

На правах рукописи

*Тн =*

**Булгакова Владислава Витальевна**

**ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА И  
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НОВЫХ ФОТОПРОВОДЯЩИХ  
СРЕДАХ**

1.3.19. Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

**Научный руководитель:**

*Гарнов Сергей Владимирович – член-корреспондент  
РАН, доктор физ.-мат. наук, директор ИОФ РАН*

**Официальные оппоненты:**

*Курлов Владимир Николаевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией профилированных кристаллов, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук*

*Савельев-Трофимов Андрей Борисович – доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова*

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 10 июня 2024 года в 15:00  
на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 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  
<https://diss.gpi.ru/all>  
Автореферат диссертации разослан

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.03

канд. физ.-мат. наук  
тел.: +7 (499) 503-8780



Осадчий Александр Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Терагерцовое (ТГц) излучение, к которому относятся частоты от 0.1 до 10 ТГц (что соответствует диапазону длин волн от 3 мм до 30 мкм) представляет интерес для фундаментальных и прикладных исследований, поскольку в этом диапазоне лежат вращательные и колебательные моды биологических молекул [1], колебания решетки в твердом теле, внутризонные переходы в полупроводниках и энергетические щели в сверхпроводниках [2]. Помимо этого терагерцовое излучение способно проникать через мелкодисперсные безводные среды; также оно является неионизирующим, вследствие чего данное излучение считается безопасным для биологических существ [1]. Благодаря вышеперечисленному ТГц излучение имеет обширную область практических применений, таких, как: обнаружение взрывчатых или наркотических веществ, проверка фармацевтической продукции [3]; биологическое зондирование, а также диагностика заболеваний [4]; изучение атмосферы Земли и астрофизических объектов [5], [6]; проводная и беспроводная связь нового поколения (6G) [7].

На данный момент существуют различные источники ТГц излучения: вакуумно-электронные, твердотельные электронные, источники с оптической накачкой [8]. К вакуумно-электронным источникам относят: генераторы обратной волны [9], клистроны [10], гиротроны [11], лазеры на свободных электронах [12], синхротроны [13], лампы бегущей волны [14]. К твердотельным электронным источникам относятся: диод Ганна [15] и высокочастотные транзисторы [16], источники терагерцового и суб-терагерцового излучения в сверхпроводниках [17], [18]. Можно также выделить фотонно-кристаллические лазеры с электрической накачкой [19] и квантово-каскадный лазер [20]. К источникам ТГц излучения с оптической накачкой относятся источники на основе оптического выпрямления, оптического смешения, эффекта Дембера и генерации излучения в плазме оптического пробоя и в жидкостях.

Сравнивая существующие источники ТГц излучения, можно заключить, что есть необходимость в создании компактного неохлаждаемого источника высокой мощности излучения с широким спектром [21-25]. На место такого источника может претендовать фотопроводящая антенна.

Принцип генерации терагерцового излучения с использованием фотопроводящих антенн основан на ускорении носителей заряда в поле, приложенном к полупроводнику, при облучении его сверхкороткими лазерными импульсами. В качестве источников лазерного излучения обычно используются фемтосекундные лазеры с длительностью импульсов, не превышающей 1 пс [26].

Генерация импульсов терагерцового излучения в фотопроводящих средах является одним из основных способов получения широкополосного терагерцового излучения. Использование высоких напряженностей прикладываемых полей (десятки кВ/см) позволяет получать терагерцовые импульсы микроджоульного уровня энергии с использованием относительно компактных фемтосекундных лазерных систем. В настоящее время основной средой для создания генераторов терагерцового излучения на основе фотопроводящих антенн является арсенид галлия (GaAs). Однако, также активно исследуются другие полупроводниковые среды, использование которых позволит создавать носители заряда лазерным излучением на основной или второй гармонике существующих фемтосекундных систем, а также прикладывать большее внешнее электрическое поле смещения, тем самым увеличивая мощность терагерцового излучения.

Первые исследования фотоэлектрического отклика полупроводников на лазерный импульс были проведены в середине 1970-х [27, 28] и начале 1980-х годов [29-31]. Однако в настоящее время продолжают вестись работы по усовершенствованию фотопроводящих источников ТГц излучения путем поиска альтернативных материалов для подложек антенн и путем изменения геометрии электродов.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью представленной работы является поиск новых материалов для подложек фотопроводящих антенн и экспериментальное исследование процессов генерации импульсного электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне и сверхширокополосного СВЧ – излучения за счет формирования токовых импульсов под действием импульсов лазерного излучения и внешнего электрического поля.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Генерация электромагнитного излучения терагерцового диапазона в широкоапертурных фотопроводящих антеннах при формировании носителей заряда в полупроводниках за счет приповерхностного и объемного поглощения лазерного излучения
2. Разработка и создание генератора сверхширокополосных электромагнитных импульсов

### **Научная новизна**

1. Осуществлена и исследована генерация терагерцовых импульсов широкоапертурными фотопроводящими антеннами на основе  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP) с остаточными компонентами синтеза ( $\text{ZnP}_2$ ,  $\text{Zn}_3\text{P}_2$ , GeP, Ge) при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами на длинах волн 400 нм и 800 нм.

2. Осуществлена и исследована генерация импульсов терагерцового излучения с использованием фотопроводящих антенн на основе гибридных перовскитов ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ) и  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  ( $\text{MAPbBr}_3$ )) при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами на длинах волн 400 нм и 800 нм.

3. Получена генерация терагерцового излучения с помощью фотопроводящих антенн на основе легированных азотом НРНТ и CVD алмазов при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами на длине волны 400 нм.

4. Разработана и создана полеобразующая система на основе рупорной антенны с фотопроводящим ключом, переключаемым фемтосекундными лазерными импульсами. Продемонстрирована генерация электромагнитных импульсов в полеобразующей системе с использованием различных полупроводниковых фотопроводящих ключей: арсенида галлия, кремния и НРНТ алмаза.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Проведенные исследования по генерации терагерцового излучения в фотопроводящих антеннах представляют большой интерес для создания новых

источников широкополосного терагерцового излучения с возможностью потенциального применения в спектроскопии, биомедицине, системах безопасности и задачах неразрушающего контроля веществ.

Разработанный и созданный источник сверхширокополосных электромагнитных импульсов также может найти свое применение для решении широкого класса фундаментальных и прикладных задач, таких как визуализация объектов, защищенная радиосвязь, геолокация, зондирование поверхности Земли, атмосферы и ионосферы, функциональное воздействие на электронику и сверхширокополосная радиолокация.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В широкоапертурных фотопроводящих антеннах на основе  $ZnGeP_2$  (ZGP) при воздействии на них фемтосекундного лазерного излучения происходит генерация импульсов терагерцового излучения, для которых величина плотности энергии насыщения составляет:  $F_{\text{нас}} = 0,27 \text{ мДж} / \text{см}^2$ .

2. В широкоапертурных фотопроводящих антеннах на основе гибридных перовскитов  $CH_3NH_3PbI_3$  ( $MAPbI_3$ ) и  $CH_3NH_3PbBr_3$  ( $MAPbBr_3$ ) при воздействии на них фемтосекундного лазерного излучения происходит генерация импульсов терагерцового излучения, для которых величина плотности энергии насыщения составляет:  $F_{\text{нас}} = 0,194 \text{ мДж} / \text{см}^2$  для  $MAPbBr_3$  и  $F_{\text{нас}} = 0,293 \text{ мДж} / \text{см}^2$  для  $MAPbI_3$ .

3. В фотопроводящих антеннах на основе алмазов величина плотности энергии насыщения зависит от уровня легирования материалов (концентрации примесей) и в случае азотных примесных центров варьируется в широких пределах: от  $F_{\text{нас}} = 12 \text{ мДж/см}^2$ , до  $F_{\text{нас}} = 0,04 \text{ мДж/см}^2$  при возбуждении фемтосекундными импульсами второй гармоники титан-сапфирового лазера ( $\lambda = 400 \text{ нм}$ ).

4. С помощью полеобразующей системы в форме рупора, используя фемтосекундное лазерное излучение в качестве коммутатора для фотопроводящего ключа, можно генерировать электромагнитные импульсы наносекундной

длительности с формой близкой к прямоугольной и с фронтом нарастания короче 30 пс.

**Личный вклад соискателя** в диссертационную работу заключается в активном участии в постановке задач, определении способов их решения, проведении экспериментов, анализе, обработке и интерпретации полученных данных, написании текстов статей. Все результаты, представленные в работе получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных данных обеспечивается высоким уровнем использованного экспериментального оборудования; применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных; сравнением полученных результатов с имеющимися литературными данными; воспроизводимостью результатов; публикацией материалов исследования в высокорейтинговых научных журналах и докладами на всероссийских и международных конференциях.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на Всероссийских и международных конференциях: “Невская фотоника-2023” , Санкт-Петербург, 9-13 октября 2023; VII International Conference on Ultrafast Optical Science, Москва, 2-4 октября 2023; Advanced Laser Technologies (ALT’23), Самара, 18-21 сентября 2023; XIII Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Саров, Россия, 27-29 сентября 2022 года; International Conference at the Institute for Physical Research Laser Physics 2022, Ashtarak, Armenia, September 14-16, 2022; IEEE 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) , Munich, Germany, 21-25 June 2021. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект 075-15-2020-790.

## **Публикации по теме диссертации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и в 6 тезисах конференций. В том числе запатентованы две полезные модели с регистрационными номерами в ЕГИСУ НИОКТР 221563 (дата регистрации 13.11.2023 г.) и 221535 (дата регистрации 10.11.2023 г.), соответственно.

## **Объем и структура диссертации**

Работа изложена на 105 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, включающего 148 источников. Диссертационная работа иллюстрирована 29 рисунками.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель исследования, указываются научная новизна и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер. В ней приведены сведения о методах генерации терагерцового излучения.

В п. 1.1 содержится описание генерации излучения на основе оптического выпрямления.

В п. 1.2 содержится описание генерации излучения на основе встроенного поля в полупроводниках и эффекте Дембера.

В п. 1.3 содержится описание генерации излучения в плазме оптического пробоя и в жидкостях.

В п. 1.4 содержится описание генерации излучения фотопроводящими антеннами.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию генерации электромагнитного излучения в широкоапертурных фотопроводящих антеннах на основе новых полупроводниковых материалов.

В п. 2.1 обоснованы перспективы использования дифосфида цинка-германия ( $ZnGeP_2$  (ZGP)) в качестве подложки широкоапертурной фотопроводящей антенны.

В п. 2.1.1 отписываются характеристики кристалла дифосфида цинка-германия.

В п. 2.1.2 описана экспериментальная установка по генерации и детектированию импульсов терагерцового излучения (Рисунок 1).

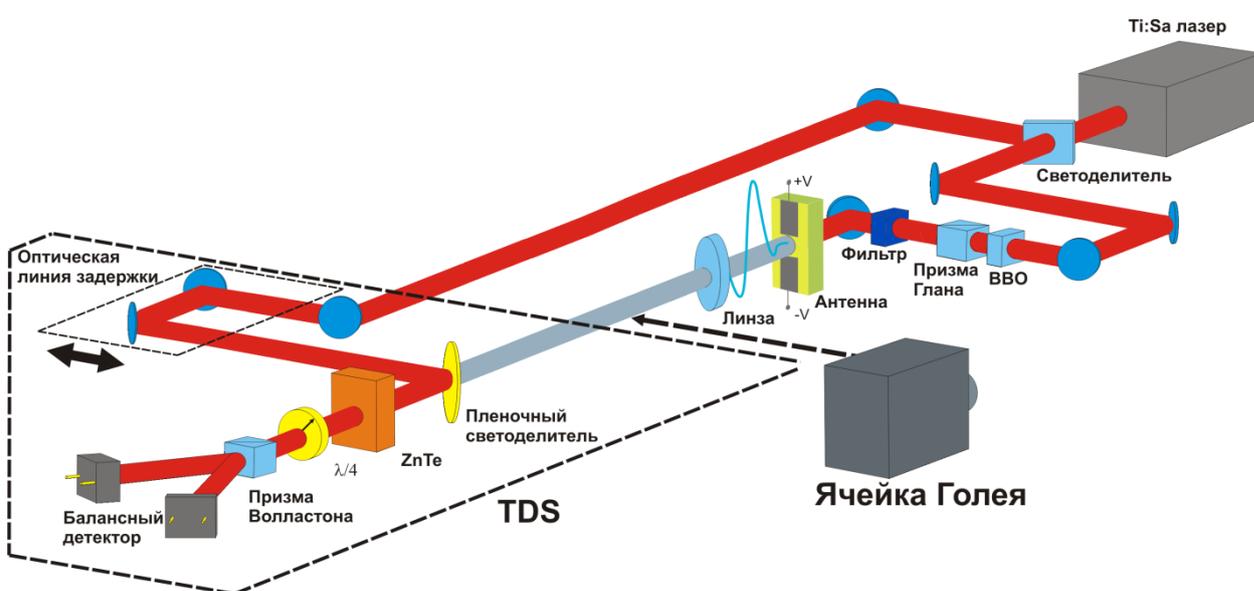


Рисунок1 – Экспериментальная установка по генерации и детектированию терагерцовых импульсов с использованием фотопроводящей антенны.

В п. 2.1.3 содержатся результаты измерений временной зависимости напряженности электрического поля терагерцовых импульсов, генерирующихся фотопроводящей антенной на основе кристалла ZGP. Представлен спектр ТГц импульса, полученный путем Фурье преобразования временной зависимости напряженности поля. Представлены зависимости энергии ТГц импульсов от оптической энергии. Описана методика обработки энергетических зависимостей для определения величины оптической плотности энергии насыщения ( $F_{\text{нас}}$ ). Проведено сравнение полученной величины  $F_{\text{нас}}$  с литературными данными;

рассчитана подвижность носителей заряда ( $\mu$ ); проведены оценки потерь ТГц излучения.

В п. 2.1.4 представлены экспериментально полученные зависимости энергии ТГц импульсов от оптической энергии при формировании носителей заряда в полупроводнике за счет поверхностного (400 нм) и объемного (800 нм) поглощения лазерного излучения.

В п. 2.1.5 представлены экспериментально полученные зависимости энергии ТГц импульсов от оптической энергии для кристаллов ZGP с остаточными компонентами синтеза, которые могут остаться в ходе роста кристалла. Определены величины оптической плотности энергии насыщения и подвижности носителей заряда для каждого кристалла.

В п. 2.2 обоснованы перспективы использования органо – неорганических галогенидных перовскитов в качестве подложки широкоапертурной фотопроводящей антенны.

В п. 2.2.1 описан синтез перовскитов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  ( $\text{MAPbBr}_3$ ) и  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ).

В п. 2.2.2 приведены измеренные спектры оптического поглощения и спектры фотолюминесценции.

В п. 2.2.3 содержатся результаты измерений временной зависимости напряженности электрического поля терагерцовых импульсов, генерирующихся фотопроводящей антенной на основе перовскитов  $\text{MAPbBr}_3$  и  $\text{MAPbI}_3$ . Представлен спектр ТГц импульса, полученный путем Фурье преобразования временной зависимости напряженности поля (Рисунок 2). Представлены зависимости энергии ТГц импульсов от оптической энергии и прикладываемого электрического поля смещения. Рассчитаны подвижности носителей заряда для перовскитов  $\text{MAPbBr}_3$  и  $\text{MAPbI}_3$ .

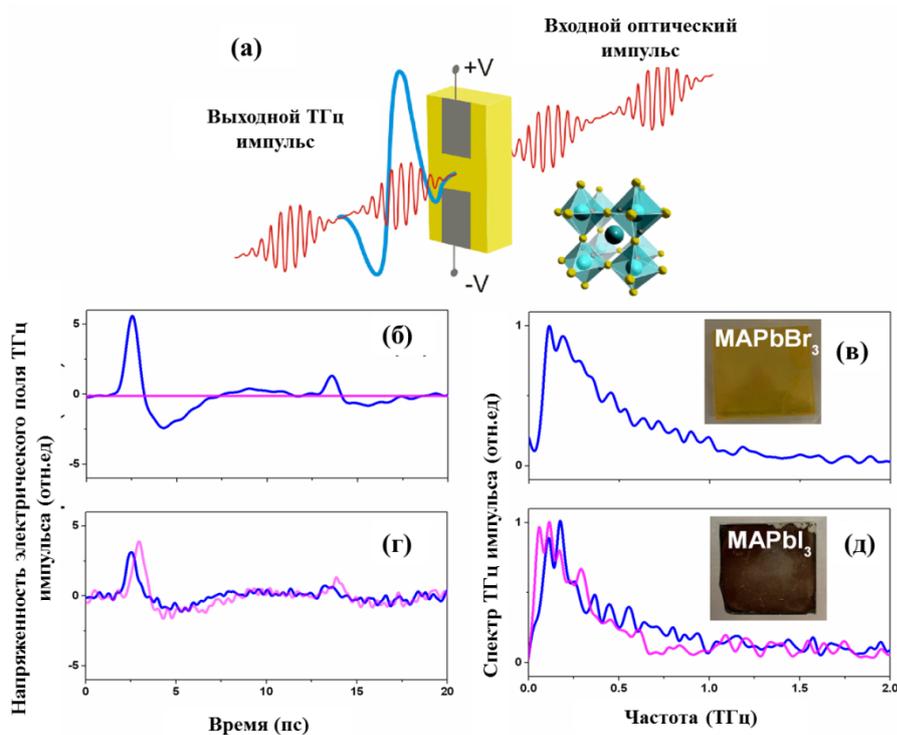


Рисунок 2 – (а) Схема ТГц излучения от фотопроводящей антенны на основе перовскитов. Временные формы сигналов напряженности электрического поля терагерцевого импульса от  $\text{MAPbI}_3$  (б) и  $\text{MAPbBr}_3$  (г) соответствующие им спектры (в, д), полученные при возбуждении на длинах волн 400 нм (синий цвет) и 800 нм (пурпурный).

В п. 2.3 обоснованы перспективы использования алмаза в качестве подложки широкоапертурной фотопроводящей антенны.

В п. 2.3.1 представлены спектры удельного оптического поглощения в УФ – видимом и ИК – диапазонах для исследуемых CVD и HPHT алмазов с азотистыми примесями. Также представлены зависимости поглощения алмазных подложек от концентрации азота.

В п. 2.3.2 описана экспериментальная установка по генерации и детектированию импульсов терагерцевого излучения электрооптическим методом.

В п. 2.3.3 описаны экспериментальные установки по генерации импульсов терагерцевого излучения при создании носителей заряда в алмазных подложках

второй и третьей гармониками фемтосекундной титан-сапфировой лазерной системы Coherent Elite Pro (центральная длина волны 800 нм, энергия импульса 3 мДж, длительность импульса 150 фс, диаметр луча 12 мм по уровню  $1/e^2$ , частота повторения 1 кГц). Зависимости энергии терагерцового излучения от оптической плотности энергии были получены, при измерении мощность терагерцового излучения ячейкой Голея (Tydex GC-1P).

В п. 2.3.4 описано моделирование процесса генерации терагерцового излучения в фотопроводящей антенне на основе алмаза с азотными примесями (моделирование производилось в программной среде COMSOL Multiphysics).

В п. 2.3.5 содержатся результаты измерений временных зависимостей напряженности электрического поля терагерцовых импульсов, генерирующихся фотопроводящей антенной на основе CVD и HPHT алмазов. Представлены спектры ТГц импульсов, полученные путем Фурье преобразования временной зависимости напряженности поля. Проведено сравнение спектров терагерцового излучения антенн на основе алмазов, выращенных различными методами (CVD и HPHT). Представлены зависимости энергии ТГц импульсов от оптической энергии.. Проведено сравнение полученной величины  $F_{\text{нас}}$  с литературными данными; рассчитана подвижность носителей заряда ( $\mu$ ) для алмазов с минимальной и максимальной концентрацией азота. Построены зависимости оптической плотности энергии насыщения от концентрации азота для двух длин волн накачки (400 нм и 267 нм). Обозначены возможные причины отклонения величины оптической плотности энергии насыщения от теоретической модели.

**Третья глава** посвящена генерации прямоугольных наносекундных электромагнитных импульсов с пикосекундными фронтами нарастания. В начале главы обосновывается актуальность таких устройств для таких областей, как: защищенная радиосвязь, зондирование поверхности Земли и ионосферы, метрология и т.д.

В п. 3.1 приводится описание модели генератора импульсов (полеобразующая система), принципа генерации и схемы эксперимента по детектированию сверхширокополосных электромагнитных импульсов. Описана

экспериментальная схема по определению времен жизни фотоиндуцированных носителей заряда. Измерены времена жизни фотоиндуцированных носителей заряда в арсениде галлия и НРНТ алмазе, с азотными примесями, которые использовались в качестве фотопроводящего ключа в полеобразующей системе в форме рупора. Измерены зависимости напряженности магнитного поля от времени для внутри полеобразующей системы с разными фотопроводящими ключами (кремний, арсенид галлия, НРНТ алмаз). Было проведено исследование изменения формы генерируемого электромагнитного импульса по мере его распространения вдоль линии формирования поля и при его выходе в свободное пространство (Рисунок 3).

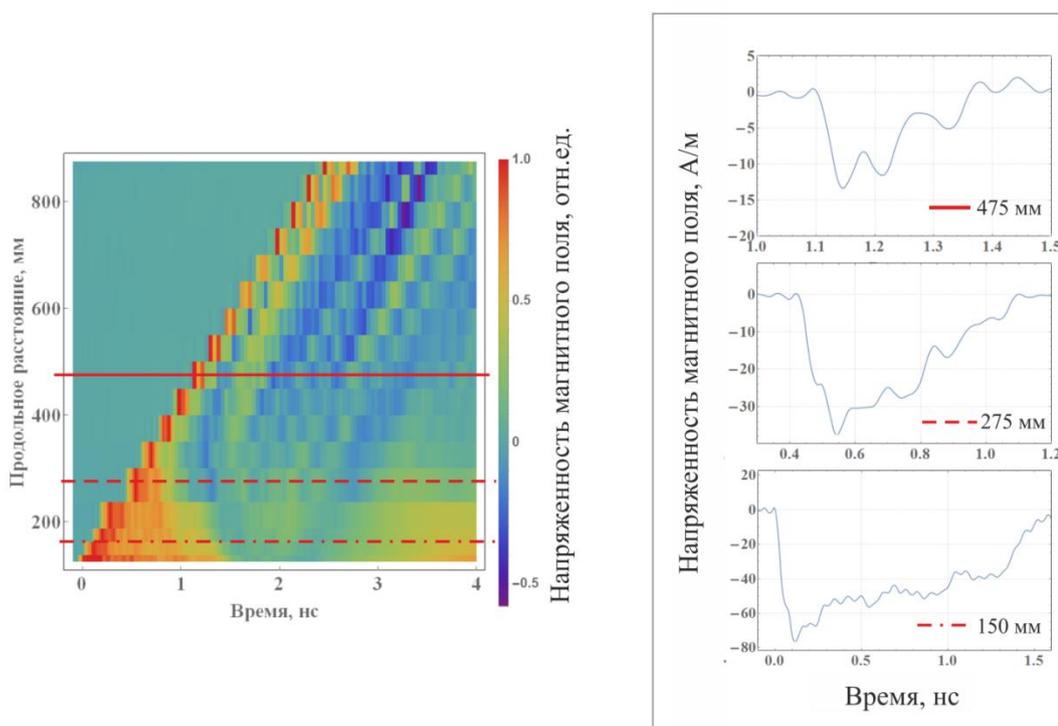


Рисунок 3 – Нормированная трехмерная зависимость временного распределения напряженности магнитного поля от положения измерителя магнитного поля. За начало отсчета принято расположение фотопроводящего ключа (арсенида галлия). На вставке приведены временные зависимости напряженности магнитного поля, измеренные на расстоянии: 150 мм, 275 мм и 475 мм

В **заключении** представлены основные выводы к работе.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

В ходе работы была исследована генерация импульсов терагерцового излучения в фотопроводящих антеннах на основе ZGP, при их облучении фемтосекундными лазерными импульсами на длинах волны 800 и 400 нм. Была получена временная зависимость напряженности ТГц импульса, зависимость энергии терагерцового импульса от оптической энергии и рассчитана подвижность фотоиндуцированных носителей заряда для кристаллов ZGP с остаточными компонентами синтеза. Было установлено, что величина оптической плотности энергии насыщения ТГц-импульса для антенн на основе ZGP ( $F_{\text{нас}} = 0,27 \text{ мДж/см}^2$ ) была сопоставима с величиной  $F_{\text{нас}}$  для антенны на основе ZnSe ( $F_{\text{нас}} = 0,13 \text{ мДж/см}^2$ ). Однако, величина объемного сопротивления ZGP выше, чем у ZnSe, что позволяет прикладывать большее напряжение смещения. Таким образом, преимущество использования широкоапертурных антенн на основе ZGP заключается в том, что антенна на основе ZGP может возбуждаться фемтосекундным лазером на основе Yb и может применяться большее (по сравнению с ZnSe) поле смещения, что позволит создать мощные и компактные источники терагерцового излучения.

Продемонстрирована применимость пленок поликристаллических гибридных органо-неорганических перовскитов в качестве подложек широкоапертурных фотопроводящих антенн. Результаты, полученные в данной работе, делают гибридные перовскиты конкурентоспособными материалами для фотопроводящих антенн в сравнении с обычными полупроводниками. Были получены значения оптической плотности энергии насыщения для  $\text{MAPbBr}_3$  и  $\text{MAPbI}_3$  полупроводниковых подложек фотопроводящей антенны, которые составили:  $F_{\text{нас}} = 0,194 \text{ мДж/см}^2$  для  $\text{MAPbBr}_3$  и  $F_{\text{нас}} = 0,293 \text{ мДж/см}^2$  для  $\text{MAPbI}_3$ . Были рассчитаны значения подвижности фотоиндуцированных носителей заряда:  $\mu \approx 58 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для  $\text{MAPbI}_3$  и  $\mu \approx 88 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для  $\text{MAPbBr}_3$ . Разработанный метод определения подвижности носителей заряда может быть в дальнейшем применен для изучения различных 3D и 2D материалов.

Также была продемонстрирована генерация ТГц импульсов с помощью фотопроводящих антенн на основе алмазов, легированных азотом, при создании носителей заряда второй гармоникой титан-сапфирового лазера. Было продемонстрировано, что уровень легирования определяет оптическое поглощение накачки второй гармоникой в алмазных HPHT- и CVD-подложках. Выявлена корреляция между уровнем легирования и величиной оптической плотности энергии насыщения в алмазных фотопроводящих антеннах. В зависимости от уровня азота оптическая плотность энергии насыщения алмазных фотопроводящих антенн варьировалась от очень высокого ( $\sim 12$  мДж/см<sup>2</sup>) до рекордно низкого ( $\sim 0,04$  мДж/см<sup>2</sup>). Проведенные эксперименты и оценки подтверждают эффективность использования легированного алмаза в качестве материала подложек широкоапертурных фотопроводящих антенн, при условии приложения высоких полей смещения.

Была разработана и создана полеобразующая система на основе рупорной антенны с фотопроводящим ключом для генерации электромагнитных импульсов наносекундной длительности с пикосекундными фронтами нарастания. Продемонстрирована генерация электромагнитных импульсов в указанной полеобразующей системе с использованием различных полупроводниковых фотопроводящих ключей: арсенида галлия, кремния и HPHT-алмаза. Исследовано изменение формы генерируемых СШП ЭМИ по мере их распространения внутри полеобразующей системы и в свободном пространстве. Установлено, что длительность генерируемых электромагнитных импульсов определяется длиной полеобразующей системы и временем жизни фотоиндуцированных носителей заряда в полупроводнике, а их фронт оказывается существенно меньше 30 пс, и зависит главным образом от длительности возбуждающих фотопроводник пикосекундных лазерных импульсов. Созданная полеобразующая система в дальнейшем может быть использована для исследования процессов, происходящих при прохождении сверхширокополосных электромагнитных импульсов сквозь атмосферу.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кулипанов, Г. Н. Генерация и использование терагерцового излучения: история и перспективы / Г. Н. Кулипанов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2010. – Т. 5, № 4. – С. 24-27.
2. Lee, Y. S. Principles of terahertz science and technology / Y. S. Lee. – Springer Science & Business Media, 2009. – 170 т.
3. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs / A. G. Davies, A. D. Burnett, W. Fan [et al.] // Materials today. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 18-26.
4. Terahertz imaging using quantum cascade lasers—a review of systems and applications / P. Dean, A. Valavanis, J. Keeley [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Т. 47, № 37. – С. 374008.
5. Tittel, F. K. Mid-infrared laser applications in spectroscopy / F. K. Tittel, D. Richter, A. Fried. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2003. – 458-529 с.
6. THz QCL-based cryogen-free spectrometer for in situ trace gas sensing / L. Consolino, S. Bartalini, H. E. Beere [et al.] // Sensors. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 3331-3340.
7. Add drop multiplexers for terahertz communications using two-wire waveguide-based plasmonic circuits / Cao Y., K. Nallappan, G. Xu, M. Skorobogatiy // Nature Communications. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 4090.
8. Lewis, R. A. A review of terahertz sources / R. A. Lewis // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Т. 47, № 37. – С. 374001.
9. Mineo, M. Corrugated rectangular waveguide tunable backward wave oscillator for terahertz applications / M. Mineo, C. Paoloni // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2010. – Т. 57, № 6. – С. 1481-1484.
10. Permanent magnet sources for extended interaction klystrons / H. A. Leupold, L. Kosa, G. McLane [et al.] // Journal of applied physics. – 1991. – Т. 70, № 10. – С. 6624-6626.
11. Bratman, V. L. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range / V. L. Bratman, Y. K. Kalynov, V. N. Manuilov // Physical review letters. – 2009. – Т. 102, № 24. – С. 245101.

12. Knyazev, B. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – T. 21, № 5. – C. 054017.
13. Observation of broadband self-amplified spontaneous coherent terahertz synchrotron radiation in a storage ring / J. M. Byrd, W. P. Leemans, A. Loftsdottir [et al.] // *Physical review letters*. – 2002. – T. 89, № 22. – C. 224801.
14. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation / S. Bhattacharjee, J.H. Booske, C.L. Kory [et al.] // *IEEE transactions on plasma science*. – 2004. – T. 32, № 3. – C. 1002-1014.
15. Improved negative differential mobility model of GaN and AlGaN for a terahertz Gunn diode / L.A. Yang, Y. Hao, Q. Yao, J. Zhang // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2011. – T. 58, № 4. – C. 1076-1083.
16. Terahertz emission by plasma waves in 60 nm gate high electron mobility transistors / W. Knap, J. Lusakowski, T. Parenty [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2004. – T. 84, № 13. – C. 2331-2333.
17. A 540-640-GHz high-efficiency four-anode frequency tripler / A. Maestrini, J.S. Ward, J.J. Gill [et al.] // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2005. – T. 53, № 9. – C. 2835-2843.
18. Emission of coherent THz radiation from superconductors / L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter [et al.] // *Science*. – 2007. – T. 318, № 5854. – C. 1291-1293.
19. Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions / Y. Chassagneux, R. Colombelli, W. Maineult [et al.] // *Nature*. – 2009. – T. 457, № 7226. – C. 174-178.
20. Williams, B. S. Terahertz quantum-cascade lasers / B. S. Williams // *Nature photonics*. – 2007. – T. 1, № 9. – C. 517-525.
21. Stimulated emission from donor transitions in silicon / S. G. Pavlov, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova [et al.] // *Physical review letters*. – 2000. – T. 84, № 22. – C. 5220.
22. Matsuura, S. Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole photoconductive antennas / S. Matsuura, M. Tani, K. Sakai // *Applied Physics Letters*. – 1997. – T. 70, № 5. – C. 559-561.

23. Hu, B. B. Terahertz radiation induced by subband-gap femtosecond optical excitation of GaAs / B. B. Hu, X. C. Zhang, D. H. Auston //Physical review letters. – 1991. – T. 67, № 19. – C. 2709.
24. Few-cycle THz emission from cold plasma oscillations / R. Kersting, K. Unterrainer, G. Strasser [et al.] // Physical Review Letters. – 1997. – T. 79, № 16. – C. 3038.
25. Bründermann, E. High duty cycle and continuous terahertz emission from germanium / E. Bründermann, D. R. Chamberlin, E. E. Haller //Applied Physics Letters. – 2000. – T. 76, № 21. – C. 2991-2993.
26. Burford, N. M. Review of terahertz photoconductive antenna technology/ N. M. Burford, M. O. El-Shenawee //Optical Engineering. – 2017. – T. 56, № 1. – C. 010901-010901.
27. Jayaraman, S. Observation of Two-Photon Conductivity in GaAs with Nanosecond and Picosecond Light Pulses / S. Jayaraman, C. H. Lee //Applied Physics Letters. – 1972. – T. 20, № 10. – C. 392-395.
28. Lee, C. H. Measurement of ultrashort optical pulses by two-photon photoconductivity techniques / C. H. Lee, S. Jayaraman //Opto-electronics. – 1974. – T. 6. – C. 115-120.
29. Auston, D. H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon / D. H. Auston //Applied Physics Letters. – 1975. – T. 26, № 3. – C. 101-103.
30. Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser-driven semiconductor switch / G. Mourou, C. V. Stancampiano, A. Antonetti, A. Orszag //Applied Physics Letters. – 1981. – T. 39, № 4. – C. 295-296.
31. Fattinger, C. Point source terahertz optics / C. Fattinger, D. Grischkowsky //Applied Physics Letters. – 1988. – T. 53, № 16. – C. 1480-1482.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ ВАК

1. Optical Pump–Terahertz Probe Diagnostics of the Carrier Dynamics in Diamonds / **V. Bulgakova**, P. Chizhov, A. Ushakov, P. Ratnikov, Y. Goncharov, A. Martyanov, V. Kononenko, S. Savin, I. Golovnin, V. Konov, S. Garnov // *Materials*. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 119. – DOI: 10.3390/ma17010119
2. Generation of Rectangular Nanosecond Electromagnetic Pulses with a Picosecond Rise Front / S.V. Garnov, **V.V. Bulgakova**, T.V. Dolmatov, A.A. Ushakov, V.V. Bukin // *Doklady Physics*. – 2023. – Т. 68. – С. 366-369. – DOI: 10.1134/S1028335823110083
3. Generation of Terahertz Radiation in Boron-Doped Diamond / V.V. Kononenko, E.V. Zavedeev, M.A. Dezhkina, **V.V. Bulgakova**, M.S. Komlenok, T.V. Kononenko, V.V. Bukin, V.I. Konov, S.V. Garnov, A.A. Khomich // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2023. – Т. 50, № 5. – С. S606-S612. – DOI: 10.3103/S1068335623170062
4. Efficiency of photoconductive terahertz generation in nitrogen-doped diamonds / V.V. Kononenko, M.S. Komlenok, P.A. Chizhov, V.V. Bukin, **V.V. Bulgakova**, A.A. Khomich, A.P. Bolshakov, V.I. Konov, S.V. Garnov // *Photonics*. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 18. – DOI: 10.3390/photonics9010018
5. Photoconductive terahertz generation in nitrogen-doped single-crystal diamond / P.A. Chizhov, M.S. Komlenok, V.V. Kononenko, V.V. Bukin, A.A. Ushakov, **V.V. Bulgakova**, A.A. Khomich, A.P. Bolshakov, V.I. Konov, S.V. Garnov // *Optics Letters*. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 86-89. – DOI: 10.1364/OL.446750
6. Hybrid perovskite terahertz photoconductive antenna / P. A. Obraztsov, **V.V. Bulgakova**, P.A. Chizhov, A.A. Ushakov, D.S. Gets, S.V. Makarov, V.V. Bukin // *Nanomaterials*. – 2021. – Т. 11, № 2. – С. 313. – DOI: 10.3390/nano11020313
7. Terahertz generation by means of ZnGeP<sub>2</sub> large aperture photoconductive antenna / **V. Bulgakova**, A. A. Ushakov, P. A. Chizhov, N. A. Yudin, M. Zinovev, S. N. Podzyvalov, T. Dolmatov, V. V. Bukin, S. V. Garnov // *Optical Engineering*. – 2021. – Т. 60, № 8. – С. 082015-082015. – DOI: 10.1117/1.OE.60.8.082015