцовому (ТГц) диапазону электромагнитного (ЭМ) излучения (0.1-10 ТГц), который занимает промежуточное положение в ЭМ спектре между инфракрасным и микроволновым излучением. Этот интерес связан как с прикладными аспектами, так и с новыми научными данными, которые могут быть получены в этом диапазоне частот. С одной стороны, большинство диэлектрических материалов являются практически прозрачными для ТГц излучения. С другой стороны, многие материалы имеют уникальные спектральные характеристики, лежащие в ТГц диапазоне [1]. Идея визуализации и спектрометрического определения скрытых объектов может найти применение в различных областях: от медицины до систем безопасности.

В силу своего положения в ЭМ спектре ТГц технологии лежат на стыке фотоники и электроники. При этом традиционные методы этих областей науки практически не работают в данном диапазоне, получившем название «терагерцовая щель». Таким образом, поиск новых методов детектирования, генерации и манипулирования ТГц излучением, а также разработка высокопроизводительных, стабильных и компактных ТГц-устройств являются крайне необходимы.

Одним из перспективных подходов к созданию быстрых, эффективных детекторов ТГц излучения является использование наноструктур в качестве чувствительного элемента. Помимо очевидного прикладного интереса, исследование взаимодействия ТГц излучения с электронной подсистемой низкоразмерных систем может существенно развить наши представления об электронной структуре данных структур. В частности, может быть исследована зонная структура нанообъектов с шириной запрещенной зоны в несколько мэВ, динамика носителей заряда в ТГц диапазоне, а также роль коллективных и одночастичных возбуждений электронной подсистемы при взаимодействии наноструктур с терагерцовым излучением [2].

Последние годы графен и углеродные нанотрубки (УНТ), благодаря своим уникальным оптоэлектронным свойствам [3-6], привлекают внимание специалистов в области ТГц технологий. Недавно были предложены и реализованы различные конфигурации детекторов ТГц излучения на основе УНТ и графена [7-10]. Было продемонстрировано широкополосное фотодетектирование в суб-ТГц диапазоне с чувствительностью, достигающей десятков В/Вт, и эквивалентной мощностью шума не более сотни пВт/ЛГц в графеновых полевых транзисторах, спроектированных в конфигурации, где падающее излучение связано между электродами истока и затвора [7]. В этой конфигурации фотоотклик обычно связывают с так называемым выпрямлением Дьяконова-Шура (ДШ), возникающим в результате возбуждения плазменных волн в канале полевого транзистора [11]. Однако, другие эффекты также могут также влиять на отклик устройства. Например, фототермоэлектрический эффект (ФТЭ) [8], возникающий вследствие возникновения градиента температуры В канале полевого транзистора, подверженного воздействию излучения, а также диодное выпрямление [9] могут привести к дополнительному выпрямлению входящего высокочастотного сигнала. предыдущих работ В большинстве была проанализирована зависимость фотоотклика от напряжения затвора только при комнатной температуре, что, как будет показано ниже, затрудняет различение вкладов эффектов ФТЭ и ДШ. Для

дальнейшего улучшения характеристик ТГц детекторов на основе УНТ и графена необходимо более глубокое понимание механизмов, лежащих в основе наблюдаемого выпрямления.

Отдельного рассмотрения требует вопрос о возможности резонансного усиления фотоотклика на ТГц излучения за счет возбуждения плазменных волн в графене. Этот эффект был теоретически предсказан Дьяконовым и Шуром в 1996 году для транзисторов с высокой подвижностью носителей заряда [11], но до сих пор не был полностью экспериментально продемонстрирован. Предложенная идея состоит в том, чтобы сжать падающее излучение в высококонцентрированные двумерные плазмоны, распространяющиеся в канале полевого транзистора, и выпрямить индуцированный переменный потенциал с использованием того же устройства [11]. Несмотря на многолетние экспериментальные усилия, долгоживущих плазменных колебаний в обычных возбуждение полевых транзисторах оказалось сложно реализуемым, и лишь некоторые признаки резонансного детектирования ТГц были продемонстрированы [12].

Графен, инкапсулированный в нитрид бора, благодаря высокой подвижности носителей заряда, электростатически перестраиваемым свойствам, является практически идеальным кандидатом для демонстрации резонансного детектирования ТГц излучения [13-14]. Дело в том, что резонансное возбуждение плазмонов может быть достигнуто только в том случае, если скорость релаксации импульса ниже частоты плазмона, что, в свою очередь, требует сверхвысокой подвижности электронов.

Таким образом, актуальными являются вопросы о выяснении физических механизмов, лежащих в основе выпрямления ТГц излучения детекторами на основе УНТ и графена, а также о вкладе коллективных возбуждениях электронной системы в выпрямленный сигнал. Ответы на данные вопросы позволят заложить основы для создания оптоэлектронных приборов нового поколения.

Цель работы – создание и исследование асимметричных детекторных устройств ТГц диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок для получения новых знаний о механизмах детектирования излучения, а также вкладе коллективных возбуждений электронной подсистемы в наблюдаемый отклик.

Объекты исследования - асимметричные детекторные устройства представляют собой полевые транзисторы, в которых каналом является сетка УНТ или графен, а электроды выполнены в формы ТГц антенны для связи с излучением. В детекторах первого типа электроды исток и сток, образующие антенну, обладают различными характеристиками: электроды либо выполнены из различных материалов (асимметричное контактное легирование), либо имеют различный тепловой контакт с подложкой. Детекторы второго типа выполнены в конфигурации Дьяконова-Шура, в которой электроды исток и затвора служат рукавами ТГц антенны.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Изготовить асимметричные устройства на основе УНТ и графена для исследования выпрямления ТГц излучения: полевые транзисторы в конфигурации Дьяконова-Шура, полевые транзисторы с асимметричным контактным легированием.

2. Экспериментально исследовать эффект выпрямления ТГц излучения полевыми транзисторами в конфигурации Дьяконова-Шура на основе графена в широком диапазоне температур.

3. Экспериментально исследовать эффект выпрямления ТГц излучения полевыми транзисторами с асимметричным контактным легированием на основе УНТ и графена в широком диапазоне температур.

4. Выяснить основные механизмы, приводящие к возникновению сигнала постоянного напряжения, в детекторных устройствах на основе УНТ и графена с асимметричным контактным легированием и в конфигурации Дьяконова - Шура.

5. Провести теоретический расчет вклада различных механизмов в выпрямление ТГц излучения устройствами на основе графена в конфигурации Дьяконова -Шура.

6. Исследовать вклад коллективных возбуждений электронной подсистемы в ТГц фотоотклик изготовленных структур.

Методы исследования. В работе использовались следующие методы исследования:

технологические: фотолитография, электронная литография, электроннолучевое напыление, химическое осаждение из газовой фазы метод плазмохимического травления;

аналитические: сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, атомно-силовая микроскопия;

измерительные: измерение подвижности методом Холла, метод измерения фотоотклика транзисторных структур в ТГц диапазоне при различных температурах.

Научная новизна исследования:

1. В работе впервые продемонстрировано резонансное детектирование ТГц излучения за счет плазмонного усиления в полевых транзисторах на основе двухслойного графена.

2. Продемонстрирована возможность использования транзисторных структур с высокой подвижностью для исследования спектра плазменных волн.

3. Показана двойственная природа ТГц фоотклика полевых транзисторов в конфигурации Дьяконова-Шура с графеновым каналом.

4. Определены основные механизмы детектирования ТГц излучения устройствами с асимметричным контактным легированием на основе УНТ и графена: фото-термоэлектрический эффект и диодное выпрямление.

5. Показано, что даже в случае графена с невысокой подвижностью носителей заряда, плазменные возбуждения в канале транзистора с асимметричным контактным легированием влияют на детектирование ТГц излучения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Взаимодействие асимметричных устройств на основе сеток углеродных нанотрубок с излучением терагерцового диапазона приводит к генерации сигнала постоянного напряжения. Указанный эффект проявляется и в случае, когда УНТ имеют различный тепловой контакт с подложкой у электродов исток и сток, и когда электроды сток и исток выполнены из разных металлов.

2) Резонансное детектирование ТГц излучения полевыми транзисторами в конфигурации Дьяконова-Шура на основе двухслойного графена с высокой подвижностью носителей заряда позволяет исследовать спектр плазменных волн в графене. Длина волны плазмона в двухслойном графене при температуре 10 К составляет от 1 до 3.4 мкм при длине канала 6 мкм, что соответствует коэффициенту сжатия λ_0/λ_p равному от 50 до 150, где λ_p - длина волны плазмона в графене, $\lambda_0 -$ длина электромагнитной волны в вакууме.

3) Основным механизмом детектирования ТГц излучения в транзисторных устройствах с асимметричным контактным легированием на основе р-легированного графена является эффект выпрямления на барьере, возникающим на границе графена и металла с более низкой работой выхода.

4) Плазменные возбуждения в канале графенового транзистора с асимметричным контактным легированием влияют на детектирование ТГц излучения даже тогда, когда частота излучения много ниже как фундаментальной частоты плазменного резонанса, так и частоты упругого рассеяния носителей заряда.

5) Отклик на суб-ТГц излучение транзисторных устройств в конфигурации Дьяконова-Шура с графеновым каналом имеет двойственную природу. Различие в легировании приконтактной области графена и графена внутри канала приводит к сильному термоэлектрическому сигналу, в то же время при одинаковом типе легирования проявляется широкополосное детектирование за счет затухающих плазменных волн.

Практическая значимость работы. В данной работе были разработаны технологические маршруты изготовления ТГц детекторов на основе УНТ и графена. Была предложена конфигурация чувствительного детектора на основе двухслойного графена. Были построены теоретические модели для расчета чувствительности детекторов. Полученные данные могут быть использованы для разработки детекторов ТГц излучения нового поколения, потребность в которых наблюдается В различных областях промышленности: от медицины ДО телекоммуникационных сетей. Продемонстрированный эффект резонансного детектирования может быть использован для разработки он-чип спектрометров ТГц излучения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов исследования и современного сертифицированного оборудования. Достоверность результатов также подтверждена их признанием научной общественностью при обсуждениях на научных семинарах, конференциях, а также положительными рецензиями статей при публикации результатов в научных журналах.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих международных конференциях:

1) МЕТАNANO 2018, Сочи, Россия, 16-21 сентября, 2018

2) SPIE Photonics Europe 2018, Страсбург, Франция, 22 - 26 апреля, 2018;

3) 28th International Conference on Diamond and Carbon Materials 2017 (DIAM2017), Гетеборг, Швеция, 3 - 7 сентября, 2017;

4) 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Spbopen 2016), Санкт-Петербург, Россия, 28-30 марта, 2016;

5) The 4th Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies, Черноголовка, Россия, 9-12 июня, 2015;

6) 12th International Conference Advanced Carbon NanoStructures (ACNS 2015), Санкт-Петербург, Россия, 29 июня-3 июля, 2015;

7) Graphene Week 2015, Манчестер, Великобритания, 22 – 26 июня, 2015;

8) International Conference on Diamond and Carbon Materials 2014 (DIAM 2014), Мадрид, Испания, 7-11 сентября, 2014;

Публикации. Материалы диссертации описаны в 12 статьях, которые опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК. Список публикаций по теме диссертационного исследования приведён в параграфе "Список публикаций".

Личный вклад автора. Все основные результаты работы получены автором лично или в соавторстве с коллегами. При непосредственном участии автора разрабатывалась конфигурация всех представленных детекторных устройств на основе УНТ и графена Автором осуществлялось изготовление устройств на технологическом оборудовании МПГУ (электронная фотолитография, И термическое и электронно-лучевое напыление и плазмо-химическое травление). Синтез углеродных нанотрубок методом химического осаждения из газовой фазы производился в НИЦ Курчатовский Институт. Автором был разработан экспериментальный стенд для измерения фотоотклика изготовленных устройств в ТГц диапазоне. Был исследован фотоотклик асимметричных устройств на основе УНС в диапазоне температур от 10 до 300 К. Был проведен анализ полученных экспериментальных данных, на основе которого были сделаны основные выводы, представленные в работы.

Объём и структура. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора и библиографии. Общий объем диссертации 192 страницы, включая 71 рисунок и 3 таблицы. Библиография включает 183 наименования.

Содержание работы

Во введении сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования, обусловлена его актуальность и новизна, представлены защищаемые положения, сделан выбор объекта и предмета исследования и описана практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященный основным физическим свойствам графена и УНТ, необходимым для понимания настоящей диссертации, а также современному состоянию науки в области взаимодействия ТГц излучения с углеродными наноструктурами.

рассмотрена B параграфе 1.1 зонная структура однослойного, двухслойного графена и УНТ в рамках приближения сильной связи. Параграф 1.2 посвящен транспорту носителей заряда в УНС. Также рассмотрены особенности оптики УНТ и графена и проведено введение в ТГц плазмонику графена. Параграф 1.3 посвящен рассмотрению основных механизмов, приводящих к выпрямлению ТГц излучения асимметричными транзисторными структурами на основе УНС: фото-вольтаического эффекта, фото-термоэлектрического (ФТЭ), диодного выпрямления, болометрического детектирования и эффекта Дьяконова –Шура. В параграфе 1.4 на основе проведенного анализа литературы выбран объект исследования и поставлена задача диссертационного исследования.

Глава два посвящена описанию технологии изготовления экспериментальных образцов детекторных устройств на основе углеродных наноструктур, характеризации синтезированных углеродных материалов, а также методике измерения фотоотклика изготовленных детекторов.

В *параграфе* 2.1 приведено описание различных конфигураций асимметричных детекторных устройств на основе УНТ и графена. В качестве

чувствительного канала в этой работе использовались сетки углеродных нанотрубок, графен, синтезированный химическим осаждением из газовой фазы, графен инкапсулированный в нитрид бора, а также двухслойный графен.

В *параграфах* 2.2-2.4 описаны процедуры изготовления детекторов на основе: УНТ (*параграф* 2.2), СVD графена (*параграф* 2.3) и графена инкапсулированного в нитрид бора (*параграф* 2.4). Также приведены данные по характеризации синтезированных УНС методами: сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), свидетельствующие о высоком качестве используемых структур.

В *параграфе* 2.5 описана методика исследования фотоотклика детекторов на основе углеродных наноструктур на излучение ТГц диапазона при температурах 10К, 77К и 300К, а также методика измерения ключевых характеристик детекторов: вольт-ваттной чувствительности, эквивалентной мощности шума и времени отклика.

В главе три исследуется вопрос о генерации постоянного напряжения под действием излучения теравгерцового и суб-терагерцового диапазона за счет создания неравномерного повышения температуры вдоль сетки углеродных нанотрубок, выполняющих роль канала проводимости.

Для этого были изготовлены УНТ-устройства, в которых теплоотвод от УНТ был разным на подводящих электродах. Устройства были изготовлены таким образом, что электрод исток подводился к сетке УНТ, лежащей на каталитическом островке и имеющей плохой тепловой контакт с подложкой, в то время электрод сток был соединен с трубками, лежащими на подложке (рисунок 1). Электроды исток –сток выполнены в форма плоской спиральной антенны логарифмического типа и также служат для связи с излучением.



Рисунок 1 – (а) Схематическое изображение канала транзистора. (b) ВАХ устройства под воздействием излучения 140 ГГц и без излучения при 300К. (c) Зависимость отклика устройства на излучения частотой 140 ГГц от затворного напряжения (розовая линия). Зависимость термо-ЭДС, рассчитанная с помощью формулы Мотта. Штриховая линия показывает компоненту отклика, вычитаемую из измеренного сигнала, чтобы получить зависимость, описываемую красной

линией.

На рисунке 1 (b) представлены вольт-амперные характеристики (BAX) устройства под воздействием излучения 140 ГГц 200мкВт и без излучения при 300К. Сдвиг ВАХ свидетельствует о возникновении сигнала отклика V_{resp} =-2мВ. Детальный анализ ВАХ свидетельствует об их нелинейности. Нелинейность характеризуется значением второй производной тока d^2I/dV^2 . Нелинейность ВАХ приводит к выпрямлению ТГц излучения и наблюдаемому сигналу постоянного напряжения.

Для оценки эффективности нашего детекторы мы пересчитали наблюдаемый сигнал постоянного напряжения в вольт-ваттную чувствительность и оценили эквивалентную мощность шума. Чувствительность наших детекторов равнялась 10В/Вт, что сопоставимо со значениями, указанными в работах других групп [10] для аналогичных частот излучения. Оценка эквивалентной мощности дает 10⁻⁹ Вт / √ Гц.

Асимметрия, встроенная в наши устройства, должна приводить к возникновению градиента температуры в канале устройства под действием следствие, термо-ЭДС. Чтобы излучения И, как оценить вклад фотофотоотклик, термоэлектрического эффекта В ΜЫ измерили зависимость напряжения отклика от напряжения затвора и сравнили наблюдаемый сигнал с зависимостью коэффициента Зеебека, рассчитанного с использованием формулы Мотта. Результат сравнения представлен на рисунке 1 (с). Сравнение полученные кривых свидетельствует о том, что помимо термо-ЭДС существуют и другие механизмы выпрямления ТГц излучения в исследуемых структурах. В частности, дополнительный вклад в наблюдаемый отклик, может давать выпрямление на р-п переходах, возникающих вдоль неравномерно легированных УНТ.

При понижении температуры до 5 к чувствительность возрастает до 200В/Вт. Рост чувствительности при понижении температуры согласуется с обоими сценариями (фото-термоэлектрическим и диодным) и не позволяет выделить какой-то из них. При температуре жидкого гелия проявляется дополнительный механизм детектирования излучения – болометрический эффект.

Для более детального исследования наблюдаемого эффекта генерации постоянного напряжения под воздействием ТГц излучения были изготовлены устройства с асимметричным контактным легированием (рисунок 2 (а)). Под воздействием излучения аналогично асимметричным устройствам первого типа ВАХ детекторов с асимметричной металлизацией смещаются по оси Х.

Геометрия наших устройств должна приводить к двум механизмам, которые в свою очередь дают нелинейность ВАХ. Во-первых, в случае устройств с асимметричной металлизацией мы имеем дело с так называемым контактным легированием: вблизи палладиевого электрода химический потенциал лежит в зоне проводимости УНТ, так как работа выхода Pd (5,1 эВ) больше, чем у CNT УНТ (4.7 эВ,), тогда как в случае ванадиевого электрода (рабочая функция 3,9 эВ) химический потенциал лежит в валентной зоне.

Во-вторых, в случае устройств второго типа асимметрия приводит к разному контактному сопротивлению, поскольку палладий обеспечивает лучший контакт с УНТ. Поэтому Джоулев нагрев, возникающий в результате прохождения переменного тока через нанотрубку, индуцированного падающим излучением, приводит к увеличению температуры на границе УНТ/ванадий, по сравнению с УНТ/золото.

Как и в случае образцов первого типа измеренный отклик имеет схожую функциональную зависимость с коэффициентом Зеебека (рисунок 2 (b)). При этом есть значительные отличия: экспериментальный отклик смещен по оси напряжений и нигде не становится равным нулю. Как мы уже отмечали, наши устройства сделаны таким образом, что в них может возникать дополнительное выпрямление за счет барьера на границе ванадий/УНТ (диодный механизм). Это дополнительное выпрямление может модифицировать зависимость сигнала от затворного напряжения.



Рисунок 2 –(а) Схематическое изображение канала транзистора, а также его СЭМ изображение. (b) Зависимость отклика устройства на излучения частотой 140 ГГц от затворного напряжения (розовая линия). Зависимость термо-ЭДС, рассчитанная с помощью формулы Мотта. Штриховая линия показывает компоненту отклика, вычитаемую из измеренного сигнала, чтобы получить зависимость, описываемую

красной линией

квази-баллистическое Лалее. используя приближение, ΜЫ провели теоретические расчеты термо-ЭДС для УНТ, связанной с разных сторон с двумя тепловыми резервуарами, находящимися при температурах T₁ и T₂. Результаты непосредственно моделирования могут быть сопоставлены такого с экспериментальными данными, полученными с устройствами с асимметричной Учитывая небольшое межэлектродное металлизацией. расстояние, можно пренебречь электрон-фононным рассеянием и применить формализм Ландауэра-Буттикера для расчета тока через такое устройство. Результаты свидетельствуют о том, что основные черты кривой $V_{resp}(V_G)$ воспроизводятся по форме моделируемой что хотя рассчитанный коэффициент кривой $S(V_G)$. Отметим, Зеебека асимптотически равен нулю, когда напряжение затвора велико по величине, измеренное напряжение отклика поддерживается на уровне около -2 мВ. Этот дополнительный отклик может быть приписан диодному эффекту.

Глава 4 посвящена исследованию плазмонного вклада при детектировании суб-терагерцового излучения графеновыми устройствами с асимметричным контактным легированием. В данной главе мы исследовали частотную зависимость эффективности детектора, что является наиболее прямым подходом к исследованию плазмонного вклада в отклик.



Рисунок 3 - Электронная фотографии: устройства, соединенного плоской антенной логарифмического типа; (b) канала транзистора на основе CVD графена; (c) канала транзистора на основе графеновых нанолент

Мы использовали транзисторные структуры с асимметричным контактным легированием (ванадий и золото). В качестве канала транзистора использовался однослойный графен или графеновые наноленты (ГНЛ) (рисунок 3). Ванадий образует барьер на границе с графеном, а золото образует омический контакт. Исток и сток образуют рукава широкополосной антенны логарифмического типа (рисунок 3 (а)).

Сначала мы охарактеризовали отклик наших устройств на суб-ТГцизлучение с частотой 129 ГГц при комнатной температуре. Когда устройство подвергается воздействию излучения на частоте 129 ГГц с мощностью P = 250мкВт, ВАХ смещается вправо, что свидетельствует о возникновении сигнала постоянного напряжения, индуцированного излучением.

Затем было проведено измерение зависимости напряжения отклика $V_{RESP}(V_G)$ от затвора при комнатной температуре и при 77 К. Из полученных данных следует, что чувствительность практически не зависит от напряжения затвора. Аналогичные результаты были получены на частотах 280 ГГц, 330 ГГц, 380 ГГц и 445 ГГц. Данные также показывают, что отклик слабо зависит от напряжения затвора при температурах 300К и 77К. Учитывая эту недостаточно сильную зависимость от напряжения затвора, мы сравнили чувствительность устройств для 5 значений частоты в диапазоне 129-450 ГГц с заземленным затвором.



Рисунок 4 – (а): чувствительность устройств на основе графена в зависимости от частоты излучения, измеренная при 300К и 77К. (b): Расчетная частотная зависимость выпрямленного тока, нормированного на его значение на нулевой частоте

Результаты показаны на рисунке 4 (а). Наиболее важной особенностью, наблюдаемой в наших экспериментах, является качественное изменение частотной зависимости чувствительности устройства при уменьшении температуры от 300 К до 77 К (Рисунок 4 (а)). При понижении температуры характер зависимости чувствительности от частоты изменяется от убывания к возрастанию с ростом частоты.

Возбуждение плазмонов в канале транзистора может изменять значение напряжения отклика, независимо от механизма нелинейности, приводящего к генерации сигнала [15]. Роль возбуждения плазменной волны в двумерном канале транзистора рассматривалась Рыжим и Шуром в 2006 году [15]. Поскольку наши измерения транспортных характеристик по постоянному току ясно показывают, что частота рассеяния не зависит от температуры, модель, разработанная в [15], не может быть применена непосредственно в нашем случае. С другой стороны, нелинейность, возникающая из-за наличия барьера Шоттки, также включает в себя шунтирующий конденсатор, который влияет на частотную зависимость отклика. Мы изменили модель, рассмотренную в [15] для учета емкости барьера и возбуждения плазменных волн в канале 2D графена. В ходе анализа были получены следующие формулы для зависимости чувствительности детектора от напряжения (B/Bт) как функции частоты падающего излучения

$$\beta_{\omega} = \frac{\beta_{0}}{\left|\cos\left[\frac{\pi\sqrt{\omega(\omega+i\gamma)}}{2\Omega}\right] + a_{\omega}\sin\left[\frac{\pi\sqrt{\omega(\omega+i\gamma)}}{2\Omega}\right]\right|^{2}}$$
(1)
B уравнении (1) частота

$$\Omega = \frac{\pi^{5/4} v_W}{L} \sqrt{\left(\frac{e^2}{\kappa_g v_W \hbar}\right) W_g \sqrt{n}}$$
(2)

- характерная плазменная частота для канала под затвором [8], *n* - плотность электронов в квазинейтральном сечении канала с длиной, близкой к длине канала *L*, W_g - толщина затвора, $v_W \approx 10^8$ см/с - характерная скорость электронов в графене, *k* - эффективная диэлектрическая постоянная $\gamma = \tau^{-1} + \xi (2\pi/\lambda)^2$ - скорость затухания колебаний плазмы, τ^{-1} - частота столкновений электронов с примесями, фононами и гранями (в графене), ξ представляет собой вязкость электронов и $\lambda = 4L$ - длина волны плазмы, β_0 - низкочастотная чувствительность . Выражение

$$a_{\omega} = -ib\left(\frac{2\Omega}{\pi\nu}\right)\frac{(\omega + i\tau^{-1})}{\sqrt{\omega(\omega + i\gamma)}}(1 - i\omega\tau_S)$$
⁽³⁾

характеризует соотношение проводимости канала по переменному току и проводимость барьера Шоттки. Здесь $\tau_S = C_S * r_S$ и C_S - время перезарядки и емкость барьера Шоттки соответственно, и $b = L/\sigma_0 r_S = r_{2DES}/r_S$, $r_S = (dJ_S/dV)^{-1}$ дифференциальное сопротивление барьера Шоттки, где $J_S(V)$ - вольт-амперные характеристики барьера, а r_{2DES} - сопротивлением квазинейтрального канала по постоянному току. Вводя a_{ω} , мы предположили, что проводимость двумерного канала по переменному току равна $\sigma_{\omega} = \sigma_0 \tau^{-1}/(\tau^{-1} - i\omega)$, где σ_0 проводимость по постоянному току.

Основываясь на температурной эволюции транспорта по постоянному току, мы утверждаем, что единственным зависящим от температуры параметром в приведенных выше уравнениях является время перезарядки барьера Шоттки, которое пропорционально барьерному сопротивлению. На рис. 4 (b) показана частотная эволюция β_{ω}/β_0 для двух значений τ_s . Мы видим, что чувствительность является растущей функцией частоты при достаточно больших значениях τ_s , а в случае малых значений уменьшается. Для объяснения возникновения барьера в нашем устройстве, не наблюдаемого при измерение транспортных характеристик на постоянном токе, мы предположили, что барьер образуется только для носителей заряда, которые падают на переход не под прямым углом. При этом перпендикулярно падающие электроны шунтируют нелинейный транспорт.

Чтобы проверить возможный сценарий выпрямления из-за pn-перехода на ванадиевом электроде, мы изготовили образцы графеновых нанолент (рис. 1 (c)). В случае нанолент меньшая ширина канала должна приводить к более коллимированному движению носителей заряда, так что доля ортогонально падающих на границу носителей больше, что приводит к меньшему отклику. Полученные результаты хорошо согласуются с прогнозом.

В главе пять представлены комбинированные экспериментальные и теоретические исследования фотоотклика на суб-ТГц излучение графеновых полевых транзисторов, проанализированные при разных температурах. Полученные данные, зависящие от температуры, позволили нам выявить роль фототермоэлектрического эффекта, выпрямления на p-n переходе и выпрямления за счет плазмонных волн в фотоотклике на суб-ТГц излучение графеновых полевых транзисторов.

Нами было исследовано два типа транзисторных устройств, отличающихся типом графена, используемого в качестве канала транзистора. В устройствах первого типа канал выполнен из однослойного CVD графена. Канал полевого транзистора второго типа был изготовлен из графена, заключенного между двумя

листами (толщиной 50 нм каждая) гексагонального нитрида бора (hBN) методом сухого переноса. Полевой транзистор изготовлен в конфигурации с двойным затворным электродом так, что концентрация носителей заряда в канале контролировалась глобальным задним электродом затвора (расположенным на расстоянии d = 500 нм), в то время как верхний затворный электрод, а также электрод исток были увеличены до миллиметрового размера и служили рукавами логарифмической спиральной широкополосной антенны.

Перед измерением фотоотклика мы исследовали транспортные свойства графенового полевого транзистора. При комнатной нашего температуре сопротивление имеет пик 7 kOм, расположенный вблизи $V_{bg} = -2 V$, соответствующий точке электронейтральности. При понижении температуры наблюдается увеличение сопротивления устройства. Это неудивительно, поскольку все наши измерения проводились в двухконтактной геометрии, и поэтому сопротивление R также включает в себя контактное сопротивление, зависящее от температуры. По той же причине подвижность μ, извлеченная из наклона зависимости R (V_{bg}), нашего графенового устройства составляла всего 3.2 × 10³ $cm^2V^{-1}s^{-1}$: двухконтактные измерения определяют нижнюю границу для подвижности, которая обычно гораздо выше в инкапсулированных образцах. Тем не менее, при температуре жидкого азота наблюдается двукратное увеличение подвижности, указывающее на подавление электрон-фононного рассеяния, приводящее к увеличению времени рассеяния т.

На рисунке 5 представлены результаты измерений чувствительности устройства, определенной как $R_a = V_{resp}/P$, как функция V_{bg} , полученной при разной мощности P входящего излучения частотой 0,13 ТГц при температурах 300К и 77К. Фотонапряжение конечной величины наблюдается при всех экспериментально доступных V_{bg} за исключением точки электронейтральности, где знак отклика изменяется в согласии с амбиполярным транспортом в графене. При 300 К измеренный сигнал очень асимметричен относительно затворного напряжения V_{bg} : он стремится к нулю при положительных V_{bg} и остается почти постоянным при уменьшении V_{bg} ниже ТЭН.



Рисунок 5 - (a-b): Чувствительность при температуре 300 К (a) и 77К (b) для разных значений мощности Р. Черная линия: Зависимость от затвора полевого фактор *F*. (c): R_a(V_{bg}) при разных температурах, измеренных при мощности P = 0,06 мВт.

Аналогично данным при комнатной температуре при 77К R_a является высокоасимметричной относительно положительных и отрицательных напряжений затвора. Чувствительность R_a , измеренная на стороне дырочного легирования (отрицательные затворные напряжения), практически не зависит от мощности и медленно меняется с изменением V_{bg} . При п-легирования канала (положительные затворные напряжения) R_a быстро стремится к нулю с ростом V_{bg} . Важно отметить,

что при положительном V_{bg} чувствительность, измеренная при комнатной температуре, оказалась выше, чем при T = 77 К (рисунок 6 с)

Зависимость чувствительности от затвора при T=77 К имеет пик слегка слева от точки электронейтральности и для самой низкой мощности излучения достигает 30 В/Вт. Пик в зависимости чувствительности от затворного напряжения можно отнести к выпрямлению высокочастотного сигнала p-n переходом. Пик исчезает с увеличением мощности, что находится в соответствии со сценарием выпрямления на p-n переходе, поскольку горячие электроны свободно проходят над барьером, что приводит к подавлению выпрямления. В нашем устройстве, возможно, эти области соответствуют областям, не покрытым верхним затворным электродом, и частью графена под затвором, в которой встроенное электрическое поле легирует канал.

Далее был проведен теоретический анализ вкладов фототермоэлектрического эффекта и выпрямления Дьяконова-Шура в наблюдаемый в Вследствие асимметричного дизайна эксперименте отклик. антенны, высокочастотный переменный ток протекает преимущественно между истоком и верхним затвором. Это приводит асимметричному распределению температуры в графеновом канале. Поэтому электронная система вблизи истока остается при более высокой средней температуре T_S по сравнению температурой T_D вблизи стока, как показано на рисунке 6(а). Для равномерно легированного канала возникающее фотонапряжение определяется выражением

$$\Delta U_{\rm PTE} = -\int S dT \approx S(T_{\rm S} - T_{\rm D}) \tag{4}$$

Где $S \approx -\frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dE_F}$ -коэффициент Зеебека, *e* - заряд электрона, σ проводимость графена and $\frac{d\sigma}{dE_F}$ -производная проводимости по энергии на уровне Ферми. В пределах фактора медленно меняющейся функции $dV_{bg}/dE_F \propto \sqrt{V_{bg}}$ коэффициент Зеебека и как следствие фотонапряжение ΔU_{PTE} зависит от отношения между проводимостью 2D канала и крутизной транзисторной характеристики, которое в дальнейшем называется фактором полевого транзистора (полевой фактор) и обозначается $F = -\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dV_{bg}}$. На рисунках 5а и 5b представлены $F(V_{bg})$. Экспериментально измеренное фотонапряжение повторяет $F(V_{bg})$ для положительных напряжений затвора, однако сильно отличается от него, когда V_{bg} <0.

Эту асимметрию можно понять в рамках фото-термоэлектрической модели, если учесть n-легирование графена вблизи золотых контактов. Учитывая кусочное распределение коэффициента Зеебека вблизи контактов ((S_{ch}) и в оставшейся части канала ((S_{cont}) , как показано на рисунке ба, можно получить модифицированное выражение для фотонапряжения:

 $\Delta U_{\rm PTE} = (S_{\rm ch} - S_{\rm cont})(T_{\rm S} - T_{\rm D})$ ⁽⁵⁾

Уравнение (5) легко объясняет асимметрию характеристик детектора $R_a(V_{bg})$, показанных на рисунке 5. Действительно, S_{ch} контролируется напряжением затвора и меняет знак в точке электронейтральности, а S_{cont} определяется только внутренним полем на границе графен-металл. Электронное легирование графена контактами приводит к тому, что $S_{cont} < 0$. Это приводит к увеличению абсолютного значения фотонапряжения для р-допированного канала $(V_{bg} < 0)$ и уменьшает его для п-легированного канала $(V_{bg} > 0)$. При высоком

положительном напряжении $V_{bg} > 20V$ наблюдаемый отклик приближается к нулю, что указывает на равное легирование канала и контактов.

Альтернативным сценарием фотодетектирования в двумерных полевых транзисторах является так называемый механизм Дьяканова-Шура (ДШ), который предсказывает выпрямление переменного сигнала полевым эффектом и гидродинамическими нелинейностями, которые могут быть усилены резонансным возбуждением плазменных волн [2]. В нерезонансном режиме механизм Дьяконова-Шура приводит к широкополосному фотоотклику с фотонапряжением, определяемым:

$$\Delta U_{\rm DS} = \frac{U_{\rm a}^2}{4} \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dV_{\rm bg}} g(\omega) \propto U_{\rm a}^2 F \tag{6}$$

Где U_a – напряжение на антенне, L – длина канала, $g(\omega) = (\sinh^2 kL - \sin^2 kL)/(\sinh^2 kL + \cos^2 kL)$ -форм фактор, зависящий от волнового числа $k = \sqrt{\omega/(2s^2\tau)}$ затухающей плазменной волны, характеризаующейся групповой скоростью $s = \sqrt{\frac{e}{m}|V_{bg}|}$. е- заряд электрона, m – циклотронная масса. Отметим что, фотонапряжения Дьяконова-Шура $\Delta U_{\rm DS}$ также пропорционально *F*, что делает затруднительным различие ФТЭ и ДШ механизмов только с помощью измерений зависимостей от затвора.

Рассмотрим сначала температурную зависимость для фототермоэлектрического эффекта. Для этого необходимо выразить электронную температуру в уравнении (5) через поступающую мощность излучения путем решения уравнения теплопроводности. В результате получаем следующее выражение для чувствительности:

$$R_{\rm a} \approx \frac{3}{2\pi^2} \left[\frac{e}{k_B} (S_{\rm cont} - S_{\rm ch}) \right] \frac{eZ_{\rm a}}{k_B T} \frac{\delta L}{L}$$
(7)

где Z_a -радиационное сопротивление антенны, δL -длина легированной приконтактной области, L полная длина канала. На рисунке 6b показана нормированная чувствительность R_a/Z_a , рассчитанная по формуле (7) для разных температур и реалистичных оценок длины легированной области $\delta L = 100$ нм. Примечательно, что наша грубая теория фото-термоэлектрического эффекта дает численную оценку чувствительности $R_a = 20B/BT$ для $V_{bg} = -20$ В и $Z_a = 100$ Ом, что согласуется с экспериментальными данными.



Рисунок 6 (а) - Распределение коэффициента Зеебека S, рассеянного тепла q и температуры T в полевых транзисторах, в которых излучение, связанно между электродами исток и затвор. (b) Нормализованная фото-термоэлектрическая чувствительность в зависимости от V_{bg}, рассчитанная для температур T = 77 и 300 К. (c) Нормализованная чувствительность ДШ, как функция V_{bg}, рассчитанная по формуле (6) при заданных т и f = 0,13 ТГц. Вставка: R_a /Z как функция т, вычисленная с помощью уравнения (6) при f = 0,13 ТГц и V_{bg} = -5 В.

Несмотря на количественное согласие с данными при отрицательных напряжениях затвора, теория $\Phi T \Im$ не дает полного качественного описания эксперимента: в n-легированном графене абсолютная величина чувствительности при комнатной температуре в три раза выше, чем при T = 77 K, что противоречит сценарию $\Phi T \Im$, поскольку последний приводит к уменьшению фотонапряжения с повышением температуры, рис. 5 с.

Рост чувствительности n-легированном графене В при комнатной качественно объяснен температуре может быть рамках сценария В фотодетектирования Дьяконва-Шура. Действительно, широкополосного хотя уравнение (6) не зависит от температуры явно, последняя входит в выражение для плазменного волнового вектора через зависящую от температуры скорость рассеяния τ. Оценка фотонапряжения ДШ с помощью уравнения (6) для f = 0,13 ТГц с учетом форм-фактор $g(\omega)$ для разных времен релаксации, демонстрирует увеличение сигнала при более коротком т, как показано на рис.6с. В нашем устройстве время релаксации импульса падает с ростом температуры. Увеличение экспериментально обнаруженного фотонапряжения при комнатной температуре может быть вызвано широкополосным выпрямлением Дьяконова-Шура.

В главе шесть представлены результаты по резонансному детектированию ТГц излучения с помощью графеновых плазмонов.

В параграфе 6.1 представлена концепция резонансного детектора ТГц излучения на основе графена. Плазмоны, коллективные высокочастотные колебания электронной системы, могут эффективно связывать свет И электрический ток и могут быть использованы для создания компактных фотоприемников, радиационных миксеров и on-chip спектрометров, работающих ниже классического предела дифракции. В данной главе продемонстрирован резонансный режим детектирования ТГц излучения с использованием полевых транзисторов на основе высококачественных ван-дер-ваальсовых гетероструктур. А именно, мы используем графен, инкапсулированный между гексагональными кристаллами нитрида бора, которые, обеспечивают самую чистую среду для долгоживущих графеновых плазмонов. Связь таких полевых транзисторов с помощью антенны с излучением в свободном пространстве, приводит к появлению постоянного напряжения постоянного тока, которое достигает максимума, когда канал содержит нечетное число четвертьволновых волн плазмона. Используя перестраиваемость скорости плазмона с помощью затворного напряжения, мы переключаем наши детекторы между более чем десятью резонансными режимами и используем эту функциональность для измерения длины волны плазмона и времени жизни.

Мы изготовили детекторы в конфигурации полевого транзистора на основе двухслойного графена (ДСГ) с высокой подвижностью носителей заряда. Для этого была использована стандартная методика сухого переноса ЛСГ ДЛЯ инкапсулирования между двумя относительно тонкими (d~80 нм) кристаллами гексагонального нитрида бора (hBN). Гетероструктура на основе графена имеет боковые контакты (рисунок 7), которые были увеличены до миллиметрового размера, а один из них служит рукавом широкополосной антенны. Другой рукав антенны был подключен к верхнему затвору, покрывающему канал полевого транзистора. В этой геометрии падающее излучение индуцирует высокочастотную модуляцию напряжения затвор-канал, тем самым запуская плазменные волны от истока.

Изготовленные устройства демонстрируют типичное для графеновых полевых транзисторов поведение, как это видно из измерений проводимости G минимальна (рисунок (c)). В частности. проводимость в точке 7 электронейтральности и возрастает с ростом Vg. Подвижность наших устройств при характерной плотности носителей $n = 10^{12}$ см⁻² превышала 10 м² /Vs при температурt T = 10 K и оставалась не ниже 2 M^2 /Vs при 300 K. Подвижность была измерена с помощью Холловских измерений на многоконтактной гетероструктуре изготовленной аналогичным методом.



Рисунок 7- (а), принципиальная схема полевого транзистора на основе инкапсулированного двухслойного графена. (b), Оптическая фотография типичного детектора на основе графена. Шкала составляет 200 мкм. (c), Проводимость типичного полевого транзистора на основе ДСГ в зависимости от напряжения затвора V_g, измеренная при 300К, 77К и 10К. Вставка: увеличенное оптическое изображение канала транзистора.

Мы начинаем наши измерения фотонапряжения с нижней границы ТГц диапазона (129ГГц), где плазменные колебания подавлены. В *параграфе 6.2* представлены экспериментальные данные по широкополосному детектированию суб-ТГц излучения. На рис. 8, а показан пример чувствительности $R_a = V_{resp}/P_B$ зависимости от напряжения V_g верхнего затвора при облучении частотой f = 0.13 THz одного из наших детекторов на основе двухслойного графена.

В хорошем согласии с предыдущими исследованиями зависимость R_a(V_g) повторяет зависимость FET-фактора $F = -\frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dV_g}$, показанную на вставке к рис. 8а. В частности, Ra возрастает ПО величине при приближении К точке электронейтральности, где она меняет знак из-за смены типа носителей заряда. Мы видим то, что R_a растет с уменьшением температуры T (вставка на рис.8а) и достигает своего максимума R_a=240B/Bт при T = 10 К. Это соответствует эквивалентной мощности шума 5 пВт/Гц^{0.5}, оцененную с использованием спектральной плотности шума Джонсона-Найквиста. Используемая структура с двумя затворными электродами (верхним и нижним) позволяет электростатически перестраивать зонную структуру двухслойного графена и открывать в нем запрещенную зону. Мы экспериментально показали, что открытие запрещенной зоны приводит к резкому росту чувствительности, а NEP достигает 0.2 пВт/Гц^{0.5}, что сравнимо с характеристиками коммерческих детекторов. При больших положительных затворных напряжениях Vg чувствительность Ra стремится к нулю при всех значениях T, тогда как при отрицательном Vg наблюдается положительное фотонапряжения (оранжевый прямоугольник на рис.8а). Такое смещение поведение является характерным для устройств такого типа и связано с дополнительным выпрямлением на p-n переходе, образованным на границах между р- легированным графеновым каналом и п-легированными контактными областями.

Фотоотклик наших устройств резко меняется, когда частота входящего излучения увеличивается (*параграф* 6.2). На рис.8b показана зависимость чувствительности R_a от напряжения затвора, измеренная при частоте падающего излучения 2 ТГц. Резко контрастируя с рисунком 8(a), R_a проявляет заметные колебания, в то время как полевой фактор F, как функция V_g, не демонстрирует подобного поведения (черная кривая на рис. 8b). Осцилляции хорошо видны как для электронного легирования графена, так и для дырочного. При этом лучший наблюдается на дырочной стороне, что, вероятно, связано контраст с вышеупомянутым р-п выпрямлением. Резонансы хорошо различимы при температуре 10 К, хотя они сохраняются вплоть до температуры жидкого азота, особенно для V_g <0.



Рисунок 8 - (а): Чувствительность на частоте f = 130 ГГц при трех температурах. Верхняя вставка: полевой фактор F как функция V_g при тех же T. Нижняя вставка: Максимальная чувствительность R_a как функция T. (b): Зависимость чувствительности от затворного напряжения, регистрируемая при 2 ГГц-излучении. Верхняя вставка показывает увеличенную область фотонапряжения для n легированного графена. Нижняя вставка: резонансное

детектирование при температуре жидкого азота.

Мы считаем, что наблюдаемые пики в фотоотклике возникают в результате плазмонного резонанса в канале полевого транзистора. Поэтому мы моделируем наш полевой транзистор, как плазмонный резонатор Фабри-Перо, снабженный выпрямляющим элементом. Это приводит к следующему выражению для чувствительности:

$$R_a = \frac{R_0}{\left|1 - r_s r_d e^{2iqL}\right|^2}$$
(8)

где R_0 - гладкая функция плотности носителей n и частоты f, зависящая от микроскопического механизма выпрямления, r_s и r_d - коэффициенты отражения волны от истока и стока соответственно, q - комплексный волновой вектор, определяющий распространение волны в канале. В двумерных электронных системах с затвором соотношение между частотой \mathcal{W} и вещественной частью волнового вектора q'линейно $\mathcal{Q}=s q'$, а фазовая скорость плазмона равна

$$s = v_F \sqrt{4\alpha_c k_F d} \approx \sqrt{\frac{e}{m} |V_g|} \tag{9}$$

Здесь m и е - эффективная масса носителей и элементарный заряд соответственно, v_F и k_F - скорость Ферми и волновой вектор Ферми, d - толщина верхнего слоя hBN и $\alpha_c = e^2/(4\pi\varepsilon_z\varepsilon_{0\hbar}v_F)$ - безразмерная константа связи, выраженная через плоскую диэлектрическую проницаемость hBN ε_z . В случае двуслойного графена масса m почти постоянна (m=0.036.m_e) для экспериментально доступных значений V_g, что позволяет варьировать скорость s в широком

диапазоне и, таким образом, переключать детектор между несколькими модами, что будет показано ниже.

Как следует из уравнения (8), чувствительность нашего выпрямителя Фабри-Перо должна достигать максимума всякий раз, когда знаменатель в уравнении (8) приближается к нулю. В наших устройствах потенциал истока равен напряжению антенны, и переменный ток не поступает в сток, что приводит к $r_sr_d \approx -1$. Поэтому резонансы должны возникать, когда вещественная часть волнового числа квантуется согласно:

$$q' = \frac{\pi}{2l} (2k+1), k=0, l, 2...$$
(10)

Правило квантования (10) в сочетании с уравнением (9) предсказывает линейную зависимость числа мод k от $|V_g|^{-0.5}$. Данная зависимость наблюдается для нашего фотоприемника экспериментально, как показано на рисунке 9 (а). Наклон экспериментальной зависимости $k(|V_g|^{-0.5})$ показанной на рис.9а хорошо соответствует теоретическому предсказанию для графеновго резонатора Фабри-Перо длиной L = 6 мкм.

Резонансный отклик, настраиваемый затвором, наших детекторов, предлагает удобный инструмент для характеристики плазмонных мод в графеновых каналах. Из уравнения (10) следует, что резонансы возникают, если L = $(2k + 1)\lambda_P/4$, где λ_P - длина волны плазмона. Используя экспериментально наблюдаемые положения пиков, мы определили зависимость λ_P от концентрации (рисунок 9(b)), которая отлично согласуется с теорией. Коэффициент сжатия λ_0/λ_P (λ_P - длина волны плазмона, λ_0 – длина электромагнитной волны в вакууме) изменяется от 50 до 150, подчеркивая ультрасильное сжатие ТГц-полей, разрешенное графеновыми плазмонами.



Рисунок 9 - (а) номер моды *k* в зависимости от $|V_g|^{-0.5}$ (символы). Сплошная линия: теоретическая зависимость для длины L = 6 мкм, массы m = 0.036me и частоты f = 2 ТГц. (b) Экспериментальные (символы) и рассчитанные (сплошные линии) длины волны плазмона λ_P как функции концентрации носителей n.

Помимо длины волны плазмона λ_p , резонансная чувствительность несет информацию о другой ценной характеристике плазмонов, а именно о их времени жизни τ_p . Последнее связано с шириной пика на половинной высоте δ как

$$\sqrt{g}/\delta = \omega \tau_p$$
 (11)

Используя лоренциан в качестве подгоночной функции к кривым фотоотклика, мы определили τ_p как функцию концентрации п. Было установлено, что время жизни τ_p варьируется между 0.3 и 0.9 пс. Это время немного меньше времени переноса $\tau_{tr}=2$ пс, извлеченного из подвижности $\tau_{tr} = \frac{m\mu}{e}$. Было обнаружено, что добротность, определяемая как $Q = 2\pi f \tau_p$, изменяется от 4 до 11 для частоты f = 2 ТГц и от 0.2 до 0.7 для частоты f = 0.13 ТГц. Это свидетельствует

о том, что необоснованно ожидать резонансного фотоотклика таких детекторов в диапазоне ГГц, и они могут работать только в широкополосном (нерезонансном) режиме в соответствии с данными на рис. 8а. Напротив, резонансная чувствительность должна становиться более ярко выраженной на более высоких частотах ТГц диапазона и может быть дополнительно улучшена в графеновых полевых транзисторах более высокого качества, например, с использованием графитовых затворов для экранирования удаленных зарядовых примесей.

Резонансное детектирование является универсальным явлением В ультрачистых графеновых устройствах и, как ожидается, не должно зависеть от физических механизмов, лежащих в основе выпрямления переменного тока в постоянное фотонапряжение. Тем не менее, важно установить природу нелинейностей, ответственных выпрямление, например, чтобы иметь за возможность увеличить чувствительность.

Прежде всего отметим, что указанная асимметрия в $R_a(V_g)$ между электронным и дырочным легированием указывает на выпрямление на p-nпереходе, образованном вблизи контактов. Это выпрямление обычно возникает изза термоэлектрического эффекта, возникающего в результате неравномерного нагрева образца и разности между коэффициентами Зеебека в графеновом канале и приконтактных областях. Однако, R_a остается конечной величиной даже для $V_g > 0$, где и графеновый канал, и приконтактная области n-легированы. Это указывает на то, что задействованы альтернативные механизмы выпрямления.

Другим общепринятым механизмом является выпрямление, возникающее в результате одновременного действия продольного высокочастотного поля и модуляции проводимости канала, также известного резистивное как самосмешивание Последнее может быть усилено вкладом, который уравновешивает разницу между кинетическими энергиями электронов на электродах исток и стока, аналогично закону Бернулли для классических жидкостей. Оба механизма объединены в так называемое выпрямление Дьяконова-Шура и приводят к тому, что R₀ пропорциональна чувствительности проводимости к изменению напряжения затвора, определяемой полевым фактором, введенным ниже. Мы сравнили резонансный фотоотклик нашего фотоприемника с чувствительностью, рассчитанной из модели ДШ, при условии, что среднее τ_p=0.6пс, а единственным параметром подгонки является эффективный импеданс антенны Z. Обе кривые показывают одно и то же функциональное поведение и количественно совпадают для n-легированного случая (где p-n-переход отсутствует) при Z=74 Ом, значение, близкое к ожидаемому от эквивалентной схемы.

В заключении обобщены результаты диссертационной работы и сделаны выводы:

1. Изготовлены и исследованы асимметричные устройства на основе УНТ и графена для выпрямления излучения ТГц диапазона: полевые транзисторы в конфигурации Дьяконова-Шура и полевые транзисторы с асимметричным контактным легированием.

2. Показано, что асимметричные транзисторные устройства на основе сеток УНТ являются эффективными детекторами суб-ТГц излучения при комнатной температуре с чувствительностью 10 В/Вт и эквивалентной мощностью шума не более 5*10-9 Вт/√Гц. На основании экспериментальных данных сделан вывод, что термо-ЭДС является не единственным механизмом выпрямления. При комнатной

детектирования температуре основным механизмом является выпрямление переменного напряжение комбинации двух эффектов: фотоза счет термоэлектрического и диодного. Рост чувствительности (до 200 В/Вт) при понижении температуры согласуется с обоими сценариями и не позволяет выделить какой-то из них. При температуре жидкого гелия проявляется дополнительный механизм детектирования излучения – болометрический эффект.

3.Показано, что плазменные волны могут влиять на частотную зависимость отклика графенового детектора с асимметричным контактным легированием даже в устройствах с относительно небольшой подвижностью электронов вдали от первого плазмонного резонанса. Усиление отклика наблюдается при температуре 77К, когда частота увеличивается в сторону резонансной частоты плазменных волн. Основным механизмом детектирования в этом случае является выпрямление на барьере, возникающим на границе графена и металл с более низкой работой выхода.

4. Продемонстрировано что полевые транзисторы на основе графена, инкапсулированного в нитрид бора, являются высокочувствительными детекторами с низкой эквивалентной мощностью шума. В результате анализа фотонапряжения при разных температурах было показано, что противоположный знак коэффициента Зеебека в р-легированном графеновом канале и п-легированной приконтактной области графен/металл приводит к фото-термоэлектрическому выпрямлению высокочастотного излучения. Для однородно п-легированного графена (где ФТЭ подавлен), было обнаружено увеличение сигнала с ростом температуры, что противоречит фото-термоэлектрическому механизму и может быть качественно объяснено выпрямлением за счет затухающих плазменных волн.

5. Нами продемонстрировано резонансное детектирование ТГц излучения плазмонами в полевых транзисторах на основе двухслойного графена, которые выступают одновременно как выпрямительные элементы, и как плазмонные резонаторы Фабри-Перо, усиливающие фотоотклик. Изменяя скорость плазмона с помощью напряжения на затворе, мы можем перестраивать наши детекторы между несколькими резонансными модами и используем этот способ для измерения длины волны и времени жизни плазмонов в двухслойном графене и его сверхрешетке.

Список публикаций:

1. Bandurin D.A., Svintsov D., **Gayduchenko I.**, Xu S. G., Principi A., Moskotin M., Tretyakov I., Yagodkin D., Zhukov S., Taniguchi T., Watanabe K., Grigorieva I. V., Polini1 M., Goltsman G. N., Geim A. K., Fedorov G. Resonant terahertz detection using graphene plasmons //Nature Communications. – 2018. – Т. 9. – №. 1. – С. 5392. Авторство не разделено.

2. **Gayduchenko IA**, Fedorov GE, Moskotin MV, Yagodkin DI, Seliverstov SV, Goltsman GN, Kuntsevich A Yu, Rybin MG, Obraztsova ED, Leiman VG, Shur MS, Otsuji T, Ryzhii VI Manifestation of plasmonic response in the detection of sub-terahertz radiation by graphene-based devices //Nanotechnology. – 2018. – T. 29. – N_{2} . 24. – C. 245204. Авторство не разделено.

3. Bandurin D. A., **Gayduchenko I.**, Cao Y., Moskotin M., Principi A., Grigorieva I. V., Goltsman G., Fedorov G., Svintsov D. Dual origin of room temperature subterahertz photoresponse in graphene field effect transistors //Applied Physics Letters. – 2018. – Т. 112. – N_{2} . 14. – С. 141101. Авторство не разделено. 4. Fedorov G, **Gayduchenko I**, Titova N, Gazaliev A, Moskotin M, Kaurova N, Voronov B and Goltsman Carbon nanotube based schottky diodes as uncooled terahertz radiation detectors //physica status solidi (b). – 2018. – Т. 255. – №. 1. – С. 1700227. Авторство не разделено.

5. Fedorov G., **Gayduchenko I.**, Titova N., Moskotin M., Obraztsova E., Rybin M., Goltsman G. Graphene-based lateral Schottky diodes for detecting terahertz radiation //Optical Sensing and Detection V. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – Т. 10680. – С. 1068007. Авторство не разделено.

6. MV Moskotin, IA Gayduchenko, GN Goltsman, N Titova, BM Voronov, GF Fedorov, F Pyatkov, F Hennrich Bolometric effect for detection of sub-THz radiation with devices based on carbon nanotubes //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – T. 1124. – №. 5. – С. 051050. Авторство не разделено.

7. Fedorov G. E., Stepanova T. S., Gazaliev A. Sh., **Gaiduchenko I.** A., Kaurova N. S., Voronov B. M., Goltzman G. N. Asymmetric devices based on carbon nanotubes for terahertz-range radiation detection //Semiconductors. $-2016. - T. 50. - N_{\odot}. 12. - C.$ 1600-1603. Авторство не разделено.

8. Gayduchenko I A, Fedorov G E, Stepanova T S, Titova N, Voronov B M, But D, Coquillat D, Diakonova N, Knap W and Goltsman G N Asymmetric devices based on carbon nanotubes as detectors of sub-THz radiation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 741. – №. 1. – С. 012143. Авторство не разделено.

9. Ryzhii V, Otsuji T, Ryzhii M, Leiman VG, Fedorov G, Goltzman GN, Gayduchenko IA, Titova N, Coquillat D, But D, Knap W, Mitin V, Shur MS Twodimensional plasmons in lateral carbon nanotube network structures and their effect on the terahertz radiation detection //Journal of Applied Physics. – 2016. – Т. 120. – №. 4. – С. 044501. Авторство не разделено.

10. **Gayduchenko I.**, Kardakova A., Fedorov G., Voronov B., Finkel M., Jiménez D., Morozov S., Presniakov M. and Goltsman G. Response of asymmetric carbon nanotube network devices to sub-terahertz and terahertz radiation //Journal of Applied Physics. $-2015. - T. 118. - N_{\odot}. 19. - C. 194303$. Авторство не разделено.

11. Fedorov G.E., **Gaiduchenko I.A.**, Golikov A.D., Rybin M.G., Obraztsova E.D., Voronov B.M., Coquillat D., Diakonova N., Knap W. and Goltsman G.N. Response of Graphene Based Gated Nanodevices Exposed to THz Radiation //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2015. – Т. 103. – С. 10003. Авторство не разделено.

12. Fedorov G, Kardakova A, Gayduchenko I, Charayev I, Voronov BM, Finkel M, Klapwijk TM, Morozov S, Presniakov M, Bobrinetskiy I, Ibragimov R, Goltsman G Photothermoelectric response in asymmetric carbon nanotube devices exposed to sub-terahertz radiation //Applied Physics Letters. – 2013. – Т. 103. – №. 18. – С. 181121. Авторство не разделено.

Цитированная литература

- 1. Dhillon S. S. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – T. 50. – №. 4. – C. 043001
- Hartmann R. R., Kono J., Portnoi M. E. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials //Nanotechnology. – 2014. – T. 25. – №. 32. – C. 322001.
- 3. Bonaccorso F. et al. Graphene photonics and optoelectronics //Nature photonics. 2010. T. 4. №. 9. C. 611.

- 4. Avouris P., Freitag M., Perebeinos V. Carbon-nanotube photonics and optoelectronics //Nature photonics. 2008. T. 2. №. 6. C. 341.
- Koppens F. H. L. et al. Photodetectors based on graphene, other twodimensional materials and hybrid systems //Nature nanotechnology. – 2014. – T. 9. – №. 10. – C. 780.
- 6. He X., Léonard F., Kono J. Uncooled carbon nanotube photodetectors //Advanced Optical Materials. – 2015. – T. 3. – №. 8. – C. 989-1011.
- 7. Vicarelli L. et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors //Nature materials. 2012. T. 11. №. 10. C. 865.
- Cai X. et al. Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene //Nature nanotechnology. 2014. T. 9. №. 10. C. 814.
- Chudow J. D. et al. Terahertz detection mechanism and contact capacitance of individual metallic single-walled carbon nanotubes //Applied Physics Letters. – 2012. – T. 100. – №. 16. – C. 163503
- 10. He X. et al. Carbon nanotube terahertz detector //Nano letters. 2014. T. 14. №. 7. C. 3953-3958.
- 11. Dyakonov M., Shur M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid //IEEE transactions on electron devices. 1996. T. 43. №. 3. C. 380-387.
- 12. Knap W. et al. Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor //Applied physics letters. 2002. T. 80. №. 18. C. 3433-3435.
- 13. Kretinin A. V. et al. Electronic properties of graphene encapsulated with different two-dimensional atomic crystals //Nano letters. 2014. T. 14. №.
 6. C. 3270-3276.
- 14. Grigorenko A. N., Polini M., Novoselov K. S. Graphene plasmonics //Nature photonics. 2012. T. 6. №. 11. C. 749.
- 15. Ryzhii V., Shur M. S. Resonant terahertz detector utilizing plasma oscillations in two-dimensional electron system with lateral Schottky junction //Japanese journal of applied physics. 2006. T. 45. №. 11L. C. L1118.