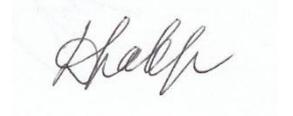


На правах рукописи



Лаврухин Денис Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОПРОВОДЯЩИМИ
АНТЕННАМИ: ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И НОВЫЕ
ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ**

1.3.19. Лазерная физика

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

Научный руководитель: *Пономарев Дмитрий Сергеевич* – канд. физ.-мат. наук, доцент, заместитель директора ИСВЧПЭ РАН по научной работе

Научный консультант: *Спектор Игорь Евсеевич* – канд. техн. наук, заведующий отделом субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН

Официальные оппоненты: *Петров Николай Владимирович* – д-р физ.-мат. наук, Университет ИТМО, заведующий лабораторией квантовых процессов и измерений

Назаров Максим Михайлович – канд. физ.-мат. наук, НИЦ «Курчатовский институт», начальник лаборатории сверхсильных световых полей Курчатовского комплекса НБИКС-пт

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук*

Защита диссертации состоится «21» ноября 2023 г. в 15:00 на заседании Диссертационного совета 24.1.223.02 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д.38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН и на сайте: <http://diss.gpi.ru/all/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.223.02
канд. физ.-мат. наук
тел.: +7 (499) 503-8777 доб. 1-47



Т.Б. Воляк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устойчивый интерес к надежным источникам и детекторам электромагнитных волн терагерцового диапазона частот (ТГц, 10^{11} – 10^{13} Гц) обусловлен их уникальными свойствами. Такие электромагнитные волны имеют субмиллиметровую длину и способны проникать в диэлектрические среды на большую глубину, при этом измерения частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости среды позволяют извлекать информацию о низкочастотных молекулярных колебаниях и структурных свойствах вещества [1]. ТГц-излучение, в отличие от видимого и инфракрасного (ИК), испытывает меньшее рассеивание, что делает его удобным инструментом для томографии и неразрушающего контроля материалов и сред [2,3]. Из-за сильного поглощения водой и, соответственно, крайней чувствительности к ее содержанию, а также к свободному или связанному состоянию молекул воды, открываются широкие перспективы применения ТГц-излучения для медицинской диагностики [4]. В настоящее время ТГц-излучение уже используется для решения практических задач: в системах контроля качества покрытий, композитов и объемных тел [5]; для поиска скрытых объектов, в том числе в системах безопасности [6]; в высокочувствительных устройствах для распознавания состава и состояния химических субстратов [7].

Благодаря малому размеру, а также простоте и надежности, для генерации и детектирования широкополосного электромагнитного излучения в современных ТГц-импульсных спектрометрах широко применяются фотопроводящие антенны (ФПА) [8]. Эффективность систем спектроскопии или визуализации определяется такими ключевыми характеристиками ФПА, как форма спектра излучения, интегральная мощность ТГц-излучения и отношение сигнал/шум (ОСШ). Предпринимаются многочисленные исследования с целью улучшения одного или сразу нескольких перечисленных характеристик ФПА за счет выбора материала и/или конструкции антенны. Установлено, что для создания ФПА требуется

фотопроводник с высоким удельным сопротивлением (для уменьшения нагрева ФПА-источника темновым током и снижения теплового шума ФПА-детектора), малым временем жизни носителей заряда (для улучшения частотных характеристик) и, по возможности, высокой подвижностью носителей (для повышения мощности ТГц-излучения). Применительно к ФПА на основе широкозонных фотопроводников (чаще всего используется выращенный при относительно низкой температуре GaAs, Low-Temperature Grown, LT-GaAs), обычно оптимизируют топологию электродов антенны для управления поляризационными, спектральными и пространственными характеристиками ТГц-излучения [9,10], а также стремятся повысить эффективность использования энергии лазерного возбуждения [11–14]. Перспективным материалом, способным непосредственно возбуждаться излучением компактных ИК волоконных лазеров с длиной волны 1,03–1,56 мкм, является узкозонный полупроводник $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, где x – мольная доля индия, а также гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InAlAs}$ на его основе. При этом, в отличие от LT-GaAs, указанные материалы имеют низкое электрическое сопротивление, и требуют оптимизации своих транспортных свойств, в частности времени жизни и подвижности фотовозбужденных носителей заряда, для эффективной работы ФПА на их основе. Однако улучшение одного из указанных параметров влечет за собой ухудшение другого; таким образом при выборе конструкции гетероструктуры всегда выполняется поиск компромиссного решения [15–18].

В настоящее время отсутствуют общепринятые физико-математические модели, в едином ключе описывающие процессы генерации и детектирования ТГц-импульсов в ФПА, которые бы одновременно учитывали параметры лазерного возбуждения, характеристики фотопроводника и влияние топологии электродов антенны. Данное обстоятельство делает задачу разработки комплексной модели ФПА актуальной и востребованной.

Целью диссертационной работы является разработка физико-математической модели генерации и детектирования ТГц-излучения в ФПА, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона, а также экспериментальная верификация данной модели путем исследования оригинальных ФПА с разной конструкцией, отличающихся фотопроводящими материалами (детекторы) и топологией электродов (источники).

Для достижения сформулированной цели в работе решались следующие теоретические и экспериментальные **задачи**:

1. Критический анализ современных фотопроводящих источников и детекторов импульсного ТГц-излучения, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами, и методов физико-математического моделирования таких устройств.

2. Разработка комплексной физико-математической модели генерации и детектирования ТГц-излучения в ФПА, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами ближнего инфракрасного диапазона, учитывающая параметры лазерного излучения, характеристик фотопроводника и топологии электродов антенны.

3. Изготовление образцов ФПА на основе различных фотопроводящих материалов и с разной топологией электродов.

4. Разработка лабораторного стенда для экспериментальной апробации образцов ФПА и верификации предложенной физико-математической модели.

5. Экспериментальные исследования образцов оригинальных ФПА с различными фотопроводниками (включая напряженные сверхрешеточные гетероструктуры) и топологиями электродов (включая управление импедансом электродов): оценка длительности и измерение временного профиля ТГц-импульсов, получение фурье-спектров импульсов, оценка рабочего частотного диапазона ФПА, а также сравнение формы спектров ТГц-излучения (для источников) и ОСШ (для детекторов). Сравнение экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями по предложенной модели.

Научная новизна

1. Разработана физико-математическая модель, позволяющая впервые рассмотреть процессы генерации и детектирования импульсного ТГц-излучения с учетом частотной зависимости импеданса ФПА, параметров лазерного излучения, а также подвижности и времени жизни носителей заряда в фотопроводнике. Выявлен и явно учтен факт влияния соотношения импеданса ФПА и сопротивления фотопроводника на регистрируемую форму ТГц-спектра. Предложен и экспериментально апробирован удобный и относительно простой подход для управления формой ТГц-спектра на стадии проектирования топологии ФПА.

2. Впервые предложен подход, позволяющий комплексно оценить влияние таких факторов, как длина зазора между электродами ФПА, размер фокального пятна лазерного излучения и транспортные характеристики фотопроводника, на мощность шума ФПА-детектора.

3. Впервые изготовлены образцы ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных многопериодных сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках GaAs.

4. Впервые экспериментально исследованы зависимости спектральной плотности мощности ТГц-генерации и соотношения сигнал/шум для ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs от мощности зондирующего лазерного излучения.

Практическая ценность работы

Разработанная физико-математическая модель может быть использована при выборе параметров фотопроводящего материала и проектировании топологии электродов ФПА. В процессе выполнения работы, помимо лабораторного стенда ТГц импульсного спектрометра для апробации оригинальных ФПА, на основе разработанных ФПА-источников и ФПА-детекторов был собран спектрометр для задач прикладной диэлектрической спектроскопии. На данном спектрометре силами коллектива исполнителей, включающего сотрудников ИСВЧПЭ РАН, ИОФ

РАН, Института регенеративной медицины Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, выполняются пилотные исследования биологических объектов. Опыт моделирования в сочетании с наработанным опытом практического применения ФПА может быть в дальнейшем использован при создании образцов перспективных компактных лабораторных систем спектроскопии и визуализации в ТГц-диапазоне частот.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная физико-математическая модель процесса генерации и детектирования импульсного ТГц-излучения в ФПА учитывает параметры лазерного возбуждения, транспортные и оптические свойства фотопроводника, а также геометрию электродов антенны.
2. Теоретически предсказанный и экспериментально верифицированный метод управления формой ТГц-спектра ФПА-источника базируется на эффекте частотно-зависимого согласования импеданса электродов антенны и сопротивления фотопроводника.
3. Экспериментально верифицированная модель учитывает взаимосвязь отношения сигнал/шум для ФПА-детектора с длиной зазора между электродами антенны, размером фокального пятна лазерного зондирования и транспортными характеристиками фотопроводника.
4. Разработанный оригинальный ФПА-детектор на основе упруго-напряженной сверхрешеточной гетероструктуры InGaAs/InAlAs, обеспечивает значительное снижение мощности шума по сравнению с ФПА-детектором на основе аналогичной решеточно-согласованной гетероструктуры, при сохранении высокого динамического диапазона спектрометра ~70 дБ в полосе частот 0,1–3,5 ТГц.

Личный вклад автора состоит в проведении математического моделирования мощностных, спектральных и шумовых характеристик исследуемых образцов ФПА; участие в сборке и настройке лабораторного стенда ТГц импульсного спектрометра. Автор принимал участие в проектировании топологии, подготовке образцов ФПА, проводил с ними

эксперименты, обрабатывал и обобщал экспериментальные данные, участвовал в обсуждении и интерпретации полученных результатов. Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных данных основана на корректном рассмотрении исследуемых физических процессов, использовании правомерных допущений, корректном применении методов исследования, а также на взаимном соответствии результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на многочисленных научных мероприятиях, в числе которых профильные конференции: Ежегодный международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» 2018-2023 (Нижний Новгород, Россия); SPIE Photonics West 2022 (Сан Франциско, США); XI-XII Всероссийские семинары по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн 2019–2020 (Нижний Новгород, Россия); 1-ая Международная конференция «Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе 2022» (Минск, Беларусь); Международная конференция «Микро- и наноэлектроника – 2021» (Звенигород, Россия); XXII ежегодное заседание Научного Совета РАН по физике конденсированных сред и научно-практической семинар «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» 2019 (Черноголовка, Россия); METANANO 2018 (Сочи, Россия); 17th International Conference Laser Optics 2018» (Санкт-Петербург, Россия); 7th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies 2018 (Варшава, Польша).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов и списка литературы. Материал изложен на 120 страницах машинописного текста и содержит 29 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 140 источников.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, а также отражены в 2 патентах на изобретение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении работы описывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи диссертации. Приводится научная новизна и практическая ценность работы, изложены выносимые на защиту основные положения и форма апробации результатов.

Первая глава посвящена литературному обзору по тематике работы.

Описаны современные подходы к осуществлению генерации и детектирования импульсного ТГц-излучения, отмечены их достоинства и недостатки. Проведено сравнение моделей и методов физико-математического моделирования ФПА. Рассмотрены два предельных режима детектирования ТГц-импульсов ФПА на основе фотопроводников с разным временем жизни носителей. Применительно к перспективным фотопроводящим материалам для работы с фемтосекундным лазерным возбуждением ближнего и среднего ИК-диапазонов выполнен сравнительный анализ методов управления свойствами носителей зарядов; показана перспективность использования разработанных в ИСВЧПЭ РАН оригинальных сверхрешеточных гетероструктур на основе слоев InGaAs/InAlAs: решеточно-согласованных (РСС) и с искусственно введенными в процессе роста упругими механическими напряжениями (УНС).

Сделан вывод о необходимости разработки комплексной модели процессов генерации и детектирования ТГц-излучения, которая учитывает особенности лазерного возбуждения, свойства фотопроводника и топологию ФПА: спектр, пространственный и временной профили лазерного импульса, время жизни и подвижность неравновесных носителей заряда в

фотопроводнике, частотную зависимость характеристического импеданса электродов антенны.

Вторая глава посвящена разработке физико-математической модели генерации и детектирования ТГц-импульсов в ФПА для оптимизации характеристик ФПА-источников и ФПА-детекторов. Применительно к генерации ТГц-импульсов отдельно рассматриваются: (этап 1) возникновение переходного тока в фотопроводнике и (этап 2) процесс генерации ТГц-излучения с учетом взаимного влияния частотно-зависимого импеданса антенны и сопротивления фотопроводника. Применительно к детектированию сначала вычисляется электрическое поле, наводимое в зазоре приемной антенны падающими электромагнитными волнами, затем рассматривается движение неравновесных носителей заряда в наведенном поле и учитывается факт экспериментальной регистрации формы ТГц-импульса методом оптического стробирования–зондирования ФПА-детектора лазерными импульсами с разной задержкой и измерением среднего тока детектора.

Для однородного лазерного возбуждения фотопроводника в рамках одномерной модели Друде [19] получен аналитический вид переходного тока $i(t)$, введено характеристическое сопротивление фотопроводника R_s :

$$i(t) = \frac{U_{DC}}{R_s} f(t), \quad R_s = U_{DC} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) dt / \int_{-\infty}^{+\infty} i^2(t) dt \propto \frac{g^2}{P_{opt} \mu_n}, \quad (1)$$

где U_{DC} – приложенное к ФПА напряжение смещения; $f(t)$ – безразмерная функция времени; g – длина зазора между электродами ФПА; μ_n – подвижность электронов; P_{opt} – средняя мощность (далее мощность) возбуждения. В случае неоднородного пространственного профиля возбуждения, т.е. при фокусировке пучка лазерного излучения короткофокусной линзой, сопротивление фотопроводника складывается из двух включенных последовательно сопротивлений: $R_s = R_{dark} + R_{ph}$, где R_{ph} и R_{dark} – электрическое сопротивление для области фокального пятна и периферийной части полупроводника в зазоре; из выражения (1) получена оценка их отношения сопротивлений:

$$\frac{R_{\text{dark}}}{R_{\text{ph}}} \sim \frac{(g - 2b)^2 \text{erf}(1)}{(2b)^2 (1 - \text{erf}(1))} = 5,25 \left(\frac{g}{2b} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

где $2b$ – размер фокального пятна по уровню снижения мощности в e раз; $\text{erf}(1) = 0,84$ – значение функции ошибок для единичного аргумента. На основе выражения (2) сформулирован критерий, при выполнении которого $R_{\text{dark}}/R_{\text{ph}} \gg 1 \rightarrow R_s \approx R_{\text{dark}}$, т.е. сопротивление фотопроводника не зависит от параметров лазерного возбуждения (предложенный подход допускает обобщение на случай негауссового профиля интенсивности). Показано, что учет размера и формы фокального пятна в зазоре между электродами ФПА приводит к увеличению значения R_s , по сравнению с однородным возбуждением, поэтому снижается эффективность согласования импеданса электродов ФПА-источников с сопротивлением фотопроводника, но появляется возможность уменьшения шума ФПА-детекторов. Получен аналитический вид частотного спектра переходного тока $\tilde{i}(\nu)$, а также с учетом выражения (2) для отношения двух составляющих сопротивления R_s спектр мощности $P_i(\nu)$ [Вт/Гц]:

$$\tilde{i}(\nu) \approx \frac{2U_{\text{DC}}}{R_s} \frac{\tau_{\text{rec}}}{1 + j2\pi\nu \tau_{\text{rec}}} \exp(-\pi^2 \tau_p^2 \nu^2) = \frac{U_{\text{DC}}}{R_s} \tilde{f}(\nu), \quad (3)$$

$$P_i(\nu) = 2|\tilde{i}(\nu)|^2 R_s f_{\text{rep}} = \frac{2U_{\text{DC}}^2 |\tilde{f}|^2 f_{\text{rep}}}{R_s},$$

где $\nu \geq 0$ – временная частота колебаний; τ_{rec} – время жизни неравновесных электронов; $\tilde{f}(\nu)$ – фурье-образ функции $f(t)$ [1/Гц]. Из анализа влияния времен τ_p и τ_{rec} , являющихся параметрами выражения (3) для формы спектра мощности, сделан вывод о том, что при решении практических задач ТГц-спектроскопии следует использовать лазерное излучение с длительностью импульсов (по спаду в e раз) $\tau_p \leq 120$ фс [20].

С целью последующей экспериментальной апробации предложенной физико-математической модели в части управления спектром ТГц-излучения, для ФПА-источника со спиральной топологией электродов численными методами был получен комплексный частотно-зависимый

импеданс $Z_a(\nu)$ [21],[22]. (см. Рис. 1); спектр мощности для ФПА-источника $P_{\text{THz}}(\nu)$ рассчитывается на основе значений $Z_a(\nu)$ и R_s :

$$\eta_m = 1 - \left(\frac{Z_a - R_s}{Z_a + R_s} \right)^2, \quad P_{\text{THz}}(\nu) = \eta_m P_i(\nu), \quad (4)$$

где η_m – эффективность согласования импеданса.

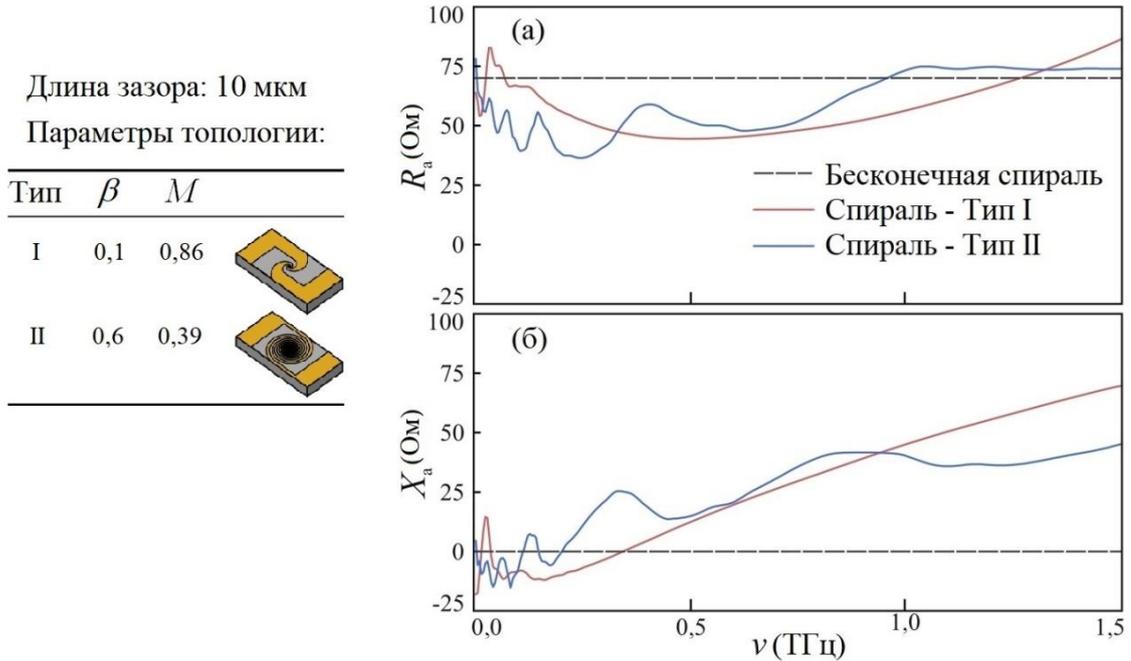


Рис. 1. Моделирование импеданса для топологий электродов «логарифмическая спираль»: (а) радиационное (R_a) и (б) реактивное (X_a) сопротивление. Штриховая линия – импеданс идеальной спирали $Z_{a0} = R_{a0} + iX_{a0} = 71$ Ом [22].

Для типичной мощности лазерного возбуждения 5 мВт, показано, что в ФПА-источниках на основе распространенных фотопроводников всегда имеет место сильное рассогласование импеданса: $R_s \gg Z_a$, что является одной из причин невысокой ТГц-мощности; при этом однородное по зазору между электродами возбуждение с точки зрения повышения эффективности генерации оказалось предпочтительнее.

Рассмотрено возникновение в зазоре ФПА-детектора индуцированного электрического поля $E_{\text{det}}(t)$ (фурье-образ: $\tilde{E}_{\text{det}}(\nu)$), наведенного полем падающей на детектор электромагнитной волны $\tilde{E}_{\text{THz}}(\nu)$, а также влияние лазерного зондирования зазора ФПА-детектора на величину поля [23]: $\tilde{E}_{\text{det}}(\nu) \approx \nu \tilde{E}_{\text{THz}}(\nu)$, $\tilde{E}_{\text{det}}(\nu \rightarrow 0) \rightarrow 0$. Показано, что для вычисления R_{det}

можно использовать выражение (1), при пространственно-неоднородном возбуждении зазора – с учетом выражения (2), т.е. уменьшение пятна оказывается эффективным способом увеличения R_{det} . Получено выражение для регистрируемого ФПА-детектором спектра мощности ТГц-импульса [Вт/Гц]:

$$P_{\text{TDS}}(\nu) \propto |\tilde{I}_{\text{det}}(\nu)|^2 \propto P_{\text{THz}}(\nu) \left[\frac{\mu_n^2 (2\pi\tau_{\text{rec}}\nu)^2}{1 + (2\pi\tau_{\text{rec}}\nu)^2} P_{\text{opt}}^2 \right]_{\text{det}} \exp(-2\pi^2 \tau_p^2 \nu^2), \quad (5)$$

где $P_{\text{THz}}(\nu)$ – спектр мощности подающего на детектор со стороны ФПА-источника ТГц-излучения – выражение (4). Наличие в формуле (5) спадающего по экспоненте множителя, описывающего конечную длительность импульсов лазерного зондирования τ_p , приводит к ограничению сверху ширины спектральной чувствительности ФПА-детектора.

Подстановка частотно-зависимых импедансов электродов ФПА-источника и ФПА-детектора, а также параметров их фотопроводящих материалов в полученные для предлагаемой модели выражения (4) и (5), дает возможность предсказать регистрируемую форму ТГц-спектра для любой пары ФПА.

Доминирующим механизмом генерации шума в ФПА-детекторах является тепловой шум [24,25], для которого среднеквадратичное значение (СКЗ) силы тока $I_{\text{JN}} \propto 1/\sqrt{R_{\text{det}}}$, поэтому минимизировать тепловой шум можно за счет уменьшения размеров фокального пятна лазерного зондирования. Показано, что из-за асимметрии электродов или формы фокального пятна к тепловому шуму добавляется дробовой шум [25] (из-за тока диффузионной природы I_{diff}) с СКЗ силы тока $I_{\text{S}} \propto \sqrt{I_{\text{diff}}} \propto \sqrt{P_{\text{opt}}}$, причем I_{S} оказывается сопоставимо с I_{JN} . Рассмотрена зависимость регистрируемой мощности шума ФПА-детектора P_{N} от мощности лазерного зондирования и размера фокального пятна, выполнены численные оценки шума для распространённых фотопроводников. Показано, что имеется возможность использовать фотопроводящие материалы с большей

подвижностью μ_n электронов, а значит с бóльшей величиной отклика детектора $P_{TDS}(v)$, но при этом, несмотря на снижение удельного электрического сопротивления фотопроводящего материала, избегать увеличения мощности шума. С целью экспериментальной проверки физико-математической модели детектирования ТГц-импульсов, для сравнительных исследований были выбраны образцы ФПА-детекторов на основе оригинальных фотопроводящих материалов: РСС и УНС сверхрешеточных гетероструктур $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_yAl_{1-y}As$, отличающихся значением параметра y - мольной долей индия [18].

Таким образом, в данной главе теоретически рассмотрены вопросы повышения мощности ТГц-излучения, управления формой и шириной спектра генерации ФПА-источника, увеличения спектральной чувствительности и снижения мощности шума в ФПА-детекторе. На основе физико-математической модели предложены подходы, направленные на повышение эффективности ФПА. Для экспериментальной апробации модели выбрана топология электродов ФПА-источника и оригинальные фотопроводящие материалы для ФПА-детектора. Для апробации модели выбраны топологии электродов ФПА-источника и оригинальные фотопроводящие материалы для ФПА-детектора.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям генерации и детектирования ТГц-излучения в ФПА на основе оригинальных топологий и зонных дизайнов фотопроводников при фемтосекундном лазерном возбуждении. Для экспериментальной верификации разработанной физико-математической модели в части возможности оптимизации спектра ФПА-источников были выбраны спиральные топологии электродов с разной степенью закрутки на фотопроводящем слое LT-GaAs.

Для демонстрации возможности оптимизации характеристик детекторов были использованы образцы ФПА на основе РСС и УНС сверхрешеточных гетероструктур с топологией электродов «галстук-бабочка» с углом раствора $\alpha = 60^\circ$. Лабораторный стенд ТГц импульсного спектрометра для измерения характеристик ФПА, оптическая схема которого приведена на Рис. 2, был

собиран в отделе субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН. Использовались следующие параметры лазерных импульсов: центральная длина волны $\lambda = 0,78$ мкм, $\tau_p \approx 60$ фс, $P_{opt} = 0,1-10$ мВт.

Поскольку спектр мощности переходного тока $P_i(\nu)$ всегда имеет монотонно-убывающий характер и не обладает какими-либо резонансными особенностями, был сделан вывод о том, что наблюдаемая на Рис. 3 модуляция формы экспериментальных ТГц-спектров вызвана частотно-зависимым изменением эффективности согласования импеданса η_m антенны и сопротивления фотопроводника R_s . Анализ формы спектров выявил хорошее согласие между рассчитанными по модели и измеренными в экспериментах кривым и тем самым подтвердил возможность управления формой ТГц-спектров на стадии проектирования топологии ФПА.

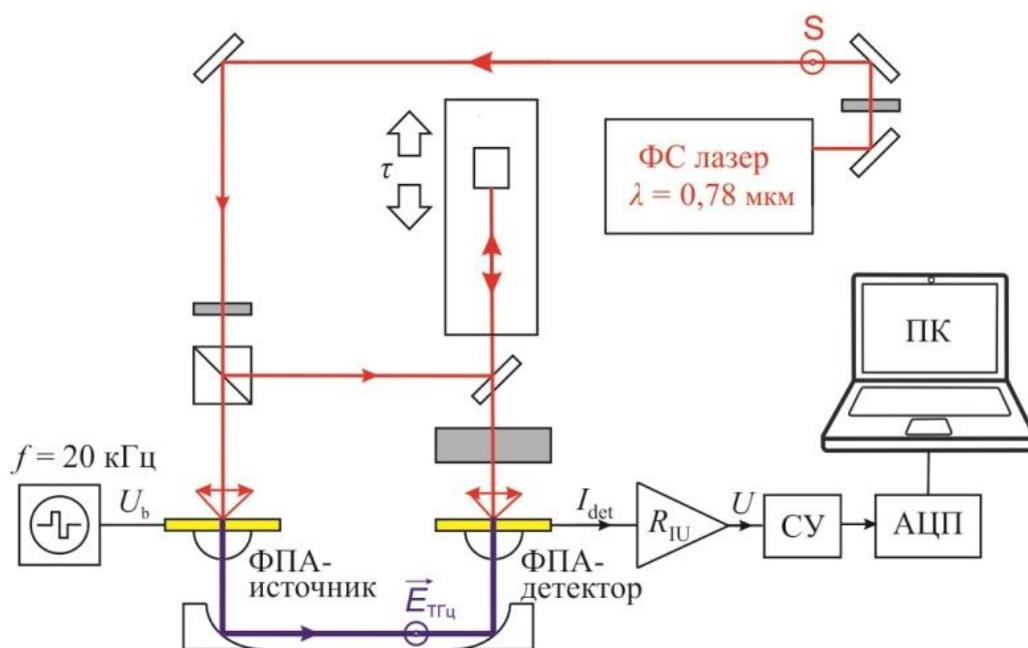


Рис. 2. Оптическая схема лабораторного стенда импульсного ТГц-спектрометра для апробации оригинальных образцов ФПА: СУ – синхронный усилитель, ПК – персональный компьютер, АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

Экспериментально обнаружено, что оптимальное значение ОСШ для исследуемых образцов ФПА-детекторов достигалось при размере фокального пятна лазерного излучения в зазоре между электродами $2b \approx 6,6$ мкм, что хорошо согласуется с теорией: согласно выражению (2) при таком пятне

$R_{\text{dark}}/R_{\text{ph}} \approx 3,6$, следовательно, тепловой шум мал и слабо растет с мощностью лазерного зондирования ФПА-детектора. Показано, что наблюдаемый на Рис. 4а быстрый линейный рост мощности шума для РСС в рассматриваемом случае пространственно-неоднородного зондирования ФПА-детектора является экспериментальным подтверждением наличия дробового шума, связанного с диффузией электронов из центральной области зазора к его периферии.

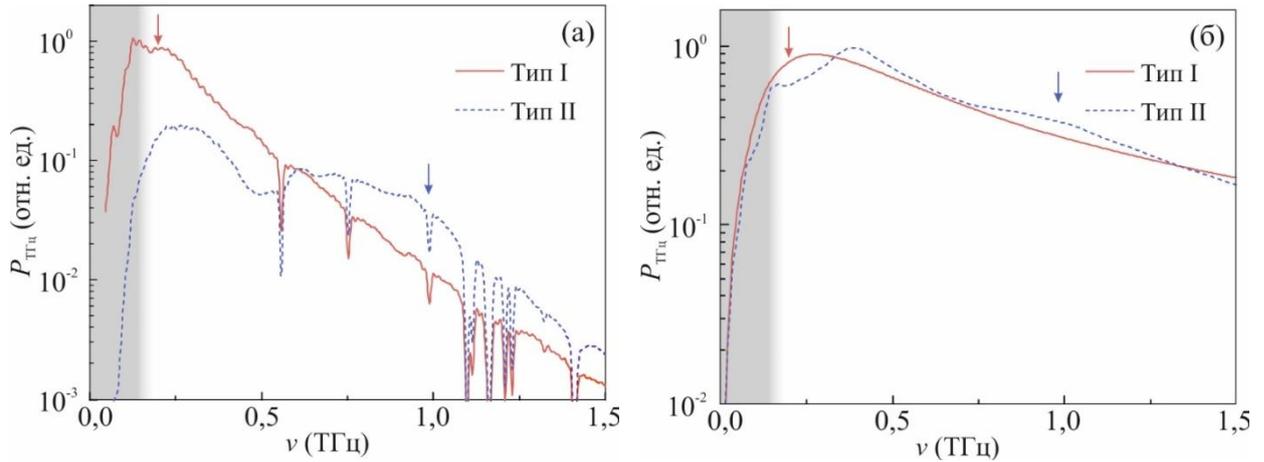


Рис. 3. Верификация физико-математической модели ФПА в части управления спектром ТГц-генерации: (а) измеренные экспериментально и (б) рассчитанные по разработанной модели ТГц-спектры мощности. Стрелками отмечены характерные особенности кривых.

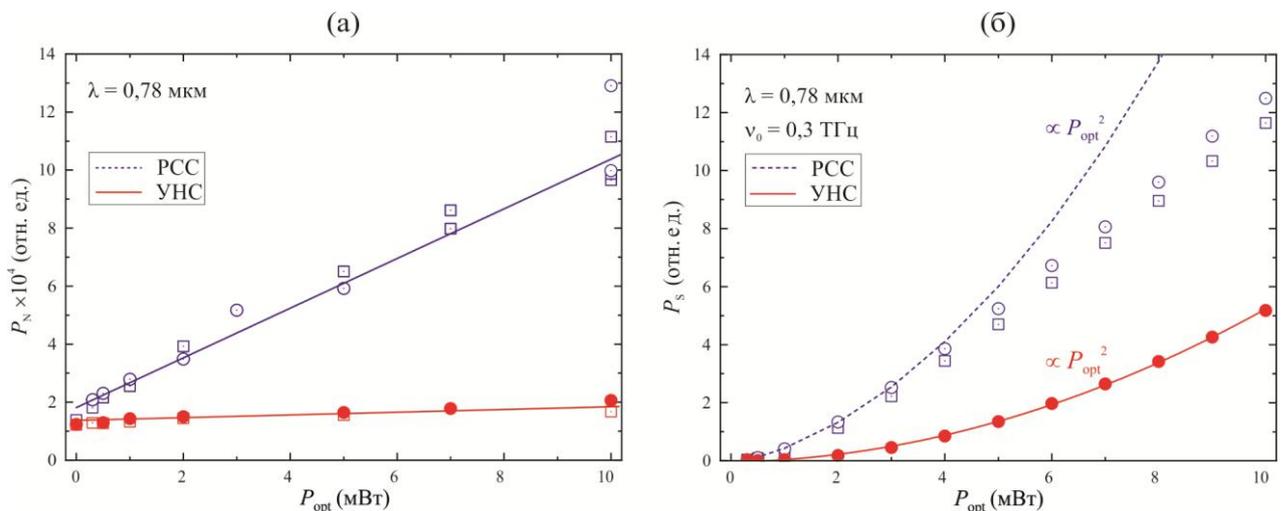


Рис. 4. Мощности шума P_N и сигнала P_S в зависимости от мощности лазерного зондирования для ФПА-детекторов на основе РСС (пунктирные кривые) и УНС (сплошные кривые): (а) экспериментальные данные (маркеры) и линейная аппроксимация для мощности шума; (б) экспериментальные данные (маркеры) и параболическая аппроксимация для мощности ТГц-сигнала на частоте $\nu_0 = 0,3$ ТГц.

Показано, что для ФПА-детектора на основе УНС мощность детектируемого сигнала отлично согласуется с квадратичным законом (5) во всем рассмотренном диапазоне P_{opt} , в то время как для ФПА-детектора на основе РСС, как видно на Рис. 4б, наблюдался более медленный, насыщающийся рост мощности сигнала.

Значения ОСШ для ФПА-детекторов на основе РСС и УНС, рассчитанные по приведенным на Рис. 4 экспериментальным данным, демонстрируют интересную особенность детекторов на основе УНС: начиная с мощности лазерного зондирования $\approx 5\text{--}6$ мВт, они начинают работать эффективнее, при этом кривые ОСШ для разных детекторов пересекаются (Рис. 5).

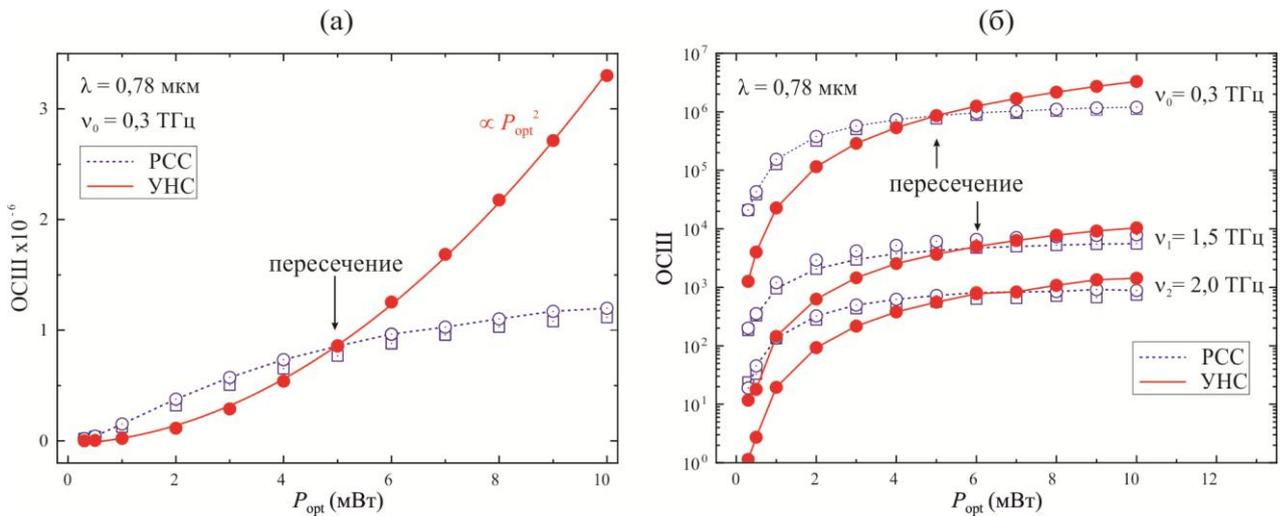


Рис. 5 – Сравнение отношения сигнал/шум для ФПА-детекторов на основе РСС (пунктирные кривые) и УНС (сплошные кривые) сверхрешеточных гетероструктур: (а) – линейный масштаб по вертикали, частота $\nu_0 = 0,3$ ТГц; (б) – логарифмический масштаб по вертикали, три частоты – 0,3 , 1,5 и 2,0 ТГц.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили корректность предложенной физико-математической модели при описании спектров излучения ФПА-источников и отношения сигнал/шум ФПА-детекторов на основе оригинальных топологий и конструкций фотопроводящих сверхрешеточных гетероструктур.

В выводах сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе критического анализа современных методов моделирования фотопроводящих источников и детекторов импульсного ТГц-излучения, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами, сформулированы требования к комплексной физико-математической модели ФПА.

2. Разработана комплексная физико-математическая модель генерации и детектирования ТГц-излучения в ФПА, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами ближнего инфракрасного диапазона, учитывающая параметры лазерного излучения, характеристики фотопроводника и топологию электродов антенны.

3. Изготовлены образцы ФПА на основе различных фотопроводящих материалов и с разной топологией электродов.

4. Разработан лабораторный стенд для экспериментальной апробации образцов ФПА и верификации предложенной физико-математической модели;

5. Выполнены экспериментальные исследования образцов оригинальных ФПА-детекторов на основе сверхрешеточных гетероструктур и ФПА-источников с разной топологией электродов: проведены оценки длительности и измерения временного профиля ТГц-импульсов, получены фурье-спектры ТГц-импульсов, определены рабочие частотные диапазоны рассматриваемых образцов ФПА;

6. Проведен сравнительный анализ расчетных и измеренных спектров плотности мощности ТГц-излучения ФПА-источников. Для ФПА-детекторов выполнено сравнение экспериментальных данных по отношениям сигнал/шум с теоретическими предсказаниями по предложенной в диссертационной работе модели. Подтверждена возможность применения предложенной модели для создания ФПА с заданными характеристиками на этапе проектирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1]. Enhanced THz generation from interdigitated quantum dot based photoconductive antenna operating in a quasi-ballistic regime / A. Gorodetsky, **D.V. Lavrukhin**, D.S. Ponomarev et al // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2023. Vol. 29, № 5, P. 8500505;
- [2]. Boosting THz photoconductive antenna-emitter using optical light confinement behind a high refractive sapphire fiber-lens / D.S. Ponomarev, **D.V. Lavrukhin**, N.V. Zenchenko et al // Opt. Lett. 2022. Vol. 47, № 7, P. 1899;
- [3]. Strain-Induced InGaAs-Based Photoconductive Terahertz Antenna–Detector / **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev, Yu.G. Goncharov et al // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2021. Vol. 11, № 4. P. 417-424;
- [4]. Fabrication and Characterization of an 8×8 Terahertz Photoconductive Antenna Array for Spatially Resolved Time Domain Spectroscopy and Imaging Applications / R. Henri, K. Nallappan, D.S. Ponomarev, H. Guerboukha, **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev, R.A. Khabibullin, M. Skorobogatiy // IEEE Access. 2021, Vol. 9, P. 117691-117702;
- [5]. Фотопроводящий ТГц детектор на основе новых функциональных слоев в многослойных гетероструктурах / А.Э. Ячменев, **Д.В. Лаврухин**, Р.А. Хабибуллин и др. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т.129, №6, С. 741-746;
- [6]. Sub-terahertz FET detector with self-assembled Sn-nanowires / D.S. Ponomarev, **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev et al // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2020, Vol. 53, № 7, P. 075102;
- [7]. Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation / **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev, A.Y. Pavlov et al. // Semiconductor Science and Technology. 2019. Vol. 34, № 3. P. 034005;
- [8]. Lateral terahertz hot-electron bolometer based on an array of Sn nanowires in GaAs / D.S. Ponomarev, **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev et al // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51, №31, P. 135101;
- [9]. Электрические и тепловые свойства фотопроводящих антенн на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x>0.3$) с метаморфным буферным слоем для генерации терагерцового излучения / Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин, А.Э. Ячменев,

А.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, И.А. Глинский, **Д.В. Лаврухин**, О.А. Рубан, П.П. Мальцев // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 9. С. 1267-1272;

[10]. Особенности диагностики метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии в режиме ω -сканирования / И.С. Васильевский, С.С. Пушкарев, М.М. Грехов, А.Н. Виниченко, **Д.В. Лаврухин**, О.С. Коленцова // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 4. С. 567-573.

[11]. Патент № 2755003 Российская федерация, МПК H01L 27/15 H01L33/30. Многослойный материал для фотопроводящих антенн / А.Э. Ячменев, **Д.В. Лаврухин**, И.А. Глинский, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев; Заявитель и патентообладатель ООО «Терагерцовые оптоэлектронные решения», № 2020140591; заявл. 09.12.2020; опубл. 09.09.2021, Бюл. № 25;

[12]. Патент № 2731166 Российская федерация, МПК H01L23/50 B82Y40/00. Способ изготовления фотопроводящих антенн / А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, П.П. Мальцев, **Д.В. Лаврухин**, И.А. Глинский, Д.С. Пономарев; Заявитель и патентообладатель ИСВЧПЭ РАН, № 2018126912; заявл. 19.07.2018; опубл. 31.08.2020, Бюл. №25.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Principles of terahertz science and technology / Y.S. Lee. New York, NY: Springer, 2009. 340 p.
2. Progress in terahertz nondestructive testing: a review / S. Zhong // Front. Mech. Eng. 2019. Vol. 14, № 3. P. 273–281.
3. Imaging with terahertz radiation / W.L. Chan, J. Deibel, D.M. Mittleman // Reports on Progress in Physics. 2007. Vol. 70, № 8. P. 1325–1379.
4. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: A review / K.I. Zaytsev et al. // J. of Optics. 2020. Vol. 22, № 1.
5. Terahertz Quality Inspection for Automotive and Aviation Industries / F. Ellrich et al. // J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2020. Vol. 41, № 4. P. 470–489.
6. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications /

- N. Karpowicz et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86, № 5. P. 1–3.
7. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging / Y.C. Shen et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86, № 24. P. 1–3.
 8. Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review [Invited] / E. Castro-Camus, M. Alfaro // *Photonics Research.* 2016. Vol. 4, № 3. P. 36.
 9. Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs / M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, S. Nakashima // *Appl. Optics.* 1997. Vol. 36, № 30. P. 7853.
 10. Terahertz wave detection performance of photoconductive antennas: Role of antenna structure and gate pulse intensity / R. Yano et al. // *J. of Appl. Phys.* 2005. Vol. 97, № 10.
 11. High-efficiency terahertz sources based on plasmonic contact electrodes / M. Jarrahi // *Proc. of 2015 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium, IMS 2015.* 2015. P. 1–4.
 12. Boosting photoconductive large-area THz emitter via optical light confinement behind a highly refractive sapphire-fiber lens / D.S. Ponomarev et al. // *Opt. Lett.* 2022. Vol. 47, № 7. P. 1899–1902.
 13. Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas / S. Lepeshov et al. // *Laser and Photonics Reviews.* 2017. Vol. 11, № 1. P. 1–20.
 14. Efficient photoconductive terahertz detector with all-dielectric optical metasurface / O. Mitrofanov et al. // *APL Photonics.* 2018. Vol. 3, № 5.
 15. ErAs:In(Al)GaAs photoconductor-based time domain system with 4.5 THz single shot bandwidth and emitted terahertz power of 164 μW / U. Nandi et al. // *Opt. Lett.* 2020. Vol. 45, № 10. P. 2812–2815.
 16. 64 μW pulsed terahertz emission from growth optimized InGaAs/InAlAs heterostructures with separated photoconductive and trapping regions / R.J.B. Dietz et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, № 6. P. 061103.
 17. Iron doped InGaAs: Competitive THz emitters and detectors fabricated from the same photoconductor / B. Globisch et al. // *J. of Appl. Phys.* 2017. Vol. 121, № 5. P. 053102.
 18. Enhanced terahertz emission from strain-induced InGaAs/InAlAs superlattices /

- D.S. Ponomarev et al. // J. of Appl. Phys. 2019. Vol. 125, № 15.
19. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas / P.U. Jepsen, R.H. Jacobsen, S.R. Keiding // J. of the Optical Society of America B. 1996. Vol. 13, № 11. P. 2424.
20. Analytical modeling and optimization of terahertz time-domain spectroscopy experiments using photoswitches as antennas / L. Duvillaret, F. Garet, J.F. Roux, J.L. Coutaz // IEEE J. on Selected Topics in Quantum Electronics. 2001. Vol. 7, № 4. P. 615–623.
21. Antenna theory / A. Balanis. 3 Edition. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons Inc, 2013. 1073 p.
22. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнич. спец. вузов / Д.М. Сазонов. М.: Высшая школа, 1988. 432 p.
23. Analysis of terahertz waveforms measured by photoconductive and electrooptic sampling / S.G. Park, M.R. Melloch, A.M. Weiner // IEEE J. of Quantum Electronics. 1999. Vol. 35, № 5. P. 810–819.
24. Measurement and Analysis of Noise Spectra in Terahertz Wave Detection Utilizing Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductive Antenna / M. Nitta, R. Nakamura, Y. Kadoya // J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2019. Vol. 40, № 11–12. P. 1150–1159.
25. Noise analysis of photoconductive terahertz detectors / N. Wang, M. Jarrahi // J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2013. Vol. 34, № 9. P. 519–528.

Благодарности

Автор диссертации благодарен за активное участие в выполнении работы, консультации и обсуждения заведующему лабораторией широкополосной диэлектрической спектроскопии ИОФ РАН К.И. Зайцеву, сотрудникам отдела субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН Ю.Г. Гончарову и В.Б. Анзину, сотрудникам ИСВЧПЭ РАН А.Э. Ячменеву, А.Ю. Павлову и Р.Р. Галиеву. Автор благодарен за поддержку исследований гранту Министерства науки и высшего образования РФ, проект 075-15-2020-790.