

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Матюшкин Яков Евгеньевич

**Асимметричные полевые транзисторы на основе графена и
углеродных нанотрубок для получения поляризационно-
чувствительного детектирования терагерцового излучения**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени кандидата наук
по техническим наукам

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор
Гольцман Григорий Наумович

Москва – 2023

Оглавление

Введение.....	3
Постановка проблемы.....	4
Степень разработанности проблемы.....	7
Цель работы.....	15
Задачи исследования.....	15
Основные методы исследования.....	16
Метод синтеза углеродных нанотрубок.....	16
Метод синтеза и переноса графена.....	17
Методы изготовления полевых транзисторов.....	19
Измерение фотоотклика.....	20
Туннельная спектроскопия.....	22
Основные результаты работы.....	23
Научная новизна.....	30
Основные положения, выносимые на защиту.....	31
Личный вклад автора.....	32
Список опубликованных статей по теме диссертации.....	33
Общие выводы исследования.....	34
Список использованной литературы.....	36

Введение

Излучение терагерцового, или, как его ещё называют, субмиллиметрового диапазона занимает в электромагнитном спектре область между инфракрасными и радио волнами (рис. 1). Терагерцовыми называют волны, лежащие в промежутке: 0.03 - 3 мм (0.1 - 10 ТГц). Эта область спектра привлекает к себе пристальное внимание ученых в последние несколько десятилетий [1]. Излучение терагерцового диапазона обладает низкой энергией кванта (0.4 – 40 мэВ), является неионизирующим, легко проходит сквозь большинство диэлектриков (дерево, пластик, керамика, бумага, ткань), при этом оно отражается от проводящих материалов и сильно поглощается водой. Этот набор свойств делает терагерцовое излучение перспективным для различных прикладных применений, в задачах:

- спектроскопии [2-6];
- пространственного сканирования объектов, и построения изображений (например, в системах безопасности или в пищевой промышленности) [7, 8];
- эллипсометрии [9, 10];
- исследования астрономических объектов [11-15];
- телекоммуникации [16-18];

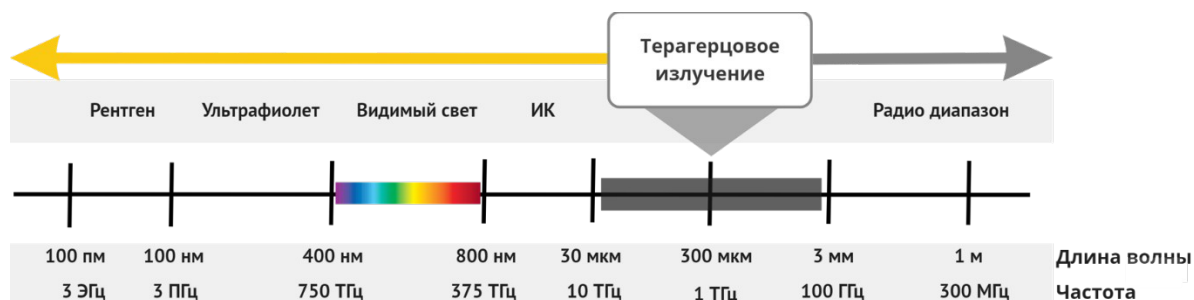


Рисунок 1 — Место терагерцового излучения в спектре электромагнитных ВОЛН.

Постановка проблемы

Для построения приборов, работающих в терагерцовом диапазоне, требуются эффективные источники и детекторы излучения.

К настоящему моменту существуют различные способы реализации терагерцового детектора, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Так, ячейки Голя (и другие пироэлектрические детекторы) позволяют измерять мощность излучения, но являются медленными. Сверхпроводниковые болометры (НЕВ – hot electron bolometers) обладают рекордно высокой чувствительностью и быстродействием, но способны работать исключительно при температурах жидкого гелия, что делает эти приборы дорогими и сложными в эксплуатации. Диоды Шоттки, также обладают высокой обнаружительной способностью и быстродействием, но требуют охлаждения до температур жидкого азота (77 К), а главное эффективность детектирования в них экспоненциально падает на частотах выше 1 ТГц. Транзисторы с высокой подвижностью носителей (НЕМТ – high electron mobility transistors) являются наиболее универсальными приборами: обладают также высокой чувствительностью и быстродействием, но кроме того способны работать при комнатных температурах и обеспечивать эффективное детектирование в широком диапазоне частот: от 100 ГГц до 10 ТГц.

Любая электромагнитная волна обладает четырьмя основными характеристиками: частота (длина волны), амплитуда, фаза и поляризация. Большинство исследований терагерцовых детекторов направлено на повышение эффективности обнаружения именно амплитуды волны, хотя такие характеристики, как фаза и поляризация также несут в себе информацию, которая может быть использована для прикладных целей, например, в задачах голографии и построения изображений, эллипсометрии, спектроскопии и телекоммуникации.

Таким образом, настоящая работа направлена на исследование возможности создания детекторов, в конфигурации полевых транзисторов, для поляризационно-чувствительного детектирования терагерцового излучения. Одним из перспективных путей для создания таких приборов является использование новых материалов пониженной размерности.

Уникальные свойства материалов пониженной размерности делают их привлекательными, в том числе и для разработки терагерцовых устройств. В частности, перспективным является использование графена и углеродных нанотрубок для создания чувствительных, быстрых, малошумящих и широкополосных детекторов терагерцового излучения, что было продемонстрировано в целом ряде работ. Детекторы терагерцового излучения на основе графена и углеродных нанотрубок могут создаваться с использованием различных физических принципов и механизмов детектирования излучения: фотовольтаический, болометрический, термоэлектрический, выпрямление на барьере, резистивное самосмешивание [19]. Существует ещё один механизм, так называемое выпрямление Дьяконова-Шура. Этот механизм основан на том, что падающее на детектор электромагнитное излучение сжимается в ультракороткие плазменные волны, которые затем выпрямляются на нелинейности в канале устройства. Этот механизм может быть реализован в любых системах с 2DEG (двумерным электронным газом) и был изучен в целой серии работ как теоретически [20, 21], так и экспериментально [22, 23]. Он является очень перспективным, так как обеспечивает высокую эффективность преобразования падающей на детектор электромагнитной энергии в полезный сигнал и позволяет осуществлять детектирование в резонансном режиме. Функционирование детекторов, исследуемых в настоящей работе, описывается при помощи расширения гидродинамической модели Дьяконова-Шура [24].

Несмотря на большое количество исследований, посвященных взаимодействию терагерцового излучения с детекторами на основе графена и углеродных нанотрубок, зависимость фотоотклика от направления и типа поляризации практически не изучалась. За исключением нескольких работ [25, 26], где изучалась зависимость фотоотклика от различной ориентации линейной поляризации излучения относительно ТГц-антенн. Взаимодействие двумерного электронного газа с излучением эллиптической и круговой поляризацией изучалось в работе [27] и показало довольно нетривиальный результат: наблюдался циркулярный эффект - в зависимости от направления круговой поляризации изменялся знак постоянного фотонапряжения. Однако, внятного теоретического объяснения этого эффекта авторам дать не удалось. После чего, была предложена теоретическая концепция детектора, которых чувствителен к различным направлениям круговой и эллиптической поляризации [28]. В этой работе предполагается, что в качестве чувствительной части детектора должен выступать двумерный электронный газ. Однако, до настоящего момента таких детекторов на практике реализовано не было.

Суммируя все вышеизложенное, развитие терагерцовых технологий является одной из передовых задач, стоящих перед современной наукой. Одним из перспективных направлений в развитии терагерцовой техники, является применение для разработки терагерцовых приборов наноматериалов и структур пониженной размерности. В частности, терагерцовые полевые транзисторы (TeraFET) на основе графена и углеродных нанотрубок уже хорошо показали себя как чувствительные, быстрые, и малошумящие детекторы терагерцового диапазона. Однако, к настоящему моменту не существует терагерцовых детекторов на основе наноуглеродных материалов чувствительных к поляризации и фазе падающего излучения. Такие детекторы могут быть чрезвычайно полезны в решении различных прикладных задач, которые обсуждались выше: терагерцовой спектроскопии,

эллипсометрии и голографии; системах телекоммуникации, безопасности, построения изображений и так далее.

Таким образом, **актуальным** является создание и экспериментальное исследование терагерцовых детекторов на основе графена и углеродных нанотрубок для поляризационно-чувствительного детектирования ТГц-излучения.

Степень разработанности проблемы

Первое упоминание об экспериментах по поляризационно-чувствительному детектированию терагерцового излучения датируется 1998 годом [29]. Авторы экспериментально наблюдали зависимость фототока от линейной поляризации излучения в дипольных приемниках на основе кремния имплантированного ионами кислорода, на сапфировой подложке. Главным результатом в этой работе является тот факт, что фототок в ответ на излучение, поляризованное перпендикулярно рукавам антенны, превышал фототок в ответ на излучение, поляризованное параллельно рукавам антенны в 3-4 раза (рис. 2(a, b)). Эффект объясняется различным пространственным распределением фотовозбужденных носителей в полупроводнике, в ответ на излучение различной поляризации.

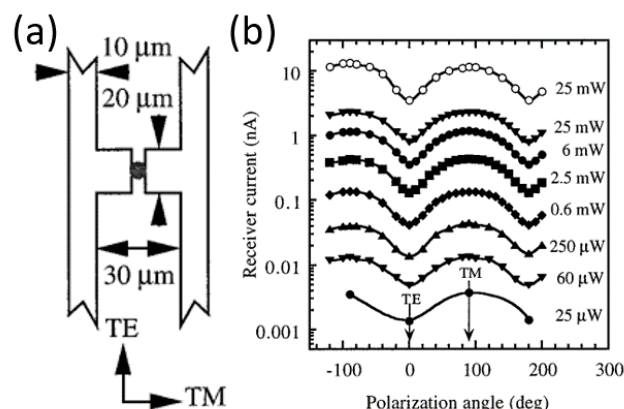


Рисунок 2 – (a) Принципиальная схема конструкции дипольного терагерцового кремниевого приемника на сапфировой подложке. (b) Зависимость фототока приемника от угла поляризации излучения при

напряжении смещения 28 В, при комнатной температуре, для различных величин мощности излучения [29].

Похожая конструкция ТГц-приемника была предложена в 2005 году [30] и затем развита в 2007 [31]. Энрике Кстро-Камус с соавторами использовали подложку фосфида индия (InP) допированную ионами железа Fe⁺ при помощи ионной имплантации. Авторы предложили использовать трехконтактную конфигурацию, в которой один общий электрод участвует в согласовании излучения с двумя другими, независимыми электродами. Предложенный приемник позволял получать полную информацию как об амплитуде, так и о поляризации падающего излучения (см. рис. 3).

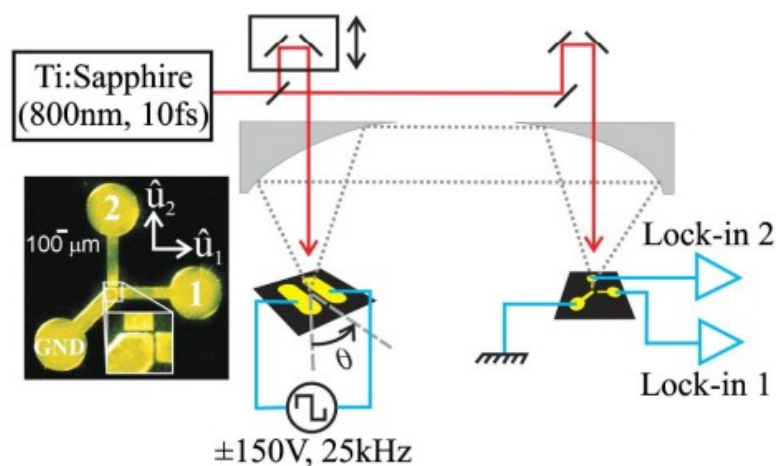


Рисунок 3 – Оптическая фотография ТГц-приемника на основе InP и схема экспериментальной установки [31].

Рассмотренные выше устройства, продемонстрировали возможность различать состояния линейной поляризации терагерцового излучения. Однако, они обладали существенным недостатком. Все они были выполнены в дипольной конфигурации, без возможности электрической подстройки работы детектора, что существенно сужало возможности прикладных применений таких устройств. Первые шаги, по решению этой проблемы были предприняты в 2008 году. Сразу в нескольких работах [32-34] было предложено использовать так называемые полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур. Существенным

преимуществом таких устройств является возможность электростатической подстройки, при помощи напряжения прикладываемого на затворный электрод. Это напряжение позволяет управлять концентрацией носителей заряда в канале устройства, и, как следствие его проводимостью (импедансом).

Это дает возможность максимизировать величину фотоотклика и осуществлять перестройку между различными режимами работы устройства. В работе [32] изучался коммерческий НЕМТ FUJITSU FHX45X, на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs (рисунок 4(a)). Исследовался фотоотклик транзистора на излучение диода Гана частотой 100 ГГц при комнатной температуре. Измерялась зависимость фотонапряжения от угла между линейной поляризацией излучения и осью симметрии прибора (рисунок 4(b)). Авторы предположили, что основным механизмом отклика является выпрямление электронной плазменной волны, возникающей под действием излучения, на нелинейности в канале. В согласовании излучения с устройством участвовали алюминиевые провода, которые соединяли терминалы транзистора с контактными площадками на керамическом корпусе, куда крепился исследуемый чип.

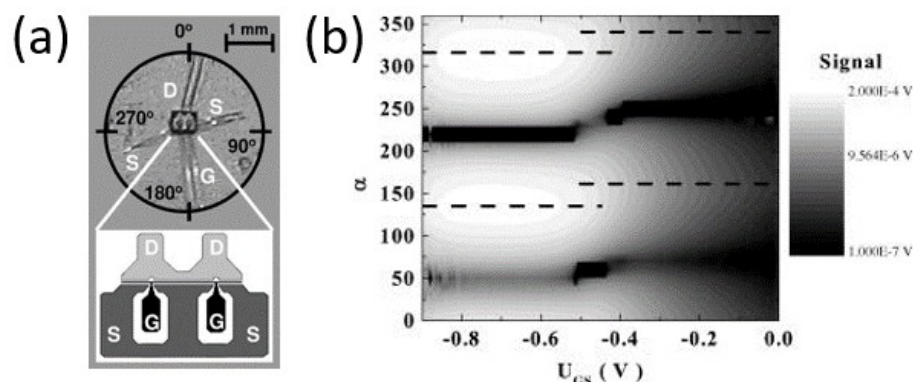


Рисунок 4 – (a) Схематическое изображение НЕМТ FUJITSU FHX45X, на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs. (b) Карта зависимой от поляризации части фотоотклика в зависимости от напряжения на затворе и от угла α [32].

Авторам удалось установить, что зависимость фотоотклика от линейной поляризации излучения является Π -периодической, и описывается простой феноменологической формулой, в которой фотонапряжение S пропорционально $\cos 2(\alpha)$, где α - это угол между осью симметрии прибора и направлением поляризации.

В работе [34] авторами был самостоятельно изготовлен MESFET на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs/GaAs. Также, как и в прошлой публикации, исследовался фотоотклик прибора на линейно-поляризованное терагерцовое излучение при комнатной температуре, но в более широком диапазоне частот излучения: 0.14 - 1 ТГц. Кроме того, авторами были получены оценки эквивалентной мощности шума детектора (NEP - noise equivalent power) для излучения частотой 1 ТГц: 10^{-9} Вт/Гц^{1/2}; и время релаксации импульса 10 нс. Для описания физического механизма формирования DC-фототока использовалась модель выпрямления объемных плазменных волн. Было показано, что зависимость фотоотклика от линейной поляризации является Π -периодической, как и в работе [32].

Полевые транзисторы на основе гетероструктур хорошо показали себя, как инструмент для детектирования линейно-поляризованного излучения. Однако, в этих работах никак не рассматривалось детектирование излучения с круговой и эллиптической поляризации. Первая попытка устранить этот пробел в экспериментальных исследованиях была предпринята в 2012 году. Дрекслер и соавторы, изучали гетероструктуру с двумерным электронным газом на основе GaAs/AlGaAs [27]. Они использовали коммерческий НЕМТ, такой же как в работе [32]. В роли антенн, согласующих излучение с каналом устройства, выступали провода, соединяющие транзистор на чипе, с контактными площадками на держателе (рис. 5(a)). В этой работе, впервые наблюдался эффект смены знака DC-фотонапряжения в зависимости от хиральности излучения круговой поляризации (рис. 5(b)). Результат объяснялся в терминах обобщенной гидродинамической модели Дьяконова-

Шура, в рамках которой фотонапряжение возникает в результате преобразования излучения в два интерферирующих между собой переменных тока, сдвинутых по фазе друг относительно друга, и выпрямляющихся на нелинейности в канале устройства. Токи распространялись в канале транзистора один от истока к стоку, а другой - от стока к истоку.

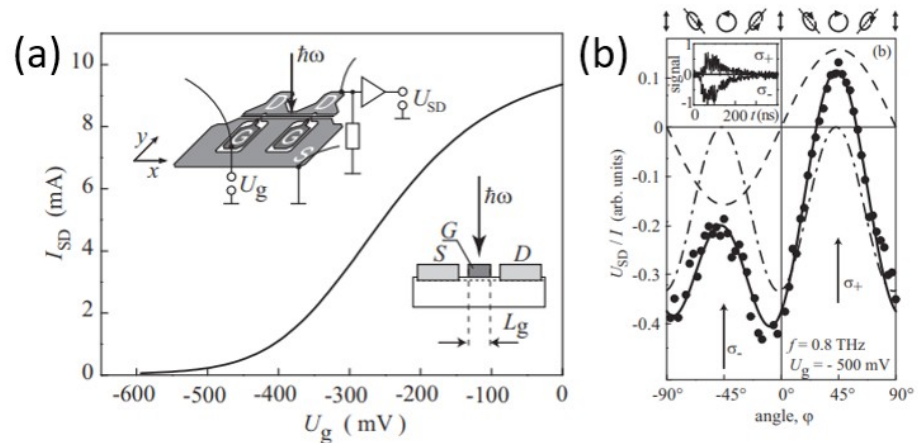


Рисунок 5 – (а) Транзисторная характеристика устройства. На вставке сверху: принципиальная схема устройства и эксперимента. На вставке снизу: схема бокового среза устройства. (б) Зависимость фотонапряжения от хиральности излучения измеренная на частоте 0.8 ТГц при комнатной температуре. Сплошная линия соответствует аппроксимации экспериментальных данных уравнением 1.45. Штриховая и штрих-пунктирная линии отображают индивидуальные вклады, пропорциональные параметрам U_A и U_B соответственно. Эллипсы сверху иллюстрируют состояния поляризации для различных ϕ - углов поворота фазовой пластинки $\lambda/4$. На вставке показаны импульсы фотосигнала, измеренные для $\sigma+$ и $\sigma-$ состояний поляризации излучения [27].

Результат был получен для частоты излучения $f = 0.8$ ТГц, при комнатной температуре, различные состояния эллиптической и круговой поляризации достигались вращением фазовой пластинки $\lambda/4$ в оптическом тракте эксперимента.

Экспериментальные данные аппроксимировались при помощи феноменологической формулы:

$$U(\phi) = U_A(U_g, f) \cdot \sin(2\phi) + U_B(U_g, f) \cdot \cos^2(2\phi + \theta) + U_C \quad (1)$$

где ϕ - это угол поворота фазовой пластинки $\lambda/4$, $U_{A,B}$, U_C и θ - это подгоночные параметры. Из этой формулы следует, что хиральный фотоотклик является $\pi/2$ -периодическим. В отличие от отклика на линейно-поляризованное излучение, который является π -периодическим.

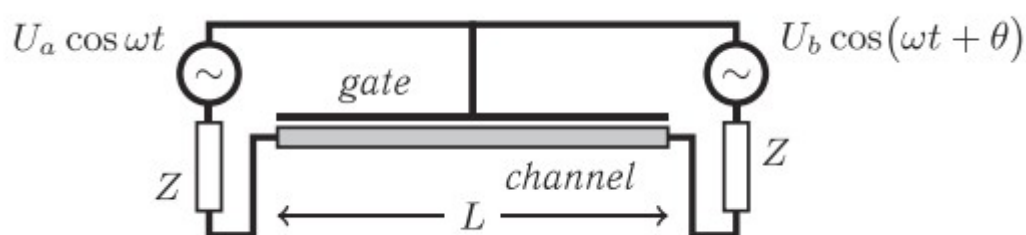


Рисунок 6 – Схематическое изображение модели: антенны представляются в виде высокочастотных источников переменного тока [35].

В 2013 году Романов и Дьяконов опубликовали статью [35], в которой была предложена теоретическая модель, описывающая экспериментальные результаты, полученные годом ранее в работе Дрекслера и соавторов [27]. В статье были представлены расчетные зависимости хирально-чувствительной части фотоотклика от таких экспериментальных параметров, как: импеданс антенн, длина затворного электрода и затворное напряжение. Носители заряда в канале транзистора описывались при помощи уравнения непрерывности и закона Ома в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$j(x) = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3)$$

где ρ и j - удельная плотность заряда и тока в канале, соответственно, $\sigma = \rho\mu$ - двумерная проводимость, μ - подвижность носителей заряда,

$U = V_g - V_{th}$ - размах затворного напряжения, V_g - затворное напряжение, V_{th} - пороговое напряжение.

А граничные условия задачи предполагали, что сток и исток являются источниками переменного тока, с одинаковой амплитудой, но разной фазой (см. рис. 6):

$$U_a \cdot \cos(\omega t) - jZ = U_1, \text{ для } x=0 \quad (4)$$

$$U_b \cdot \cos(\omega t + \theta) + jZ = U_2, \text{ для } x=L \quad (5)$$

где Z - импеданс антенны.

В итоге, решение уравнений с заданными граничными условиями представляет собой следующую формулу для DC-фотонапряжения:

$$\Delta U = \frac{1}{4} F_0 \cdot (U_a^2 - U_b^2) + \frac{1}{2} F_1 U_a U_b \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

В формулу входит два слагаемых: первое - пропорционально разности квадратов напряжений на разных концах канала, а второе - произведению этих напряжений на синус разности фаз между ними. Второе слагаемое и отвечает за эффект смены знака DC-фотоотклика, и интерференцию токов в рамках предложенной модели.

В 2015 году была предложена другая реализация хирально-чувствительного детектирования терагерцового излучения при помощи транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктуры: InAlAs/InGaAs/InAlAs/InP [36]. Транзистор имел два затворных электрода G_1 и G_2 , выполненных в виде двух периодических решеток-расчесок, вставленных одна в другую (см. рис. 7(a,b)). Такая конструкция позволяла обеспечивать неравномерное периодическое распределение носителей заряда в двумерном канале. Знак фототока в ответ на излучение круговой поляризации менялся, в зависимости от распределения периодического потенциала в структуре (см. рис. 7(c,d)). Особенностью работы, является то, что механизм хирально-чувствительного

детектирования, отличается от того, что рассматривался раньше. Хирально-чувствительное детектирование в таком устройстве, не может быть описано в терминах гидродинамической модели Дьяконова-Шура. Основным механизмом детектирования излучения в такой структуре, авторы работы называют эффект храповика, который вызван периодическим распределением потенциала в канале [37].

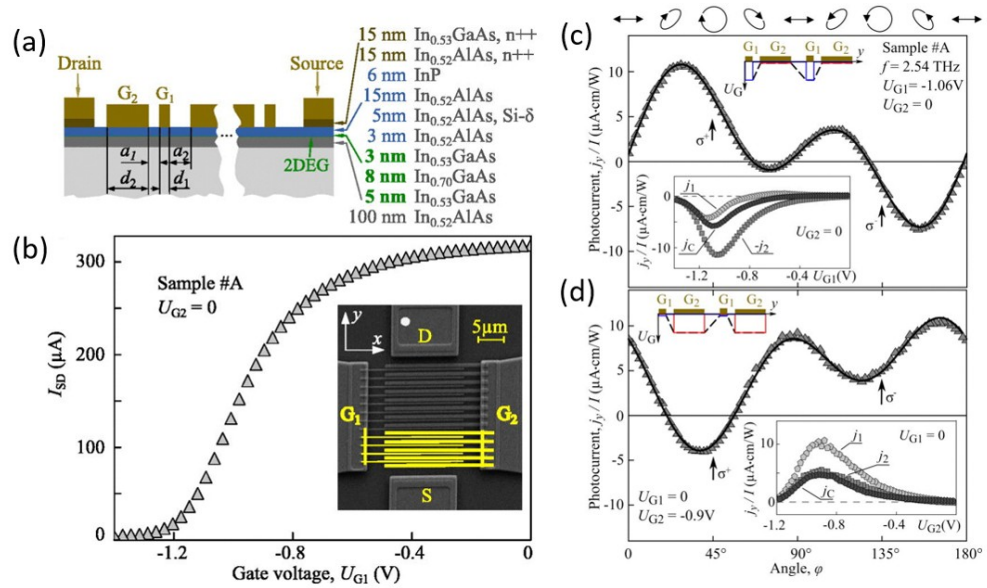


Рисунок 7 – (а) Эскиз НЕМТ с двумя решетками. Поперечное сечение структуры показывает последовательность слоев, ширину между пальцами и ширину пальцев. Использовалось ТГц излучение на частоте 2.54 ТГц при нормальном падении. (б) Ток сток-исток как функция напряжения на затворе U_{G1} , при $U_{G2} = 0$ В. На вставке показана фотография структуры (с, д) Индуцированный терагерцовым излучением нормированный фототок j_y/I в зависимости от угла ϕ , определяющего спиральность излучения. Ток измеряется при различных напряжениях, подаваемых на первый и второй затворы [36].

С 2018 по 2020 активно развивалась теория хирально-чувствительного фотоотклика в полевых транзисторах с двумерным электронным газом в серии работ Горбенко, Качаровского и Шура [24, 28, 38]. В результате, авторами были рассчитаны и предложены различные материалы и режимы

работы TeraFET с 2DEG. Разработанная теория, является расширением модели Дьяконова-Шура, на случай асимметричной конструкции антенн детектора.

Однако, приборов, описанных в работах [24, 28, 38] создано не было. Настоящая работа, посвящена изготовлению таких приборов и демонстрации их эффективного применения для поляризационно- и фазочувствительного детектирования ТГц излучения.

Исходя из этого, выбирается **объект исследования**: поляризационно-чувствительные детекторы на основе графена и углеродных нанотрубок. И ставится **цель** и основные **задачи** исследования, представленные во введении.

Цель работы

Исследование возможностей создания асимметричных полевых транзисторов на основе графена и углеродных нанотрубок. Изучение физических механизмов поляризационно-чувствительного фотоотклика, возникающего в таких структурах под действием терагерцового излучения.

Задачи исследования

1. Изготовить несколько партий полевых транзисторов разной геометрии и конфигурации на основе графена и углеродных нанотрубок.
2. Экспериментально исследовать взаимодействие терагерцового излучения круговой поляризации с асимметричными полевыми транзисторами на основе графена и углеродных нанотрубок.
3. Экспериментально подтвердить, что сигнал постоянного напряжения, возникающий в устройствах, под действием терагерцового излучения имеет разную величину для правой и левой круговой поляризации при различных температурах и частотах излучения.

4. Исследовать транспорт электронов при низких температурах в транзисторах с контактной асимметрией.
5. Экспериментально продемонстрировать, что туннельный контакт можно использовать для спектроскопии одночастичных состояний и измерения ширины запрещенной зоны в углеродных нанотрубках

Основные методы исследования

Метод синтеза углеродных нанотрубок

Подложка, на которую предварительно наносятся каталитические частицы, помещается в химический реактор. Там, в потоке реагирующего и буферного газов, на поверхности подложки формируется пленка необходимого вещества, как продукт реакции реагирующего газа и каталитических частиц. Газообразные продукты реакции, выносятся из камеры реактора в потоке газа. В рамках данной работы в качестве катализатора использовалась трехкомпонентная суспензия $Fe(NO_3)_3 - MoO_2 - Al_2O_3$ в изопропиловом спирте, в соотношении: 10 – 1 – 2, с концентрацией $C_{MoO_2} = 1.5$ мкг/мл. В качестве углеродосодержащего газа применялся метан (CH_4), а в качестве буферного газа – водород (H_2). Очистка реактора перед синтезом, и охлаждение подложки после синтеза производилось в потоке аргона (Ar). Схема эксперимента по CVD-синтезу углеродных нанотрубок представлена на рисунке 8. Каталитические металлические частицы под действием высокой температуры сорбируют и растворяют в себе молекулы углеродосодержащего газа. После чего, атомы углерода диффундируют в каталитической частицы, достигают перенасыщения и осаждаются на поверхности наночастицы формируя стенки углеродной нанотрубки. Важным этапом в процессе синтеза является подготовка и нанесение каталитических частиц. Суспензия катализатора перед нанесением на подложку подвергалась воздействию ультразвука в течение 4-6 часов, для разрушения крупных агломераций частиц и равномерного перемешивания.

При помощи микродозатора 60 мкл суспензии наносилась на подложку. После чего, суспензия равномерно распределялась по поверхности методом центрифугирования на скорости 3000 об/мин, в течение 60 секунд. Конкретные параметры всех этапов синтеза: концентрация суспензии и соотношение компонентов в ней, температура синтеза, время синтеза и охлаждения, соотношение концентраций газов и т.д., подбирались экспериментально, учитывая результаты прошлых работ, в которых использовался тот же технологический процесс [39, 40]. Таблица с точными параметрами всех этапов синтеза представлена в приложении. Главным недостатком метода является то, что заранее нельзя предсказать, где именно на подложке окажутся углеродные нанотрубки. Этот факт усложняет процесс изготовления устройств из таких хаотично-расположенных трубок.

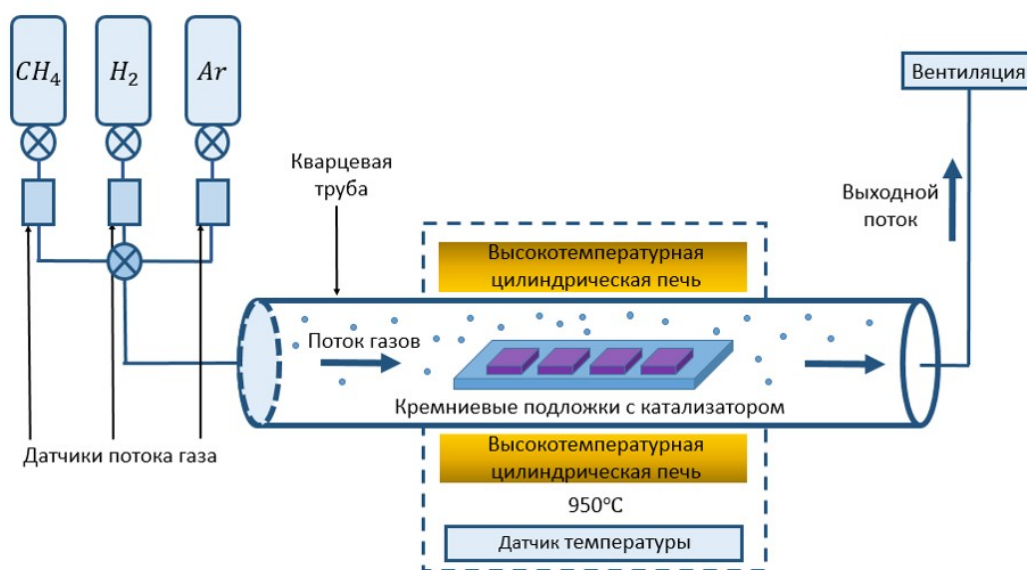


Рисунок 8 — Схема экспериментальной установки CVD-синтеза углеродных нанотрубок.

Метод синтеза и переноса графена

Метод основан на том, что нагретая металлическая (*Ni*, *Cu*, *Ir*) поверхность сорбирует на себя молекулы углеродосодержащего газа (CH_4 , C O_2). При этом, атомы углерода остаются на поверхности, а другие атомы, входящие в состав молекул газа, переходят в парообразное состояние. При

правильном подборе параметров процесса на поверхности металла формируется пленка графена. Выбор этого метода обоснован тем, что он с одной стороны позволяет получать достаточно качественные пленки с подвижностью до $10000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при комнатной температуре, с другой стороны он является достаточно технологичным и дает возможность сравнительно быстро и дешево получать однородные пленки графена площадью в несколько квадратных сантиметров [41]. Процесс синтеза проходил в несколько стадий в химическом реакторе (рис. 9(a)). Сначала медная фольга отжигалась в газовой смеси $\text{Ar} : \text{H}_2 = 4 : 1$ при давлении 500 мбар. Процесс отжига проводился при температуре $840 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 минут. Затем в камеру подавался CH_4 порцией 7 мбар. Синтез графеновой пленки продолжался на протяжении 20 минут. После чего, медная фольга очень быстро охлаждалась до комнатной температуры, в течение 10 секунд. Важнейшим параметром синтеза является относительный процент метана и скорость его подачи. Метан закачивался в камеру с расходом $280 \text{ см}^3/\text{мин}$ в течение 6 секунд. Изменение расхода метана приводит к образованию графеновых пленок разной толщины, содержащих разное количество дефектов [42]. Схематически процесс синтеза представлен на рисунке 2.5(b). После синтеза, графен с медной фольги переносился на подложку Si/SiO_2 так называемым «мокрым» методом. Схема процесса переноса представлена на рисунке 9(c). Графен, при помощи метода центрифугирования покрывался полиметилметакрилатом (PMMA), после чего медь травилась в пресульфате натрия.

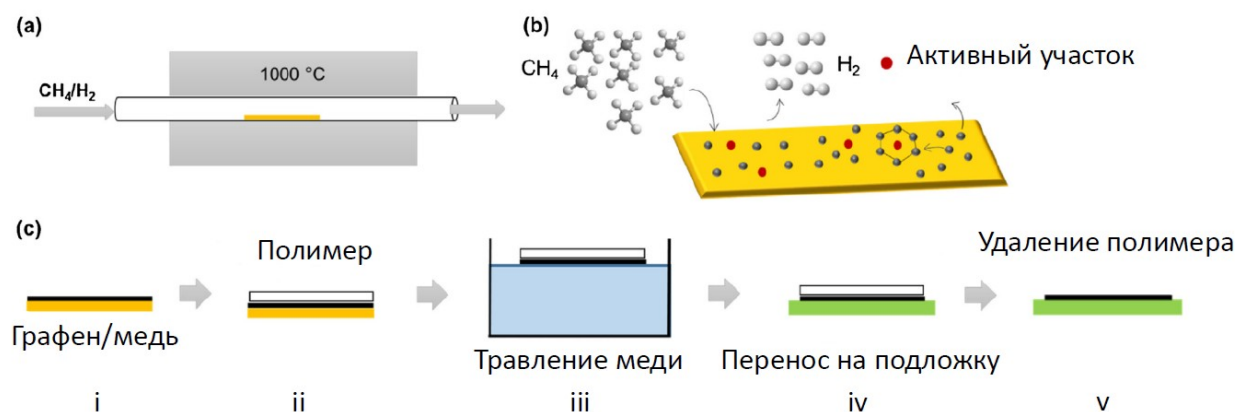


Рисунок 9 — Синтез и перенос графена. (a) Схема химического реактора. (b) Иллюстрация роста графеновой пленки. (c) Схема переноса графена с медной фольги на подложку [43].

Затем, графен покрытый PMMA переносился на подложку, и резист удаляется с поверхности графена при помощи ацетона. В результате синтеза могут быть получены как отдельные зерна однослойного графена, так и сплошная пленка, покрывающая всю поверхность подложки.

Методы изготовления полевых транзисторов

Полевые транзисторы как на основе графена, так и на основе углеродных нанотрубок изготавливались на подложках оксидированного кремния Si/SiO_2 марки КДБ-12 (100) с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при комнатной температуре. Выбор этого кремния обусловлен тем, что благодаря невысокой проводимости он является частично прозрачным для излучения ТГц диапазона. Толщина Si составляла 480 мкм , а толщина SiO_2 - 500 нм . На первом этапе технологического маршрута при помощи электронной литографии через маску электронного резиста 950PMMA A4 в кислородной плазме вытравливались малые области графена - заготовки будущих транзисторных каналов (рис. 10(1-3)). На следующем шаге, к малым кусочкам графена изготавливались контактные интерфейсы: на двухслойном резисте (MMA EL6 и 950PMMA A4) осуществлялась электронная

литография, после чего производилось напыление золота - 25 нм (рис. 10(4-6)). Далее, также через маску двухслойного резиста производилось электронно-лучевое напыление оксида алюминия Al_2O_3 - 100 нм (рис. 10(7-9)), таким образом канал графена инкапсулировался в диэлектрик, который защищал его от последующих загрязнений, возникающих в ходе технологического процесса. Главной функцией оксида алюминия является то, что он выполняет роль подзатворного диэлектрика. Кроме того, оксид алюминия на поверхности графена снижает уровень его химического легирования практически до нуля [44]. Этот момент требует отдельного пояснения. Свободно лежащий на подложке графен сильно окисляется, становится р-легированным и из-за чего приходится прикладывать большие значения затворного напряжения, для того чтобы привести положение уровня Ферми близко к точке электронейтральности графена. Оксид алюминия помогает избежать этой проблемы. На следующем этапе, изготавливался верхний затворный электрод при помощи электронной литографии и электронно-лучевого напыления Ti-Au 5-200 нм (рис. 10(10-11)). Затем, весь лишний графен стравливался с подложки в кислородной плазме (рис. 10(12)). На последнем этапе, при помощи лазерной литографии и термического вакуумного испарения Ti-Au 5-100 нм изготавливались рукава bow-tie антенны и большие контактные площадки (рис. 10(13-15)), для согласования графена с излучением и его подключения к контактам на корпусе.

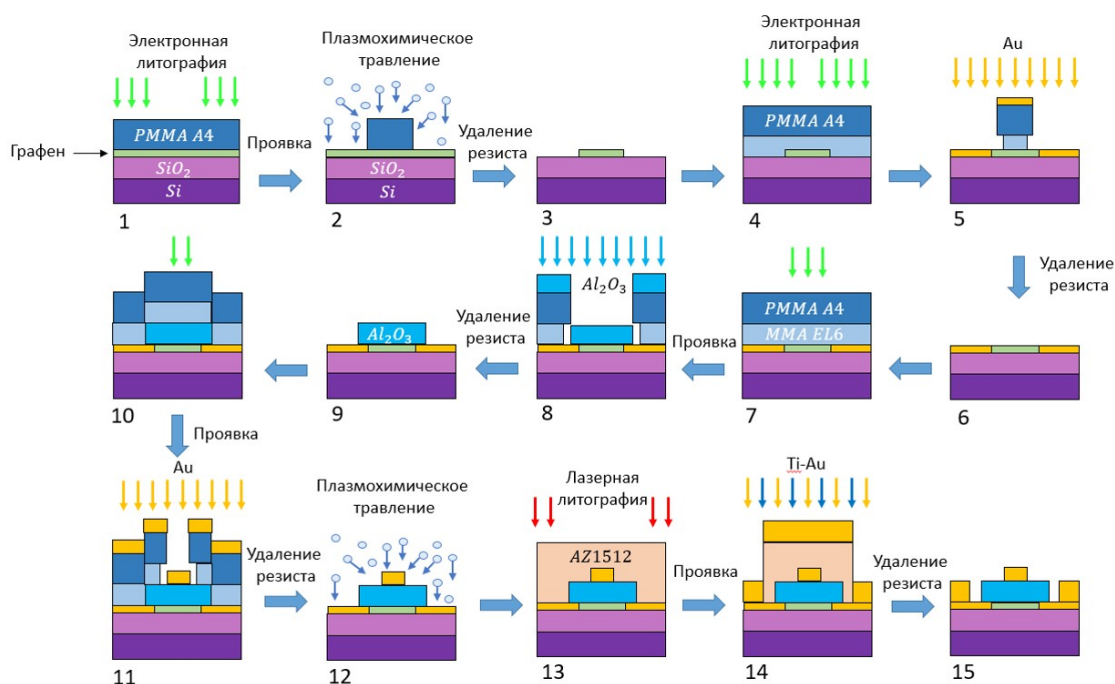


Рисунок 10 — Технологический маршрут изготовления полевого транзистора на основе графена.

Измерение фотоотклика

Эксперименты по взаимодействию исследуемых в работе образцов с терагерцовым излучением производились на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рисунке 11. Постоянный лазер на парах метанола мог работать на двух частотах излучения с двумя разными мощностями. Сразу после выхода из лазера был установлен оптомеханический прерыватель пучка, который был подключен к референсному входу синхронного детектора (Lock-In SR830). Оптомеханический прерыватель модулировал излучение на низкой частоте 77 Гц. Затем, поляризация излучения преобразовывалась при помощи фазовых пластинок $\lambda/2$ (в эксперименте с вращением линейной поляризации) и $\lambda/4$ (в эксперименте с преобразованием линейной поляризации в эллиптическую). После чего, оптический путь излучения разделялся на два, при помощи делителя пучка. Половина излучения шла на пироэлектрический детектор, который измерял мощность излучения. А другая половина,

отражаясь от двух параболических зеркал заводилась в окошко оптического криостата.

Образец устанавливался в криостат на специальном механическом держателе, на конце длинной вставки. Вставка криостата была оборудована резистивной печкой и датчиком температуры. Охлаждение осуществлялось за счет непрерывной прокачки паров гелия через объем криостата. Регулирование интенсивности потока гелия и мощности нагрева печи позволяло работать в любой точке по температуре в диапазоне от 4.2 до 300К. В эксперименте измерялось постоянное напряжение, которое возникало между электродами стока и истока образца под воздействием терагерцового излучения. Это напряжение измерялось А-каналом синхронного детектора на референсной частоте модуляции 77 Гц. Измерялась зависимость фотонапряжения от напряжения на затворе, при фиксированной поляризации и температуре, либо зависимость фотонапряжения от угла поворота фазовой пластинки, при фиксированном значении затворного напряжения и температуре. Аналогичные наборы измерений проводились при различных температурах.

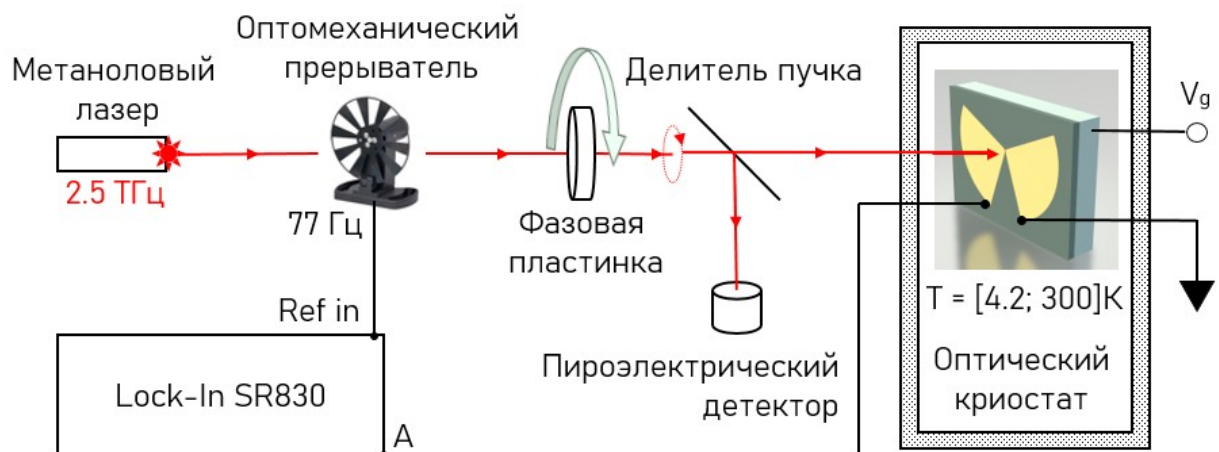


Рисунок 11 — Схема экспериментальной установки для экспериментов по синхронному детектированию ТГц излучения.

Туннельная спектроскопия

Туннельная спектроскопия - это метод исследования электронной структуры и энергетических уровней материалов на основе туннелирования электронов через потенциальный барьер. Она основана на явлении квантового туннелирования, при котором электроны могут проникать сквозь потенциальный барьер, имеющий недостаточную энергию для их прямого проникновения. В туннельной спектроскопии используются туннельные контакты, которые представляют собой структуры, состоящие из двух проводников, разделенных тонким изолятором или вакуумом. При наличии разности потенциалов между проводниками, электроны из одного проводника могут "туннелировать" через изолятор и попадать на другой проводник. Зависимость тока от напряжения между проводниками называется туннельной характеристикой. Туннельная спектроскопия позволяет исследовать энергетические уровни материалов и их электронную структуру. Путем измерения туннельной характеристики при различных значениях напряжения можно получить спектр энергетических состояний, то есть информацию о разрешенных энергетических уровнях и плотности состояний материала.

Измерения туннельных характеристик производились с использованием коммерческого усилителя тока Stanford Research 570. Напряжение сток-исток (V_{sd}) и исток-затвор (V_g) прикладывалось с аналоговых выходов карты сбора данных National Instruments (NI). Ток измерялся также при помощи карты сбора данных NI (рисунок 12). Дифференциальная проводимость получалась при помощи численного дифференцирования вольт-амперных характеристик. Измерения при низких температурах и высоких магнитных полях выполнялись в криогенной системе CFMS-16.

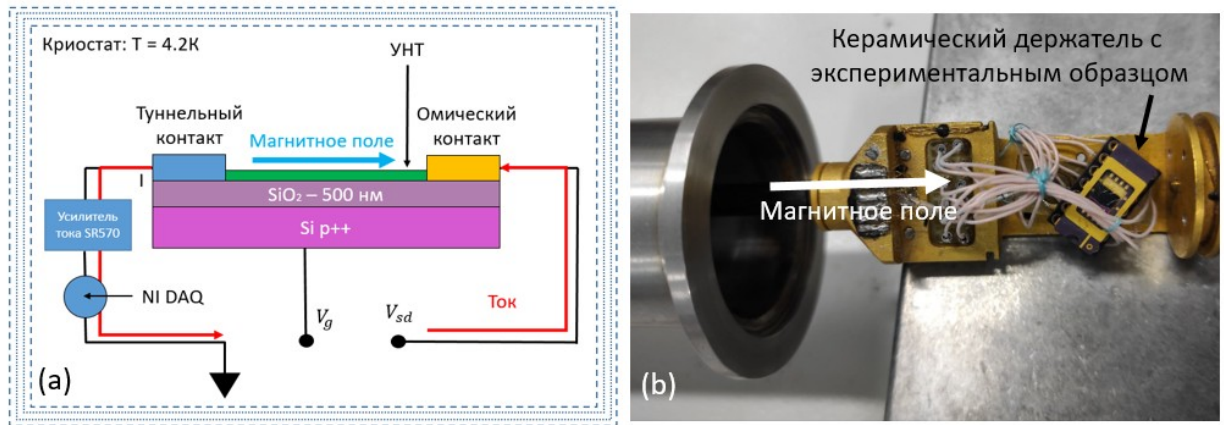


Рисунок 12 — (а) Принципиальная схема эксперимента. (б) Фотография вставки криостата с образцом, установленном на керамическом держателе.

Основные результаты работы

В ходе выполнения поставленных в работе задач было изготовлено три типа полевых транзисторов на основе графена и углеродных нанотрубок (рисунок 13):

- (i) Транзисторы на основе графена с геометрической асимметрией (устройства D1, D2);
- (ii) Транзисторы на основе углеродных нанотрубок с геометрической асимметрий (устройство D3);
- (iii) Транзисторы на основе углеродных нанотрубок с контактной асимметрий (устройства D4);

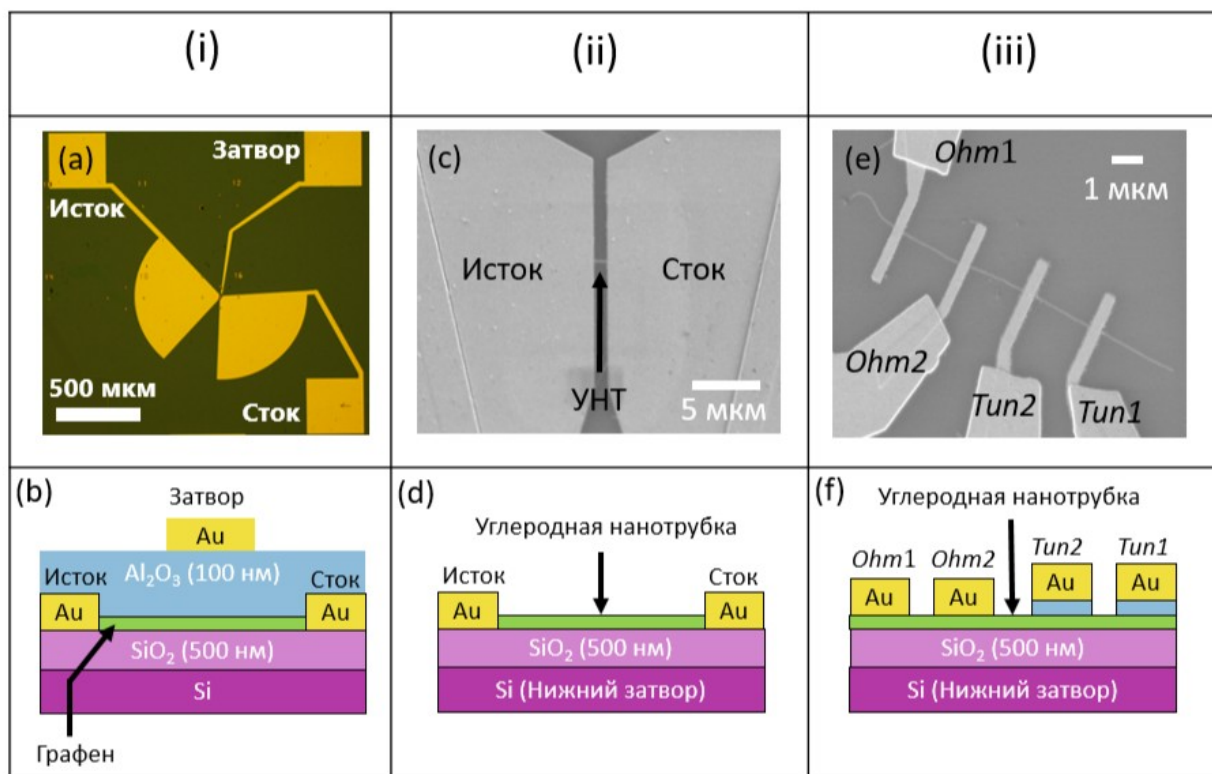


Рисунок 13 — Схемы и изображения трёх типов транзисторов, изучавшихся в работе.

Устройства типа (i) и (ii) были характеризованы при помощи измерения сток-затворных характеристик (см. рисунок 14). В зависимости от направления развертывания затворного напряжения наблюдался гистерезис, характерный для таких устройств. Минимум проводимости соответствует точке электрической нейтральности в графене.

Из измерений проводимости в зависимости от затворного напряжения для образца D1 была произведена оценка времени рассеяния и подвижности на основе модели Друде (см. рисунок 15). Проводимость графена определяется выражением:

$$G = \frac{2e^2}{h} \tau \nu \quad (7)$$

где E_F – энергия Ферми, τ – время рассеяния носителей в модели Друде, которое зависит от энергии. Энергия Ферми зависит от концентрации носителей заряда:

$$E_F = \frac{h}{2\pi} \cdot v_F \sqrt{\pi n} \quad (8)$$

а концентрация носителей заряда в канале n контролируется при помощи затворного напряжения:

$$n = \frac{\varepsilon V_g}{4\pi e} \quad (9)$$

где V_g – это напряжение на затворе, которое отсчитывается от Дираковской точки в графене, ε – диэлектрическая проницаемость материала подзатворного диэлектрика, d – его толщина.

Зависимость подвижности, представленная на рисунке 15(с) была получена при помощи формулы:

$$\mu = \frac{1}{e} \frac{dG}{dn} = \frac{1}{e} \frac{dG}{dV_g} \frac{dV_g}{dn} \quad (10)$$

Длина затухания плазменной волны оценивалась по формуле:

$$L^i = \frac{s\sqrt{2}}{\sqrt{\omega\gamma}} \quad (11)$$

где $\gamma = 1/\tau$, а ω – частота падающего на образец излучения, s – скорость плазменной волны, которая оценивалась по формуле:

$$s = \left[\frac{16\pi^2 e^3 d v_F^2 V_g}{\varepsilon h^2} \right]^{1/4} \quad (11)$$

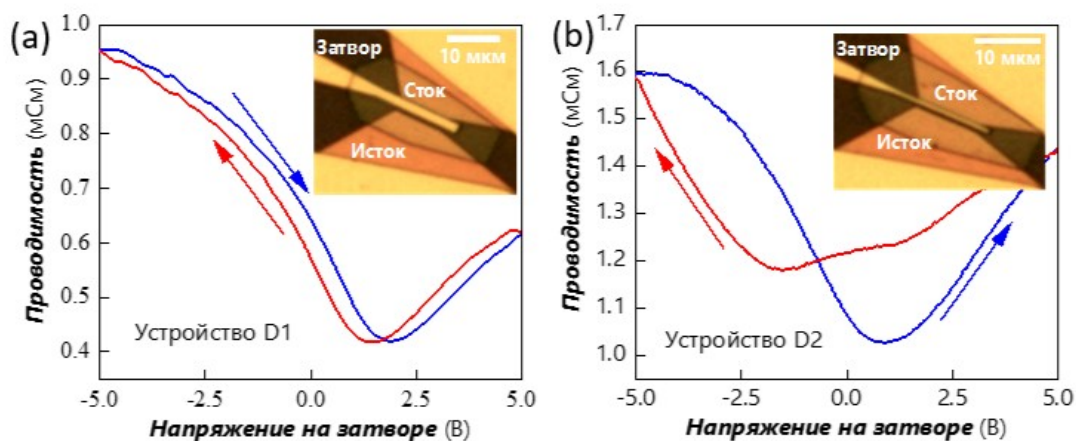


Рисунок 14 — Зависимость проводимости от напряжения на затворе для полевых транзисторов на основе графена с геометрической асимметрией.

Оценки характерных величин на основании формул (7) – (11) для образцов D1 и D3 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценки времени рассеяния, подвижности и длины затухания плазменной волны для полевого транзистора на основе графена и углеродной нанотрубки.

№ образца	$\tau, \text{фс}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$L^c, \text{нм}$
D1	20	1500	100
D3	100	10000	200

Основные результаты экспериментов по поляризационно-чувствительному детектированию терагерцового излучения транзисторами на основе графена представлены на рисунке 16. Схема экспериментальной установке по измерению фотоотклика представлена в разделе «Измерение фотоотклика», на рисунке 11. На рисунке 16 представлены зависимости фотоотклика от угла поворота фазовой пластинки $\lambda/4$ в плоскости перпендикулярной излучению. Это зависимости фотоотклика от поляризации излучения: состояния поляризации, соответствующие углам поворота фазовой пластинки отложены в верхней части графиков.

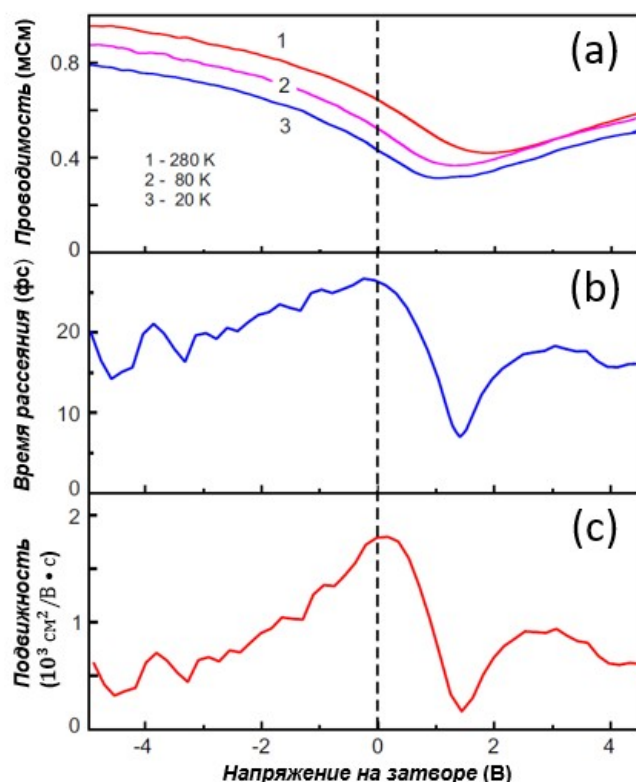


Рисунок 15 — Анализ транспортных свойств для устройства D1 в зависимости от напряжения на затворе. (a) Проводимость при разных температурах. (b) Время рассеяния при комнатной температуре. (c) Подвижность при комнатной температуре.

Главным экспериментальным результатом для образцов на основе графена является тот факт, что величина фотоотклика для двух разных хиральностей круговой поляризации (σ^{+ii} - излучение закручено по часовой стрелке, если смотреть со стороны источника, σ^{-ii} - против часовой стрелки) отличается не менее чем в два раза. Можно сказать, что это частый случай кругового дихроизма, который наблюдается благодаря сочетанию двух факторов: геометрической асимметрии антенны, и использованию графена (2DEG) в качестве канала устройства.

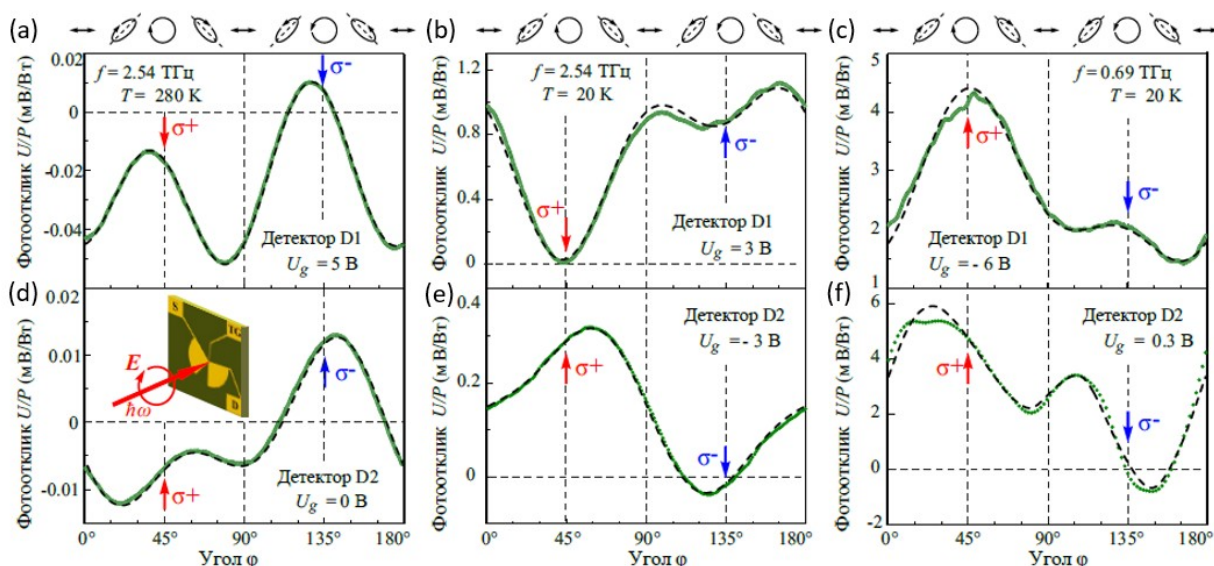


Рисунок 16 — Зависимость фотоотклика от угла поворота фазовой пластинки $\lambda/4$ по отношению к линейно-поляризованному излучению, выходящему из лазера, для двух частот излучения 2.54 и 0.69 ТГц, и двух температур 20 и 280 К. Сверху – шкала соответствия между направлениями поляризации, и значениями угла поворота, отложенными по оси X. (a, b, c) – верхний ряд, результаты для образца D1, с длиной канала 1 мкм. (d, e, f) – нижний ряд, результаты для образца D2, с длиной канала 1.5 мкм.

Важнейшие результаты для образцов типа (iii) представленные на рисунке 17 были получены при помощи методики описанной в разделе «Туннельная спектроскопия». На рисунке 17(b) представлена зависимость дифференциальной проводимости от напряжения сток исток, измеренная при температуре 5К на углеродной нанотрубке через туннельный и омический контакт в присутствии магнитного поля и без него. Главным экспериментальным результатом, является расщепление пика плотности в магнитном поле 16 Тл (величина расщепления составляет 2.5 мВ/Тл). Этот эффект связан со снятием в сильном магнитном поле долиного вырождения и наблюдался для одиночной углеродной нанотрубки впервые.

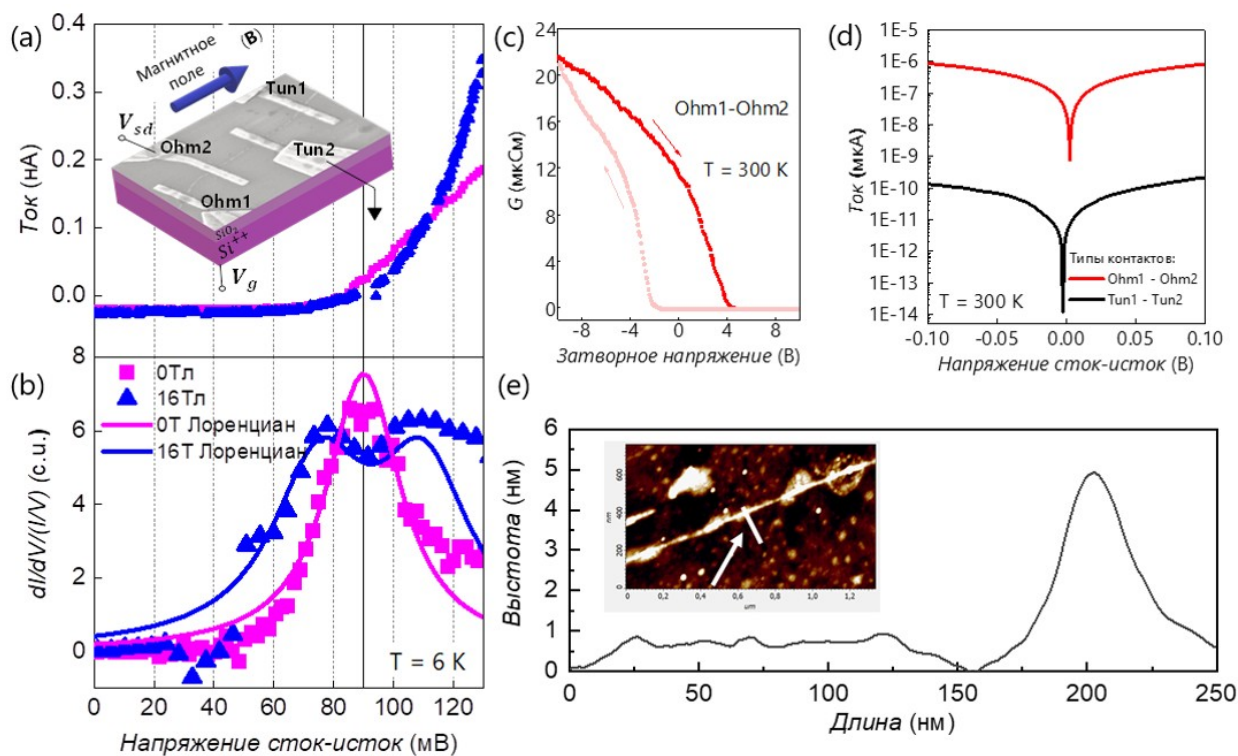


Рисунок 17 – Устройство D4. (a) ВАХ, измеренные между омическим и туннельным контактом в присутствии магнитного поля, направленного вдоль оси трубки, и без него: синяя кривая ($B = 16$ Тл) и фиолетовая кривая ($B = 0$ Тл). На вставке: СЭМ-изображение устройства с простой схемой эксперимента. (b) Синие и фиолетовые точки показывают кривые ВАХ с рис. 17(a), численно продифференцированные и разделённые на I/V . Синие и фиолетовые линии соответствуют функции Лоренца. В магнитном поле $B = 16$ Тл пик DOS расщепляется на два пика. Разница в единицах V_g между этими пиками составляет 40 мВ. (c) Транзисторная характеристика устройства: проводимость (G) в зависимости от напряжения на затворе показывает нам, что трубка является полупроводниковой (после $V_g > 4$ В проводимость равна нулю). (d) ВАХ измерена по модулю между двумя парами контактов: Ohm1-Ohm2 и Tun1-Tun2 при комнатной температуре с помощью зондовой станции. (e) Профиль высоты поперек нанотрубки, полученный с помощью АСМ. Вставка: АСМ-снимок центральной части прибора между контактами Tun2 и Ohm2. Белая стрелка указывает на белую линию, по которой получен профиль высоты.

Научная новизна

1. В работе впервые экспериментально наблюдалась интерференция плазменных волн в канале полевого транзистора с геометрической асимметрией на основе графена и одиночной углеродной нанотрубки.
2. Циркулярный эффект: различная величина фотоотклика, на излучение круговой поляризации закрученное по и против часовой стрелки, впервые наблюдался в полевых транзисторах на основе графена и одиночных углеродных нанотрубок.
3. Впервые было экспериментально показано, что туннельный контакт может быть использован для спектроскопии одночастичных состояний и определения ширины запрещённой зоны одиночных углеродных нанотрубок.
4. Было экспериментально продемонстрировано расщепление пиков плотности состояний одиночной углеродной нанотрубки в магнитном поле.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В результате выпрямления терагерцового излучения в канале полевого транзистора с асимметричной геометрией наблюдается сигнал постоянного напряжения, который отличается по величине как минимум в два раза для правой (σ^{+ii}) и левой (σ^{-ii}) круговой поляризации.
2. Измерение проводимости от напряжения на затворе в полевом транзисторе с асимметричной геометрией демонстрирует минимум, соответствующий точке электронейтральности графена и позволяет утверждать, что длина затухания плазмона L^* составляет 100 нм в графене и 200 нм в углеродной нанотрубке и сопоставима с длиной канала транзистора $L = 1$ мкм, что является необходимым условием интерференции.
3. Измерение туннельного тока, в зависимости от приложенного напряжения в устройствах с контактной асимметрией позволяет восстановить электронный спектр одночастичных состояний одиночной углеродной нанотрубки и определить её ширину запрещенной зоны.
4. Магнитное поле, приложенное вдоль оси одиночной углеродной нанотрубки в полевом транзисторе с туннельным контактом, вызывает расщепление пиков плотности состояний в её электронном спектре. Это происходит благодаря снятию долиного вырождения под действием магнитного поля. Величина расщепления составляет 2.5 мВ/Тл.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно получал все экспериментальные результаты, представленные в настоящей работе, а именно:

- производил CVD синтез наноуглеродных материалов: графена и углеродных нанотрубок
- характеризовал при помощи атомно-силовой и электронной микроскопии, синтезированные материалы
- изготавливал полевые транзисторы на основе данных материалов при помощи методов планарной технологии (электронной- и фотолитографии, напыления тонких плёнок, плазмохимического травления и др.)
- проводил электрическую характеризацию изготовленных приборов: измерял вольт амперные и затворные характеристики
- экспериментально измерял фотоотклик готовых приборов на терагерцовое излучение и проводил транспортные измерения при низких температурах
- производил обработку экспериментальных результатов

Список опубликованных статей по теме диссертации

1. Bogdanova, A.R., Krasnikov, D.V., Khabushev, E.M., Ramirez B, J.A., Matyushkin, Y.E. and Nasibulin, A.G. / Role of Hydrogen in Ethylene-Based Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes // *Nanomaterials*. (Q1) – 2023. – Т.13. – №.9. – С.1504.
2. Matyushkin, Y., Moskotin, M., Rogov, Y., Kuntsevich, A., Goltsman, G. and Fedorov, G. / Single-particle states spectroscopy in individual carbon nanotubes with an aid of tunneling contacts // *Applied Physics Letters*. (Q1) – 2022. – Т.120. – №.8. – С. 083104.
3. Matyushkin, Y., Danilov, S., Moskotin, M., Fedorov, G., Bochin, A., Gorbenko, I., Kachorovskii, V. and Ganichev, S. / Carbon nanotubes for polarization sensitive terahertz plasmonic interferometry // *Optics Express*. (Q1) – 2021. – Т. 29. – №. 23. – С. 37189-37199.
4. Shabanov, A., Moskotin, M., Belosevich, V., Matyushkin, Y., Rybin, M., Fedorov, G. and Svintsov, D. / Optimal asymmetry of transistor-based terahertz detectors // *Applied Physics Letters*. (Q1)– 2021. – Т. 119. – №. 16. – С. 163505.
5. Matyushkin, Y., Danilov, S., Moskotin, M., Belosevich, V., Kaurova, N., Rybin, M., Obraztsova, E.D., Fedorov, G., Gorbenko, I., Kachorovskii, V. and Ganichev, S. / Helicity-Sensitive Plasmonic Terahertz Interferometer // *Nano Letters*. (Q1) – 2020. – Т. 20. – №. 10. – С. 7296-7303.

Общие выводы исследования

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа литературы был предложен объект исследования и сформулирована цель и задачи данной работы.
2. Для выполнения поставленных задач были разработаны технологические маршруты создания полевых транзисторов на основе графена с геометрической и контактной асимметрией.
3. В ходе выполнения работы был произведён синтез наноуглеродных материалов: графена и углеродных нанотрубок, методом химического осаждения из газовой фазы.
4. На основе синтезированных материалов было изготовлено 3 экспериментальных партии полевых транзисторов:
 - на основе графена с геометрической асимметрией;
 - на основе одиночных углеродных нанотрубок с геометрической асимметрией;
 - на основе одиночных углеродных нанотрубок с контактной асимметрией;
5. Было экспериментально показано, что транзисторы с геометрической асимметрией позволяют различать хиральность терагерцового излучения круговой поляризации по зависимостям вольт-ваттной чувствительности от поляризации излучения.
6. Хирально-чувствительный фотоотклик был описан в рамках обобщённой гидродинамической модели транспорта носителей заряда Дьяконова-Шура. Исходя из предложенной модели, циркулярный эффект в транзисторах с геометрической асимметрией является следствием интерференции плазменных волн, возбуждаемых в канале транзистора под действием терагерцового излучения.

7. Было экспериментально продемонстрировано, что туннельный контакт в транзисторах с контактной асимметрией является эффективным инструментом для прямого измерения ширины запрещённой зоны и плотности электронных состояний одиночных углеродных нанотрубок.

Результаты, представленные в настоящей работе, открывают новые перспективы в разработке терагерцовых детекторов на основе наноуглеродных материалов и плазмонных терагерцовых интерферометров, чувствительных к поляризации излучения. Такие приборы могут быть востребованы во многих прикладных областях. Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть направлены на совершенствование методов синтеза наноуглеродных материалов и на совершенствование конструкции детекторов.

Список использованной литературы

1. The 2017 terahertz science and technology roadmap / S. S. Dhillon [и др.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2017. — янв. — т. 50, No 4. — с. 043001.
2. Exter M. van, Fattinger C., Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor // Optics Letters. — 1989. — окт. — т. 14, No 20. — с. 1128.
3. Terahertz underdamped vibrational motion governs protein-ligand binding in solution / D. A. Turton [и др.] // Nature Communications. — 2014. — июнь. — т. 5, No 1.
4. Zhang T., Zhang Z., Arnold M. A. Polarizability of Aspirin at Terahertz Frequencies Using Terahertz Time Domain Spectroscopy (THz-TDS) // Applied Spectroscopy. — 2018. — дек. — т. 73, No 3. — с. 253—260.
5. Nuss M. C., Orenstein J. Terahertz time-domain spectroscopy // Topics in Applied Physics. — Springer Berlin Heidelberg. — 2007— сев. — с. 7—50.
6. Industrial applications of THz systems / S. Wietzke [и др.] // SPIE Proceedings / под ред. X.-C. Zhang [и др.]. — SPIE, 07.2009.
7. Appleby R., Anderton R. N. Millimeter-Wave and Submillimeter-Wave Imaging for Security and Surveillance // Proceedings of the IEEE. — 2007. — авг. — т. 95, No 8. — с. 1683—1690.
8. Ahi K., Anwar M. Advanced terahertz techniques for quality control and counterfeit detection // SPIE Proceedings / под ред. M. F. Anwar, T. W. Crowe, T. Manzur. — SPIE, 05.2016.
9. Variable-wavelength frequency-domain terahertz ellipsometry / T. Hofmann [и др.] // Review of Scientific Instruments. — 2010. — февр. — т. 81, No 2. — с. 023101.
10. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves / Q. Wang [и др.] // Light: Science & Applications. — 2018. — июнь. — т. 7, No 1.

11. Groppi C. E., Kawamura J. H. Coherent Detector Arrays for Terahertz Astrophysics Applications // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. — 2011. — сент. — т. 1, No 1. — с. 85—96.
12. A 1.3-THz Balanced Waveguide HEB Mixer for the APEX Telescope / D. Meledin [и др.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2009. — янв. — т. 57, No 1. — с. 89—98.
13. THz Astrophysics from Dome A / N. Tothill [и др.] // EAS Publications Series. — 2009. — дек. — т. 40. — с. 275—280.
14. Low Noise 1 THz–1.4 THz Mixers Using Nb/Al-AlN/NbTiN SIS Junctions/
A. Карпов [и др.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2007. — июнь. — т. 17, No 2. — с. 343—346.
15. Millimetron—a large Russian-European submillimeter space observatory /W. Wild [и др.] // Experimental Astronomy. — 2008. — июль. — т. 23, No 1. — с. 221—244.
16. Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2025. — 03.2022.
<https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/>.
17. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond / T. S. Rappaport [и др.] // IEEE Access. — 2019. — т. 7. — с. 78729—7875.
18. The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks / K. B. Letaief [и др.] // IEEE Communications Magazine. — 2019. — авг. — т. 57, No 8. — с. 84—90.
19. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems / F. L. Koppens [и др.] // Nature Nanotechnology. — 2014. — окт. — т. 9, No 10. — с. 780—793.
20. Dyakonov M., Shur M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current //

- Physical Review Letters. — 1993. — окт. — т. 71, No 15. — с. 2465—2468.
21. Dyakonov M., Shur M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1996. — март. — т. 43, No 3. — с. 380—387.
 22. Muravev V. M., Kukushkin I. V. Plasmonic detector/spectrometer of subterahertz radiation based on two-dimensional electron system with embedded defect // Applied Physics Letters. — 2012. — февр. — т. 100, No 8. — с. 082102.
 23. Resonant terahertz detection using graphene plasmons / D. A. Bandurin [и др.] // Nature Communications. — 2018. — дек. — т. 9, No 1.
 24. Gorbenko I. V., Kachorovskii V. Y., Shur M. S. Plasmonic Helicity-Driven Detector of Terahertz Radiation // physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters. — 2018. — дек. — т. 13, No 3. — с. 1800464.
 25. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors / L. Vicarelli [и др.] // Nature Materials. — 2012. — сент. — т. 11, No 10. — с. 865—871.
 26. Ultrafast graphene-based broadband THz detector / M. Mittendorff [и др.] // Applied Physics Letters. — 2013. — июль. — т. 103, No 2. — с. 021113.
 27. Helicity sensitive terahertz radiation detection by field effect transistors / C. Drexler [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2012. — июнь. — т. 111, No 12. — с. 12450.
 28. Gorbenko I. V., Kachorovskii V. Y., Shur M. Terahertz plasmonic detector controlled by phase asymmetry // Optics Express. — 2019. — февр. — т. 27, No 4. — с. 4004.

29. Polarization-dependent efficiency of photoconducting THz transmitters and receivers / P. Huggard [и др.] // Applied physics letters. — 1998. — т. 72, No 17. — с. 2069—2071.
30. Polarization-sensitive terahertz detection by multicontact photoconductive receivers / E. Castro-Camus [и др.] // Applied Physics Letters. — 2005. — ИЮНЬ. — т. 86, No 25. — с. 254102.
31. An ion-implanted InP receiver for polarization resolved terahertz spectroscopy / E. Castro-Camus [и др.] // Optics Express. — 2007. — т. 15, No 11. — с. 7047.
32. Polarization sensitive detection of 100 GHz radiation by high mobility field effect transistors / M. Sakowicz [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2008. — т. 104, No 2. — с. 024519.
33. Room temperature terahertz detection based on bulk plasmons in antenna coupled GaAs field effect transistors / S. Kim [и др.] // Applied Physics Letters. — 2008. — т. 92, No 25. — с. 253508.
34. Plasma wave oscillations in nanometer field effect transistors for terahertz detection and emission / W. Кнар [и др.] // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2008. — т. 20, No 38. — с. 384205.
35. Romanov K. S., Dyakonov M. I. Theory of helicity-sensitive terahertz radiation detection by field effect transistors // Applied Physics Letters. — 2013. — апр. — т. 102, No 15. — с. 153502.
36. Helicity sensitive terahertz radiation detection by dual-grating-gate high electron mobility transistors / P. Faltermeier [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2015. — авг. — т. 118, No 8. — с. 084301.
37. Nalitov A., Golub L., Ivchenko E. Ratchet effects in two-dimensional systems with a lateral periodic potential // Physical Review B. — 2012. — т. 86, No 11. — с. 115301.

38. Gorbenko I., Kachorovsky V. Y., Shur M. Plasmonic polarization-sensitive detector of terahertz radiation // *Journal of Physics: Conference Series*. т. 1236. — IOP Publishing. 2019. — с. 012029.
39. Synthesis of individual single-walled carbon nanotubes on patterned silicon wafers / J. Kong [и др.] // *Nature*. — 1998. — окт. — т. 395, No 6705. — с. 878—88.
40. Synthesis of single-walled carbon nanotubes produced using a three layer Al/Fe/Mo metal catalyst and their field emission properties / Y. Chen [и др.] // *Carbon*. — 2007. — дек. — т. 45, No 15. — с. 3007—3014.
41. High Quality Monolayer Graphene Synthesized by Resistive Heating Cold Wall Chemical Vapor Deposition / T. H. Bointon [и др.] // *Advanced Materials*. — 2015. — июнь. — т. 27, No 28. — с. 4200—4206.
42. Efficient nitrogen doping of graphene by plasma treatment / M. Rybin [и др.] // *Carbon*. — 2016. — янв. — т. 96. — с. 196—202.
43. Emerging trends in 2D nanotechnology that are redefining our understanding of “Nanocomposites” / P. Liu [и др.] // *Nano Today*. — 2018. — авг. — т. 21. — с. 18—40.
44. Mechanism of the effects of low temperature Al₂O₃ passivation on graphene field effect transistors / C. G. Kang [и др.] // *Carbon*. — 2013. — март. — т. 53. — с. 182—187.