

На правах рукописи



Новоковская Алина Львовна

**Трансформация электромагнитных волн на фронтах
плазмообразования в широких атмосферных ливнях
и при оптической ионизации сред**

Специальность 1.3.4. Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена на кафедре общей физики радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бакунов Михаил Иванович

Официальные оппоненты: **Тюхтин Андрей Викторович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиофизики, Санкт-Петербургский государственный университет

Грач Вероника Савельевна,
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, Институт прикладной физики
РАН, Нижний Новгород

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится 20 мая 2026 г. в 16.30 на заседании диссертационного совета 24.2.340.03 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1602>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.340.03
доктор физ.-мат. наук, доцент

Клюев Алексей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы

Релятивистски движущиеся области плазмообразования, создаваемые в веществе различными ионизирующими факторами (потоками частиц, ударными волнами, лазерными импульсами), являются практическим примером реализации релятивистского зеркала (зеркала Эйнштейна [1]), способного обеспечивать доплеровское преобразование электромагнитных волн. Исследование трансформации электромагнитных волн на релятивистских фронтах ионизации активно ведется уже в течение длительного времени (см. пионерскую работу [2]) применительно к задачам устойчивости радиосвязи, диагностики нестационарных плазменных образований и частотного преобразования волн.

Одним из важных примеров реализации релятивистского фронта ионизации в естественных условиях являются широкие атмосферные ливни (ШАЛ) – каскады вторичных частиц (в основном электронов), рождаемых в атмосфере Земли первичными космическими частицами (протонами, альфа-частицами и более тяжелыми ядрами) сверхвысоких ($\geq 10^{18}$ эВ) энергий. Ионизационный след ШАЛ, возникающий на высотах ~ 10 км, представляет собой релятивистски движущийся к земле диск из непрерывно возникающей и быстро распадающейся плазмы. Толщина диска определяется временем жизни электронов плазмы за фронтом ионизации, которое уменьшается от ~ 40 нс на высоте 5 км до ~ 15 нс на уровне моря [3]. При этом толщина диска составляет около метра, что существенно меньше его диаметра (несколько сотен метров).

Актуальной задачей является регистрация характеристик ШАЛ, на основании которых могут быть сделаны заключения о составе и энергетическом спектре первичных космических частиц. Наряду с уже применяемыми для этой цели методами (регистрацией частиц ливня в наземных детекторах большой площади, наблюдением оптической флуоресценции возбужденного атмосферного азота с помощью специальных телескопов, приемом геосинхротронного радиоизлучения от вторичных частиц [4]) изучается возможность реализации высказанной Блэкеттом и Ловеллом еще в 1941 году идеи о радарном детектировании ШАЛ на основе приема рассеянных ионизационным следом ливня сигналов наземных радиопередатчиков [5]. Первые экспериментальные попытки такого детектирования с помощью специально построенного радиотелескопа не увенчались успехом [6], и интерес к идее угас на десятилетия. После отдельных спорадических публикаций [7-9] новая волна исследований была инициирована теоретической работой Горхэма [10], в которой был сделан вывод о возможности детектирования ШАЛ радарными VHF диапазона (30-100 МГц). Попытки экспериментального наблюдения эхо-сигналов от ШАЛ были предприняты несколькими исследовательскими группами: LAAS [11], Brookhaven National Laboratory [12], Jicamarca Radio Observatory [13, 14], MU radar group [15], коллаборацией MARIACHI [16] и проектом TARA (Telescope Array RADar) [17]. Однако надежного экспериментального подтверждения радарного детектирования ШАЛ так и не было получено. Тем не менее, благодаря ряду потенциальных

преимуществ данного метода интерес к нему сохраняется [18].

В предыдущих работах оценки величины принимаемого на земле сигнала основывались на предположении, что ШАЛ, подобно метеорам, оставляет в атмосфере ионизационный след в виде длинного плазменного цилиндра, на котором зондирующая радиоволна рассеивается как на статическом объекте [10]. Данная модель не учитывает доплеровского частотного сдвига рассеянной волны и ее релятивистской абберации, а также влияния на амплитуду волны процессов рождения электронов и их рекомбинации.

В диссертации возможности радарного детектирования ШАЛ рассмотрены на основе современных представлений о ШАЛ как релятивистски движущихся дисках быстрого плазмообразования и распада плазмы. Строго электродинамически решена задача об отражении электромагнитной волны от релятивистского фронта ионизации, образующего быстро рекомбинирующую столкновительную плазму. В общетеоретическом плане новым здесь является численное исследование влияния времени жизни плазмы на величину коэффициента отражения волны и определение условий возможности пренебрежения процессами рекомбинации при расчете отражения. Также впервые исследованы особенности отражения в режиме высокой частоты соударений электронов и ультрарелятивистского движения фронта. В плане практического применения к детектированию ШАЛ получены значения коэффициента отражения волны и ее частотного сдвига для характерных параметров ШАЛ, даны оценки приходящей на землю мощности отраженного от ШАЛ радиоизлучения. Показана принципиальная возможность детектирования ШАЛ с использованием передатчиков средневолнового диапазона.

Применительно к задачам повышения частоты и компрессии импульсов микроволнового излучения привлекательным является использование трансформации электромагнитных волн на фронтах ионизации, создаваемых в веществе ультракороткими лазерными импульсами [19]. В этом случае вещество не разгоняется до релятивистской скорости, движется только нематериальный объект – граница создаваемой плазмы, что выгодно отличает данный способ от использования в качестве зеркала релятивистских электронов [20, 21]. В первых экспериментах фронт ионизации создавался пикосекундным импульсом ультрафиолетового излучения в заполненном газом резонаторе, было продемонстрировано повышение частоты микроволн с 34,8 ГГц до 173 ГГц при плотности плазмы за фронтом ионизации $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [22]. Для расширения рабочего диапазона метода в сторону более высоких частот предпочтительно использовать фронты ионизации не в газах, а в полупроводниках, где более плотная (электрон-дырочная) плазма может быть создана лазерными импульсами меньшей интенсивности и большей длины волны за счет одно- и многофотонной ионизации [23-25]. Экспериментально продемонстрировано доплеровское повышение частоты терагерцового излучения на фронте однофотонной ионизации (с плотностью плазмы $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) кремния импульсами фемтосекундного титан-сапфирового усилителя [26].

Теоретическое исследование трансформации электромагнитных волн на фронтах ионизации, как правило, ограничено рассмотрением стационарного

режима, когда падающая на фронт волна является (квази)монохроматической, а фронт – равномерно движущимся (см., например, [2, 22, 27]). В экспериментах, однако, длина пробега фронта ионизации ограничена – либо толщиной слоя ионизируемой среды (газа в трубке, кристалла), либо истощением лазерного импульса накачки. В диссертации впервые исследован нестационарный режим, когда фронт ионизации внезапно останавливается (достигнув границы ионизируемой среды). Показано, что остановка фронта может приводить к таким эффектам, как формирование статического магнитного поля в области перед фронтом и вытекание сдвинутой вверх по частоте скиннующейся волны из плазмы в свободное пространство. Показано также, что последний эффект перспективен для частотного преобразования коротких импульсов.

В настоящее время большой интерес вызывают униполярные электромагнитные импульсы, т.е. импульсы с ненулевой электрической площадью (см., например, обзор [28]). Введенные в рассмотрение Бессоновым еще в 1981 году как «странные волны» (см. [29]), униполярные импульсы стали предметом детального изучения совсем недавно в связи с осознанием целого ряда преимуществ их применения в исследованиях взаимодействия света с веществом. В частности, униполярные терагерцовые импульсы могут быть использованы для сверхбыстрого управления динамикой ридберговских атомов [30], фемтохимии на металлических поверхностях [31], выстраивания молекул [32], нелинейной терагерцовой спектроскопии [33] и ускорения частиц [34].

Наряду с обсуждением фундаментальных вопросов, касающихся условий существования униполярных импульсов [35], в литературе рассматриваются различные методы их генерации. В частности, униполярные импульсы могут генерироваться в виде переходного излучения при прохождении электронных ступок высокой энергии через металлические фольги [36] или в виде излучения от модулированного электронного пучка в сужающемся ондуляторе [37]. В настольных установках полупериодные импульсы пикосекундной длительности наблюдались в ближней зоне фотопроводящих антенн [38] и при ионизации твердотельных мишеней лазерными импульсами [39]. Предложены методы преобразования обычных биполярных импульсов в униполярные за счет неоднородного усиления в неравновесной быстро релаксирующей плазме [40] и пространственной фазовой модуляции терагерцовых импульсов при их оптической генерации в слое резонансной нелинейной среды [41].

Недавно был предсказан и экспериментально подтвержден эффект генерации униполярных квазистатических предвестников ультракоротких лазерных импульсов при их распространении в электрооптических кристаллах в условиях, когда лазерный импульс одновременно испытывает оптическое выпрямление и создает в кристалле фронт многофотонной ионизации [42]. Теоретически предсказано, что при использовании в качестве накачки распространенных фемтосекундных лазерных систем с энергией импульса в несколько миллиджоулей электрическое и магнитное поля в предвестнике могут достигать значений $\sim 0,4$ МВ/см и $\sim 0,1$ Тл [43]. Механизм генерации квазистатических предвестников связан с ускорением фотоэлектронов, рожденных на фронте ионизации

кристалла, электрическим полем выпрямленного лазерного импульса. Возникающий при этом всплеск тока и является источником электромагнитного предвестника. По мере распространения лазерного импульса в кристалле процесс излучения полей из области фронта ионизации непрерывно повторяется, приводя к формированию протяженного предвестника с квазипостоянными значениями электрического и магнитного полей. Фактически данный процесс представляет собой трансформацию выпрямленного электрического поля в электромагнитный предвестник на фронте ионизации.

Для практического использования квазистатических предвестников в качестве униполярных импульсов важное значение имеет исследование динамики разрушения униполярности предвестников по мере их распространения в свободном пространстве вне кристалла-генератора. В работе [44] было выполнено двумерное численное моделирование методом FDTD процесса генерации квазистатического предвестника импульсом фемтосекундного титан-сапфирового лазера (с шириной пучка ~ 4 мм) в кристалле GaP толщиной 3 мм и последующего распространения предвестника в свободном пространстве на расстояние в 2 мм. Было показано, что на таком расстоянии предвестник еще сохраняет свою униполярность. Применение метода FDTD для моделирования распространения предвестников на существенно большие расстояния встречает значительные сложности.

В диссертации разработана дискретная полуаналитическая модель, которая представляет генерацию квазистатического предвестника лазерным импульсом в кристалле как излучение от последовательно включающихся ленточных токов, распределенных вдоль лазерного пучка накачки. Данная модель позволяет рассчитывать поля квазистатического предвестника в свободном пространстве на произвольном расстоянии от кристалла-генератора. С использованием разработанной модели показана сложная динамика изменения формы предвестника с расстоянием: от униполярной к квазиуниполярной и затем к биполярной.

В диссертации также предложен способ получения униполярных импульсов, основанный на отсечке части (полуволны) биполярного (одно- или многопериодного) импульса терагерцового излучения путем создания плазменного зеркала в пластине кристалла GaAs за счет однофотонной ионизации приповерхностного слоя кристалла ультракоротким оптическим импульсом титан-сапфирового лазера (с длиной волны 800 нм). Из-за быстрого истощения лазерного импульса фронт ионизации пробегает в кристалле лишь короткую дистанцию (~ 1 мкм), практически мгновенно создавая плотную плазму, которая отражает следующую за первой полуволной часть терагерцового импульса.

Ранее сверхбыстрая генерация электрон-дырочной плазмы лазерными импульсами в полупроводниках уже применялась для манипуляции терагерцовым излучением в некоторых случаях. Так, прохождение терагерцовых импульсов через ионизируемую пластину Si использовалось для модификации временной формы и спектра импульса [45]. Отражение терагерцового импульса от плазменного зеркала, создаваемого при облучении лазерными импульсами

кристалла Ge, использовалось для формирования резкого фронта в волновой форме терагерцового импульса [46]. Были продемонстрированы быстрые опто-терагерцовые модуляторы на основе кристалла GaAs [47]. Исследовалось рассеяние терагерцового излучения на фотоиндуцированной плазменной решетке на поверхности кристалла GaAs [48]. Пространственно-периодическое фотовозбуждение пластины Ge, помещенной внутрь плоскопараллельного волновода с металлическими стенками, позволило мультиплицировать входной терагерцовый импульс [49] и создавать у него чирп [50]. Было продемонстрировано доплеровское повышение частоты импульсов терагерцового излучения при отражении от фронта фотоионизации в Si [26]. В диссертации же фотоионизация полупроводника впервые использована для получения униполярных импульсов.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование трансформации электромагнитных волн на релятивистски движущихся областях плазмообразования в ранее не исследованных режимах, связанных с быстрым распадом сильнотолкнательной плазмы за фронтом ионизации, присутствием в области плазмообразования стороннего электрического поля и нестационарностью взаимодействия волны с фронтом ионизации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- теоретическое исследование трансформации электромагнитной волны на ультрарелятивистском фронте ионизации, образующем быстро рекомбинирующую сильнотолкнательную плазму;
- расчет характеристик радиоволны, отраженной от области плазмообразования широкого атмосферного ливня в атмосфере Земли, оценка приходящей на землю мощности;
- теоретическое исследование трансформации электромагнитной волны на внезапно останавливающемся фронте ионизации;
- разработка дискретной полуаналитической модели для исследования генерации квазистатического электромагнитного предвестника на фронте фотоионизации в кристалле и последующего распространения предвестника в свободном пространстве вне кристалла;
- разработка и экспериментальная апробация метода получения униполярных электромагнитных импульсов, основанного на отсечке части биполярного импульса терагерцового излучения путем однофотонной ионизации приповерхностного слоя полупроводникового кристалла ультракоротким лазерным импульсом.

Научная новизна работы

1. Впервые исследовано влияние времени жизни плазмы, создаваемой на релятивистском фронте ионизации, на коэффициент отражения электромагнитной волны от фронта и определены условия пренебрежимости процессов распада плазмы при расчете отражения.

2. Впервые исследованы особенности трансформации электромагнитной волны на фронте ионизации в характерном для ШАЛ режиме высокой частоты соударений электронов и ультрарелятивистского движения фронта.

3. Впервые рассчитаны характеристики радиоволны, отраженной от движущейся области образования и распада плазмы ШАЛ, с учетом релятивистских эффектов и нестационарности плазмы.

4. Впервые исследована трансформация электромагнитной волны на внезапно останавливаемом фронте ионизации.

5. Разработана оригинальная полуаналитическая модель, позволяющая рассчитывать волновую форму электромагнитных квазистатических предвестников, генерируемых при ионизации электрооптических кристаллов лазерными импульсами, на произвольных расстояниях от кристалла. Определены расстояния, на которых униполярность предвестника сменяется квазиуниполярностью, а затем и биполярностью.

6. Разработан новый метод получения униполярных электромагнитных импульсов, основанный на отсечке части биполярного импульса терагерцового излучения при сверхбыстрой ионизации приповерхностного слоя кристалла GaAs импульсом фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Проведенное в диссертации теоретическое исследование трансформации радиоволн на релятивистски движущемся плазменном диске ШАЛ позволило объяснить отрицательные результаты многолетних экспериментальных попыток радарного детектирования ШАЛ как статических плазменных объектов и оказало влияние на прекращение работ по проектам TARA и MARIACHI [19].

2. Оценки приходящей на землю мощности отраженного от ШАЛ радиоизлучения, сделанные на основе разработанной в диссертации теории трансформации радиоволн на релятивистском плазменном диске ШАЛ, показывают принципиальную возможность практической реализации радарного детектирования ШАЛ на основе приема сильно сдвинутого вверх по частоте отраженного радиоизлучения (например, до 3 ГГц с частоты зондирующей радиоволны 1 МГц).

3. В диссертации предложена практическая схема радарного детектирования ШАЛ с расчетом числа приемных антенн на 1 км² области покрытия.

4. Предложенный в диссертации режим трансформации электромагнитной волны на останавливаемом фронте ионизации с вытеканием скинующейся волны из плазмы в свободное пространство перспективен для частотного преобразования коротких электромагнитных импульсов.

5. Полученные в диссертации теоретические результаты по динамике разрушения униполярности квазистатических предвестников в ходе их распространения после выхода из кристалла-генератора определяют ограничения на схемы практического использования предвестников в качестве униполярных импульсов.

6. Разработанный метод получения униполярных электромагнитных импульсов с помощью нестационарного плазменного зеркала может быть использован для создания источников униполярных полей высокой напряженности.

Основные положения, выносимые на защиту

1. При трансформации электромагнитной волны на релятивистском фронте ионизации, создающем неподвижную рекомбинирующую плазму, рекомбинация не сказывается на коэффициенте отражения волны от фронта при выполнении условия $\tau > T/\gamma^2$, где τ – время жизни плазмы, T – период волны, а γ – релятивистский фактор фронта. Это условие выполняется для характерных параметров плазмы ШАЛ ($\tau > 10$ нс, $\gamma > 10$) при частоте зондирующей волны 1-10 МГц.

2. При зондировании ШАЛ радиоволнами с частотой ~ 1 МГц отраженное излучение имеет частоту в несколько гигагерц, попадающую в спектральный интервал минимальных шумов неба. В силу релятивистских аббераций излучение освещает на земле пятно того же размера, что и диск ШАЛ. Спектральное уширение радиоволны из-за ограниченности времени ее взаимодействия с ШАЛ составляет сотни мегагерц и доминирует над другими факторами уширения. При «сверхсветовом» движении фронта ШАЛ одна из прошедших волн распространяется вслед за фронтом, ее частота и амплитуда близки к параметрам отраженной волны при «досветовом» движении фронта.

3. При трансформации короткого электромагнитного импульса на внезапно останавливающемся фронте ионизации возможен режим эффективного повышения частоты импульса в условиях его скинирования за движущимся фронтом ионизации и вытекания из плазмы в свободное пространство после остановки фронта.

4. Квазистатические электромагнитные предвестники фемтосекундных лазерных импульсов, испытывающих одновременно оптическое выпрямление и многофотонное поглощение в электрооптических кристаллах, можно моделировать излучением от последовательно включающихся и через некоторое время выключающихся дискретных ленточных токов, распределенных вдоль лазерного пучка. Аналитические выражения для создаваемых токовыми лентами полей позволяют рассчитывать поля предвестника на произвольном (сколь угодно большом) расстоянии от области его генерации, что является преимуществом по сравнению с методом FDTD.

5. Униполярный электромагнитный импульс пикосекундной длительности может быть получен путем отсечки первой полуволны от биполярного терагерцового импульса с помощью нестационарного плазменного зеркала, создаваемого при ионизации поверхностного слоя кристалла GaAs импульсом фемтосекундного титан-сапфирового лазера с флюенсом порядка 1 мДж/см². Малая (около 1 мкм) глубина проникновения лазерного излучения в GaAs важна для достижения высокого качества отсечки.

Апробация результатов работы и публикации

Диссертационная работа выполнена на кафедре общей физики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых

научных журналах, рекомендованных ВАК, [A1–A6], а также 13 работ в сборниках трудов конференций [A7–A19].

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 27th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (San Diego, 2002), APS April Meeting (Atlanta, 2012), 2nd Conference of International Consortium on Terahertz Photonics and Optoelectronics (Nizhny Novgorod, 2019), 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2021, Sendai, 2021), 20th International Conference Laser Optics (ICLO 2022, St. Petersburg, 2022), 21st International Conference Laser Optics (ICLO 2024, St. Petersburg, 2024), IX и X международных конференциях по фотонике и информационной оптике (Москва, 2020, 2021), V, XIII, XIV, XV и XXIII научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2001, 2009, 2010, 2011, 2019).

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSWR-2020-0035).

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных теоретических, численных и экспериментальных методов, согласованием результатов диссертационной работы в частных случаях с имеющимися данными других авторов, а также апробацией результатов на международных конференциях и публикациями в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах.

Методология и методы исследования

Численный расчет отражения электромагнитной волны от неоднородной плазмы ШАЛ проводился методом Рунге-Кутты.

При исследовании трансформации электромагнитных волн на внезапно останавливающимся фронте ионизации использовался метод преобразования Лапласа с последующим применением методов контурного интегрирования на комплексной плоскости.

При численном моделировании прохождения терагерцового импульса через слои нестационарной плазмы, создаваемой ультракоротким лазерным импульсом в кристалле GaAs, использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD).

Эксперименты по генерации униполярных электромагнитных импульсов с помощью нестационарного плазменного зеркала были основаны на апробированной общей методологии терагерцовой спектроскопии во временной области, в соответствии с которой одна часть лазерного пучка использовалась для генерации терагерцового излучения, а другая – для его детектирования. Особенностью использованной в диссертации экспериментальной методики было разделение лазерного пучка на три части, одна из которых была предназначена для создания плазменного зеркала в кристалле GaAs. Источником оптического

излучения служила титан-сапфировая фемтосекундная лазерная система Astrella (Coherent, США) с длиной волны 0,8 мкм, длительностью импульса 60 фс, частотой повторения 1 кГц и энергией импульса 5 мДж.

Личный вклад автора

Все результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка задач и анализ полученных результатов проводились автором совместно с научным руководителем Бакуновым М.И. (все главы) и Масловым А.В. (главы 1 и 2). Аналитические выкладки в главе 3 проводились совместно с Сычугиным С.А. Экспериментальные исследования в главе 4 проводились совместно с Гореловым С.Д.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка публикаций по диссертации. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, включая 32 рисунка, список литературы из 108 наименований и список публикаций по диссертации из 19 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, указываются научная новизна и практическая значимость диссертации, кратко описывается ее содержание, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию трансформации радиоволн на фронте ионизации ШАЛ, движущемуся с ультрарелятивистской скоростью и создающем сильностолкновительную распадающуюся плазму.

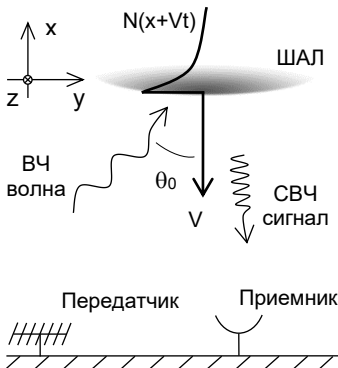


Рис. 1. Схема радарного детектирования релятивистски движущегося плазменного диска ШАЛ.

В п. 1.1 сформулирована модель ШАЛ, приведена схема радарного детектирования ШАЛ (рис. 1), записана система основных уравнений, состоящая из уравнений Максвелла и материального уравнения нестационарной плазмы вида

$$\frac{\partial J_z}{\partial t} = \frac{e^2 N}{m} E_z - (v + \mu) J_z, \quad (1)$$

где J_z – плотность тока, E_z – напряженность электрического поля, $N(x, t) = N_0 e^{-(\mu/V)(x+Vt)} \Theta(x+Vt)$ – концентрация плазмы, $\Theta(x+Vt)$ – единичная функция, v – частота соударений электронов, μ – темп деионизации, e и m – заряд и масса электрона. Даны формулы для частоты отраженной волны и угла отражения.

В п. 1.2 путем применения преобразований Галилея ($\xi = x + Vt, t' = t$) система уравнений сводится к стационарной и интегрируется численно методом Рунге-Кутты. Анализируются рассчитанные зависимости модуля коэффициента отражения $|R|$ от времени жизни плазмы $\tau = \mu^{-1}$ при различных значениях параметров ШАЛ (релятивистского фактора γ , плотности плазмы N_0 , частоты соударений ν) и частоты зондирующей волны. На основе анализа сделан вывод о возможности использования приближения $\mu = 0$.

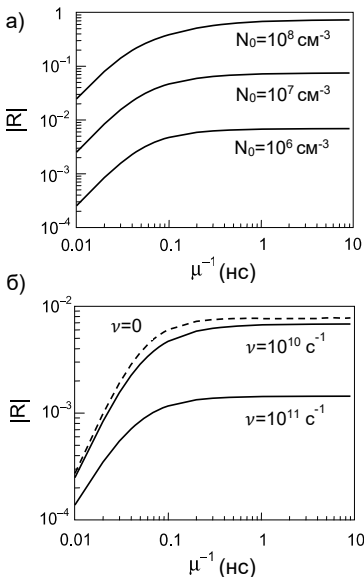


Рис. 2. Модуль коэффициента отражения волны частотой 1 МГц от плазмы ШАЛ в зависимости от времени жизни плазмы: а) при $\nu = 10^{10} \text{ с}^{-1}$ и различных N_0 , б) при $N_0 = 10^6 \text{ см}^{-3}$ и различных ν . Другие параметры: $\gamma = 30, \theta_0 = 45^\circ$.

своим свойствам (частоте, направлению распространения и амплитуде) волне, отраженной от досветового фронта ионизации, и может быть обнаружена расположенным на земле приемником.

В п. 1.6 сделаны выводы по первой главе.

Вторая глава посвящена исследованию нестационарных режимов трансформации электромагнитных волн на фронте ионизации.

В п. 2.1 рассматривается трансформация электромагнитной волны на внезапно останавливаемом фронте ионизации. Вначале дано описание стационарных режимов трансформации электромагнитной волны ТЕ поляризации при наклонном падении на равномерно движущийся фронт ионизации: в зависимости от угла падения и плотности плазмы прошедшая волна может распространяться от фронта, вслед за фронтом или скинироваться.

Стационарное решение используется в качестве начального условия для

решения задачи о трансформации волны на фронте ионизации. На основе анализа сделан вывод о возможности использования приближения $\mu = 0$.

В п. 1.3 в приближении $\mu = 0$ получены аналитические выражения для коэффициента отражения R и исследованы зависимости $|R|$ от плотности плазмы в диске ШАЛ, угла падения радиоволны на диск и релятивистского фактора ШАЛ.

В п. 1.4 обсуждается реалистичность детектирования отраженного от ШАЛ сигнала на фоне шумов при зондировании радиоволнами частотой 10 и 1 МГц. Показана предпочтительность частоты 1 МГц, для которой оценки при мощности передатчика 200 кВт говорят о принципиальной возможности детектирования отраженного от ШАЛ сигнала частотой в несколько гигагерц. Обсуждается возможный дизайн антенного поля для приема сигналов от ШАЛ.

В п. 1.5 рассмотрен безотражательный режим трансформации радиоволны на «сверхсветовом» ШАЛ. Показано, что одна из прошедших волн аналогична по

расчета динамики электромагнитного поля после внезапной остановки фронта ионизации. Расчет ведется методом преобразования Лапласа с использованием контурного интегрирования в комплексной плоскости. Наиболее интересные найденные эффекты, связанные с остановкой фронта, включают формирование квазистатического магнитного поля перед остановившимся фронтом и вытекание скинующегося поля из плазмы в свободное пространство в виде сильно сдвинутого вверх по частоте электромагнитного излучения.

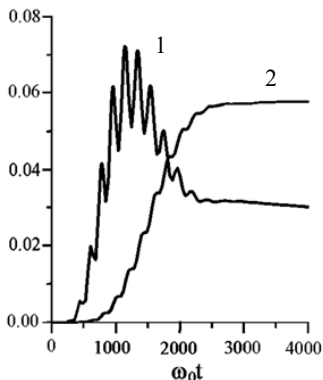


Рис. 3. Зависимость от времени энергий скинующегося поля (1) и отраженной волны (2), нормированных на энергию падающего импульса с центральной частотой ω_0 и длительностью $5/\omega_0$. Плазменная частота равна $0,35\omega_0$, релятивистский фактор 0,999, угол падения 170° .

В п. 2.2 исследована трансформация короткого электромагнитного импульса на равномерно движущемся фронте ионизации в геометрии, когда фронт нагоняет импульс, распространяющийся в плоском волноводе в виде TE_1 моды. Показано, что в режиме скинирования прошедшей волны падающий импульс вначале практически полностью трансформируется в скинующееся поле за фронтом, а затем это поле постепенно вытекает в пространство перед фронтом, формируя отраженный импульс (рис. 3). Указана практически интересная возможность эффективной генерации импульса повышенной частоты за счет остановки фронта ионизации в момент, когда почти весь падающий импульс находится за фронтом в виде скинующегося поля. Это поле излучится через остановившийся фронт в свободное пространство в виде сдвинутого вверх по частоте импульса.

В п. 2.3 сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена разработке полуаналитической модели генерации квазистатических электромагнитных предвестников ультракороткими лазерными импульсами при многофотонной ионизации электрооптических кристаллов и исследованию на основе этой модели динамики изменения волновой формы предвестников в ходе их распространения в свободном пространстве вне кристалла.

В п. 3.1 дано описание модели, в которой процесс генерации предвестников представляется как излучение от последовательно включающихся и через некоторое время (равное длительности лазерного импульса) выключающихся ленточных токов, распределенных вдоль лазерного пучка. Приведены аналитические выражения для полей одного нестационарного ленточного тока в различных пространственно-временных областях и описан алгоритм расчета полного поля, создаваемого большим числом лент с нестационарными токами. Преимуществом данной модели по сравнению методом FDTD является возможность рассчитывать

поля предвестников на произвольных (сколько угодно больших) расстояниях от кристалла.

В п. 3.2 приведены результаты моделирования генерации предвестников в кристалле и их последующего распространения вне кристалла.

Для проверки адекватности разработанной модели проведено сравнение результатов расчета полей униполярных предвестников внутри кристалла с результатами FDTD моделирования в работе [44], получено хорошее согласие.

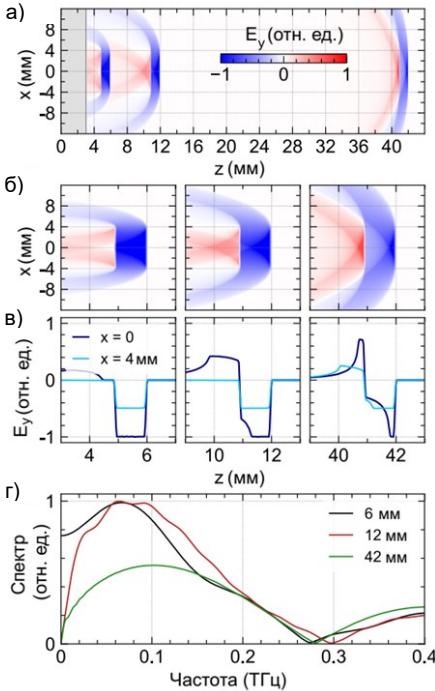


Рис. 4. а, б) Моментальные снимки электрического поля предвестника E_y для трех моментов времени. в) Моментальные снимки E_y на оси ($x = 0$) и при $x = 4$ мм для тех же моментов. г) Спектры поля E_y при $x = 0$ и трех значениях расстояния z . На а) заштрихованная область ($0 < z < 3$ мм) показывает кристалл. Длительность импульса тока 250 фс.

Расчеты волновой формы предвестника в свободном пространстве на различных расстояниях от кристалла для типичных значений ширины лазерного пучка накачки (8 мм) и толщины кристалла GaP (3 мм) показывают (рис. 4), что предвестник сохраняет униполярность на расстояниях < 3 мм, является квазиуниполярным на расстояниях ~ 3 -40 мм и далее становится биполярным. Обнаружен интересный эффект сохранения поперечного размера области сильного поля предвестника и максимальной величины поля вплоть до расстояний ~ 200 мм, что может быть названо распространением предвестника в режиме электромагнитной пули.

В п. 3.3 сделаны выводы по третьей главе.

Четвертая глава посвящена разработке метода преобразования одно- или многопериодных терагерцевых импульсов в полупериодные (униполярные) путем отсечки первой полуволны терагерцевого импульса от остальной его части с помощью нестационарного плазменного зеркала, создаваемого при ионизации кристалла GaAs импульсом фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

В п. 4.1 дано описание принципиальной схемы преобразования

(рис. 5). Перекрывающиеся терагерцевый и лазерный пучки падают по нормали на поверхность полупроводника, при этом размер оптического пятна на поверхности превышает размер терагерцевого. Одно- или многопериодный терагерцевый импульс пикосекундной длительности и фемтосекундный лазерный

импульс приходят к поверхности с относительной временной задержкой – такой, чтобы момент прихода лазерного импульса совпадал с моментом пересечения поверхности окончанием первой полуволны терагерцового импульса. Созданная лазерным импульсом в тонком приповерхностном слое полупроводника

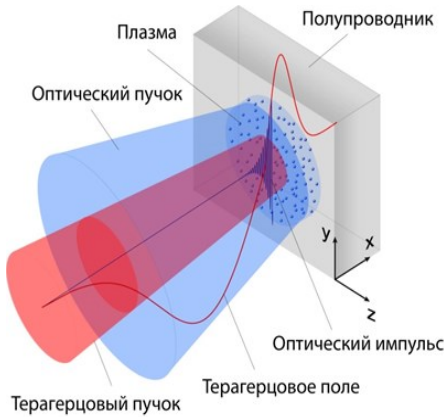


Рис. 5. Принципиальная схема генерации униполярного импульса методом отсечки части одно- или многопериодного терагерцового импульса нестационарным плазменным зеркалом.

плотная плазма отражает заднюю часть терагерцового импульса, отсекая ее от прошедшего униполярного (полуволнового) импульса.

В п. 4.2 приведены результаты численного моделирования прохождения терагерцового импульса через тонкий слой нестационарной плазмы, создаваемый в приповерхностном слое кристалла GaAs лазерным импульсом с гауссовой огибающей интенсивности $I(x, t) = I_{\max} e^{-\alpha x} e^{-(t-x/V)^2/\tau^2}$, где α – оптический коэффициент поглощения ($\sim 1,2 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$), V – групповая скорость лазерного импульса и τ – длительность импульса. При моделировании методом FDTD интегрировалась система, состоящая из уравнений Максвелла и материального уравнения вида (1) с $\mu = 0$ и концентрацией плазмы

$$N(x, t) = \frac{\alpha}{\hbar\omega_L} \int_{-\infty}^t dt' I(x, t') \approx e^{-\alpha x} \frac{N_{\max}}{\sqrt{\pi}\tau} \int_{-\infty}^t dt' e^{-t'^2/\tau^2}, \quad (2)$$

где $\hbar\omega_L$ – энергия кванта лазерного излучения (1,55 эВ для титан-сапфирового лазера) и $N_{\max} = \alpha\sqrt{\pi}\tau I_{\max}/(\hbar\omega_L)$. В силу малой толщины плазменного слоя $d = \alpha^{-1} \approx 0,8 \text{ мкм}$ ($d/V \ll \tau$) в формуле (2) пренебрегается временем распространения лазерного импульса в слое. Волновая форма терагерцового импульса моделировалась функцией $E_y(t) = -E_0 e^{-(t+t_0)^2/T^2} (t + t_0)/T$ с произвольным временным сдвигом t_0 и $T = 0,35 \text{ пс}$. Результаты моделирования для оптимального $t_0 = 0,05 \text{ пс}$ и двух значений плазменной частоты приведены на рис. 6. Как видно, импульс за слоем является полупериодным, с ненулевой спектральной плотностью на нулевой частоте.

В п. 4.3 приведена схема эксперимента по апробации предложенного метода получения униполярных электромагнитных импульсов (рис. 7), а также экспериментальные результаты (рис. 8). Получен полупериодный импульс (красная линия, рис. 8а) с ненулевой спектральной плотностью на нулевой частоте (красная линия, рис. 8б).

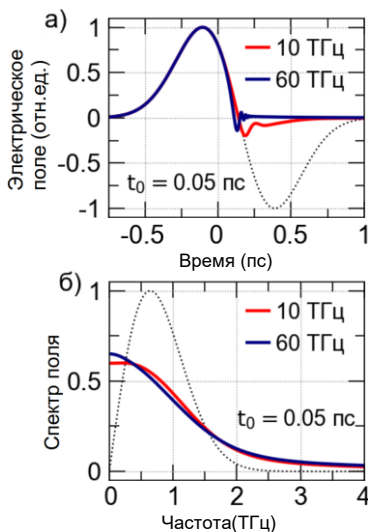


Рис. 6. Результаты моделирования. а) Осциллограмма электрического поля за плазменным слоем и б) ее спектр при оптимальном t_0 и двух значениях плазменной частоты. Штриховая линия – без плазмы.

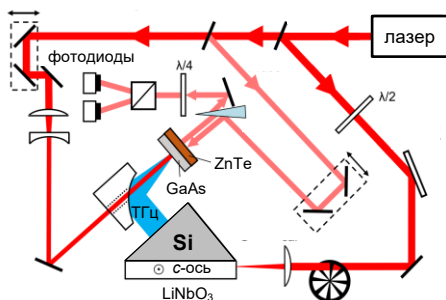


Рис. 7. Схема эксперимента.

Основные результаты

1. Сформулировано и подтверждено численным моделированием условие на время жизни плазмы за фронтом ионизации, при котором распад плазмы не оказывает существенного влияния на коэффициент отражения электромагнитной волны от фронта. Показано, что данное условие выполняется для типичных параметров ШАЛ при частоте волны 1-10 МГц.

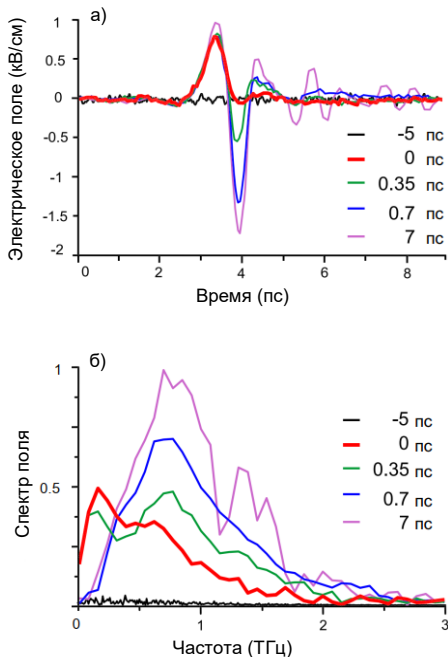


Рис. 8. а) Экспериментальные осциллограммы и б) их спектры при различных временных задержках прихода лазерного импульса.

В п. 4.4 сделаны выводы по четвертой главе.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

2. Рассчитаны характеристики отраженного от фронта ШАЛ радиоизлучения в зависимости от параметров ШАЛ при частоте зондирующего радиоизлучения 1 и 10 МГц. Даны оценки реалистичности радарного детектирования ШАЛ.

3. Указан режим эффективного повышения частоты электромагнитного импульса при его трансформации на внезапно останавливающемся фронте ионизации, связанный с формированием скиннующегося электромагнитного поля за фронтом и его вытеканием из плазмы в свободное пространство после остановки фронта.

4. Разработана полуаналитическая модель процесса генерации квазистатических электромагнитных предвестников фемтосекундными лазерными импульсами, испытывающими оптическое выпрямление и многофотонное поглощение в электрооптических кристаллах, как излучение от последовательно включающихся и затем выключающихся ленточных токов, распределенных вдоль лазерного пучка. Модель позволяет рассчитывать волновую форму предвестников при их распространении на произвольное расстояние от кристалла.

5. Для типичных значений ширины лазерного пучка накачки (8 мм) и толщины кристалла GaP (3 мм) определены расстояния от кристалла, на которых предвестник при распространении сохраняет униполярность (<3 мм), является квазиуниполярным (~ 3 –40 мм) и становится биполярным (>40 мм). Показано, что поперечный размер области сильного поля предвестника и максимальная величина поля не меняются вплоть до расстояний ~ 200 мм.

6. Разработан и экспериментально продемонстрирован метод получения униполярных электромагнитных импульсов пикосекундной длительности, основанный на пропускании первой полуволны биполярного терагерцового импульса через кристалл GaAs и отсечке последующей части импульса в результате ионизации приповерхностного слоя кристалла импульсом фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

Список литературы

1. Einstein, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper / A. Einstein // *Annalen der Physik*. – 1905. – V. 322. – P. 891–921.
2. Семенова, В. И. Об отражении электромагнитных волн от фронта ионизации / В. И. Семенова // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1967. – Т. 10. – №. 8. – С. 1077–1086.
3. Stasielak, J. Feasibility of radar detection of extensive air showers / J. Stasielak [et al.] // *Astroparticle Physics*. – 2016. – V. 73. – P. 14–27.
4. Nagano, M. Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays / M. Nagano, A. A. Watson // *Reviews of Modern Physics*. – 2000. – V. 72. – P. 689–732.
5. Blackett, P. M. S. Radio echoes and cosmic ray showers / P. M. S. Blackett, A. C. B. Lovell // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. – 1941. – V. 177. – P. 183–186.
6. Gurvits, L. I. Jodrell Bank and the pursuit of cosmic rays / L. I. Gurvits [et al.] // *EAS Publications Series*. – 2005. – V. 15. – P. 15–26.

7. Suga, K. / K. Suga // Proceedings of the 5th Interamerican Seminar on Cosmic Rays. – 1962. – V. 2. – P. XLIX-1.
8. Matano, T. Tokyo large air shower project / T. Matano [et al.] // Canadian Journal of Physics. – 1968. – V. 46. – P. S255-S258.
9. Baruch, J. E. F. A gamma ray telescope for the highest energies using radio waves / J. E. F. Baruch, R. I. Davis, N. J. McEwan // Experimental Astronomy. – 1993. – V. 4. – P. 21-40.
10. Gorham, P. W. On the possibility of radar echo detection of ultra-high energy cosmic ray-and neutrino-induced extensive air showers / P. W. Gorham // Astroparticle Physics. – 2001. – V. 15. – P. 177-202.
11. Iyono, A. Radar echo detection system of EAS ionization columns as part of a LAAS detector array / A. Iyono [et al.] // Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference. – 2003. – V. 1. – P. 217-220.
12. Damazio, D. O. A Simple and Cost-Effective Passive Radar Technique for Ultra High Energy Cosmic Ray Detection / D. O. Damazio [et al.] // Nuclear Physics B. – 2004. – V. 134. – P. 217-219.
13. Wahl, D. The search for vertical extended air shower signals at the Jicamarca Radio Observatory / D. Wahl, J. Chau, J. Bellido // Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference. – 2008. – V. 5. – P. 957-960.
14. Wahl, D. The search for extended air showers at the Jicamarca Radio Observatory / D. Wahl [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2009. – V. 1123. – P. 204-210.
15. Terasawa, T. Search for radio echoes from EAS with the MU radar, Shigaraki, Japan / T. Terasawa [et al.] // Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference. – 2009. – V. 1. – P. 1-4.
16. Takai, H. MARIACHI - Detecting Ultra High Energy Cosmic Rays with radar / H. Takai // APS April Meeting Abstracts. – 2006. – P. 1-10.
17. Othman, M. A. B. Bistatic Radar Detection of UHECR with TARA / M. A. B. Othman [et al.] // Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference. – 2013. – V. 1. – P. 611-614.
18. Prohira, S. The radar echo telescope for cosmic rays: Pathfinder experiment for a next-generation neutrino observatory / S. Prohira [et al.] // Physical Review D. – 2021. – V. 104. – № 10. – P. 102006.
19. Savage, R. L. Frequency upconversion of electromagnetic radiation upon transmission into an ionization front / R. L. Savage, C. Joshi, W. B. Mori // Physical Review Letters. – 1992. – V. 68. – № 7. – P. 946-949.
20. Granatstein, V. L. Realization of a relativistic mirror: Electromagnetic backscattering from the front of a magnetized relativistic electron beam / V. L. Granatstein [et al.] // Physical Review A. – 1976. – V. 14. – № 3. – P. 1194-1201.
21. Kiefer, D. Relativistic electron mirrors from nanoscale foils for coherent frequency upshift to the extreme ultraviolet / D. Kiefer [et al.] // Nature Communications. – 2013. – V. 4. – P. 1763.
22. Savage, R. L. Frequency upshifting and pulse compression via underdense relativistic ionization fronts / R. L. Savage [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1993. – V. 21. – № 1. – P. 5-19.

23. Berezhiani, V. I. Multiple reflections: cascaded upshifting of laser pulses by semiconductors / V. I. Berezhiani, S. M. Mahajan, R. Miklaszewski // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2001. – V. 18. – № 5. – P. 617-622.
24. Thomson, M. D. Terahertz frequency upconversion via relativistic Doppler reflection from a photoinduced plasma front in a solid-state medium / M. D. Thomson, S. M. Tzanova, H. G. Roskos // *Physical Review B*. – 2013. – V. 87. – № 8. – P. 085203.
25. Gaafar, M. A. Reflection from a free carrier front via an intraband indirect photonic transition / M. A. Gaafar [et al.] // *Nature Communications*. – 2018. – V. 9. – P. 1447.
26. Meng, F. Relativistic Doppler frequency up-conversion of terahertz pulses reflecting from a photoinduced plasma front in silicon / F. Meng, M. D. Thomson, H. G. Roskos // *Physical Review B*. – 2014. – V. 90. – № 15. – P. 155207.
27. Bakunov, M. I. Frequency upshifting of electromagnetic radiation via oblique incidence on an ionization front / M. I. Bakunov, A. V. Maslov // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 1999. – V. 27. – № 3. – P. 655-663.
28. Розанов, Н. Н. Предельно короткие и униполярные импульсы света: современное состояние проблемы / Н. Н. Розанов, М. В. Архипов, Р. М. Архипов // *Успехи физических наук*. – 2024. – Т. 194. – № 11. – С. 1196-1206.
29. Bessonov, E. G. On a class of electromagnetic waves / E. G. Bessonov // *Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1981. – V. 53. – № 3. – P. 433-436.
30. Wetzels, A. Rydberg State Ionization by Half-Cycle-Pulse Excitation: Strong Kicks Create Slow Electrons / A. Wetzels [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2002. – V. 89. – № 27. – P. 273003.
31. Salén, P. Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology / P. Salén [et al.] // *Physics Reports*. – 2019. – V. 836. – P. 1-74.
32. Fleischer, S. Molecular Orientation and Alignment by Intense Single-Cycle THz Pulses / S. Fleischer [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2011. – V. 107. – № 16. – P. 163603.
33. Chai, X. Subcycle Terahertz Nonlinear Optics / X. Chai [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2018. – V. 121. – № 14. – P. 143901.
34. Zhang, D. Femtosecond phase control in high-field terahertz-driven ultrafast electron sources / D. Zhang [et al.] // *Optica*. – 2019. – V. 6. – № 7. – P. 872-877.
35. Popov, N. L. Free space strange and unipolar EM pulses: Yes or no? / N. L. Popov, A. V. Vinogradov // *Foundations*. – 2021. – V. 1. – № 2. – P. 169-174.
36. Hoffmann, M. C. Coherent single-cycle pulses with MV/cm field strengths from a relativistic transition radiation light source / M. C. Hoffmann [et al.] // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36. – № 23. – P. 4473-4475.
37. Goryashko, V. A. Quasi-half-cycle pulses of light from a tapered undulator / V. A. Goryashko // *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. – 2017. – V. 20. – № 8. – P. 080703.

38. Reimann, K. Table-top sources of ultrashort THz pulses / K. Reimann // Reports on Progress in Physics. – 2007. – V. 70. – № 10. – P. 1597-1632.
39. Gao, Y. Half-cycle-pulse terahertz emission from an ultrafast laser plasma in a solid target / Y. Gao [et al.] // Optics Letters. – 2008. – V. 33. – № 23. – P. 2776-2778.
40. Bogatskaya, A. V. Unipolar terahertz pulse formation in a nonequilibrium plasma channel formed by an ultrashort uv laser pulse / A. V. Bogatskaya, E. A. Volkova, A. M. Popov // Physical Review E. – 2021. – V. 104. – № 2. – P. 025202.
41. Pakhomov, A. V. Unusual terahertz waveforms from a resonant medium controlled by diffractive optical elements / A.V. Pakhomov [et al.] // Scientific Reports. – 2019. – V. 9. – P. 7444.
42. Bakunov, M. I. Optically generated terahertz pulses with strong quasistatic precursors / M. I. Bakunov, A. V. Maslov, M. V. Tsarev // Physical Review A. – 2017. – V. 95. – № 6. – P. 063817.
43. Tsarev, M. V. Tilted-pulse-front excitation of strong quasistatic precursors / M. V. Tsarev, M. I. Bakunov // Optics Express. – 2019. – V. 27. – № 4. – P. 5154-5167.
44. Efimenko, E. S. Quasistatic precursors of ultrashort laser pulses in electro-optic crystals / E. S. Efimenko [et al.] // Physical Review A. – 2018. – V. 98. – № 1. – P. 013842.
45. Shalaby, M. Temporal and spectral shaping of broadband terahertz pulses in a photoexcited semiconductor / M. Shalaby [et al.] // Applied Physics Letters. – 2015. – V. 106. – № 5. – P. 051110.
46. Buhler, J. Terahertz shockwaves generated by a precise subcycle cut of the electric field / J. Buhler [et al.] // Optica. – 2018. – V. 5. – № 7. – P. 821-824.
47. He, Y. Enhanced performance of a fast GaAs-based terahertz modulator via surface passivation / Y. He [et al.] // Photonics Research. – 2021. – V. 9. – № 11. – P. 2230-2236.
48. Novikov, I. A. Time-resolved detection of terahertz response in photodynamically induced plasmonic metasurfaces / I. A. Novikov [et al.] // JETP Letters. – 2024. – V. 119. – P. 665-671.
49. Gingras, L. Direct temporal shaping of terahertz light pulses / L. Gingras, D. G. Cooke // Optica. – 2017. – V. 4. – № 11. – P. 1416-1420.
50. Gingras, L. Active phase control of terahertz pulses using a dynamic waveguide / L. Gingras [et al.] // Optics Express. – 2018. – V. 26. – № 11. – P. 13876-13882.

Список публикаций по диссертации

- [A1] Bakunov, M. I. Interaction of an electromagnetic wave with a suddenly stopped ionization front / M. I. Bakunov, A. V. Maslov, A. L. Novokovskaya, N. Yugami, Y. Nishida // *Physical Review E*. – 2002. – V. 66. – P. 026404.
- [A2] Bakunov, M. I. Relativistic effects in radar detection of ionization fronts produced by ultra-high energy cosmic rays / M. I. Bakunov, A. V. Maslov, A. L. Novokovskaya, A. Kryemadhi // *Astroparticle Physics*. – 2010. – V. 33. – P. 335-340.
- [A3] Bakunov, M. I. Prospects for radar detection of cosmic ray air showers with medium-frequency radio waves / M. I. Bakunov, A. V. Maslov, A. L. Novokovskaya, A. Kryemadhi // *New Journal of Physics*. – 2013. – V. 15. – P. 113027.
- [A4] Bakunov, M. I. The no-reflection regime of radar detection of cosmic ray air showers / M. I. Bakunov, A. V. Maslov, A. L. Novokovskaya, A. Kryemadhi // *New Journal of Physics*. – 2015. – V. 17. – P. 053015.
- [A5] Sychugin, S. A. Propagation dynamics of optically generated unipolar electromagnetic pulses / S. A. Sychugin, A. L. Novokovskaya, M. I. Bakunov // *Physical Review A*. – 2022. – V. 105. – P. 053528.
- [A6] Gorelov, S. D. Unipolar fields produced by ultrafast optical gating of terahertz pulses / S. D. Gorelov, A. L. Novokovskaya, S. B. Bodrov, M. V. Sarafanova, M. I. Bakunov // *Applied Physics Letters*. – 2025. – V. 126. – P. 011104.
- [A7] Бакунов, М. И. Трансформация электромагнитной волны на внезапно останавливающемся фронте ионизации / М. И. Бакунов, А. В. Маслов, А. Л. Новоковская // Труды V научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А. А. Андропова, Нижний Новгород, 7 мая. – 2001. – С. 163-164.
- [A8] Bakunov, M. I. Interaction of an electromagnetic wave with a suddenly stopped ionization front / M. I. Bakunov, A. V. Maslov, A. L. Novokovskaya, N. Yugami, Y. Nishida // *Conference Digest of the 27th International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, San Diego, USA, September 22-26. – 2002. – P. 181-182.
- [A9] Бакунов, М. И. Влияние соударений и рекомбинации на трансформацию электромагнитной волны на фронте ионизации / М. И. Бакунов, А. Л. Новоковская // Труды XIII научной конференции по радиофизике, посвященной 85-летию со дня рождения М. А. Миллера, Нижний Новгород, 7 мая. – 2009. – С. 102-103.
- [A10] Бакунов, М. И. Релятивистские эффекты при радарном обнаружении космических частиц ультравысоких энергий / М. И. Бакунов, А. Л. Новоковская // Труды XIV научной конференции по радиофизике, посвященной 80-летию со дня рождения Ю. Н. Бабанова, Нижний Новгород, 7 мая. – 2010. – С. 192-193.
- [A11] Бакунов, М. И. Особенности зондирования широких атмосферных ливней на частоте 1 МГц / М. И. Бакунов, А. Л. Новоковская // Труды XV научной

конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения А. А. Андропова, Нижний Новгород, 10-13 мая. – 2011. – С. 160-161.

- [A12] Kryemadhi, A. Radar detection of high energy cosmic ray showers / A. Kryemadhi, M. Bakunov, A. Maslov, A. Novokovskaya // APS April Meeting 2012, Atlanta, USA, March 31–April 3, 2012, Bulletin of the American Physical Society. – 2012. – V. 57. – № 3. – Abstract ID: BAPS.2012.APR.W7.10.
- [A13] Novokovskaya, A. L. Compression of unipolar terahertz pulses at ionization fronts in GaP / A. L. Novokovskaya, M. I. Bakunov // 2nd Conference of International Consortium on Terahertz Photonics and Optoelectronics. Program and Proceedings, Nizhny Novgorod, Russia, July 8-11. – 2019. – P. 155-156.
- [A14] Новоковская, А. Л. Трансформация терагерцевых импульсов на фронте ионизации в кристалле GaP / А. Л. Новоковская, М. И. Бакунов // Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н. А. Железцова, Нижний Новгород, 13–21 мая. – 2019. – С. 319-320.
- [A15] Новоковская, А. Л. Преобразование терагерцевых импульсов на фронте ионизации в кристалле GaP / А. Л. Новоковская, М. А. Курников, М. И. Бакунов // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 29–31 января. – 2020. – С. 49-50.
- [A16] Новоковская, А. Л. Генерация сгустков квазистатических полей при оптической ректификации ультракоротких лазерных импульсов / А. Л. Новоковская, С. А. Сычугин, М. И. Бакунов // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 27–29 января. – 2021. – С. 51-52.
- [A17] Novokovskaya, A. L. Generation of unipolar electromagnetic missiles by optical rectification of ultrashort laser pulses / A. L. Novokovskaya, S. A. Sychugin, M. I. Bakunov // 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2021), Sendai, Japan Technical Digest, Nov. 1-4. – 2021. – P. 56-57.
- [A18] Novokovskaya, A. L. Propagation Effects for Optically Generated Unipolar Sub-Terahertz Pulses / A. L. Novokovskaya, S. A. Sychugin, M. I. Bakunov // 20th International Conference Laser Optics (ICLO 2022), St. Petersburg, Russia, June 20-24. – 2022. – С. 01-01.
- [A19] Novokovskaya, A. L. Terahertz field and carrier dynamics in optically excited layer at the surface of a GaAs crystal / A. L. Novokovskaya, M. I. Bakunov // 21th International Conference Laser Optics (ICLO 2024), St. Petersburg, Russia, July 1-5. – 2024. – С. 01-01.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Трансформация радиоволн на фронтах ионизации широких атмосферных ливней

- 1.1. Модель ШАЛ и система основных уравнений
- 1.2. Численное исследование влияния времени жизни плазмы на отражение радиоволны от ШАЛ
- 1.3. Анализ коэффициента отражения в зависимости от параметров ШАЛ и частоты волны
- 1.4. Оценка реалистичности радарного детектирования ШАЛ
- 1.5. Особенности безотражательного режима трансформации радиоволны на «сверхсветовом» ШАЛ
- 1.6. Выводы по главе 1

Глава 2. Нестационарные режимы трансформации электромагнитных волн на фронте ионизации

- 2.1. Трансформация электромагнитной волны на внезапно останавливающемся фронте ионизации
- 2.2. Трансформация короткого электромагнитного импульса на фронте ионизации
- 2.3. Выводы по главе 2

Глава 3. Полуаналитическая модель генерации квазистатических предвестников при многофотонной ионизации электрооптических кристаллов ультракороткими лазерными импульсами

- 3.1. Модель нестационарных ленточных токов
- 3.2. Эволюция волновой формы предвестников
- 3.3. Выводы по главе 3

Глава 4. Преобразование биполярных терагерцевых импульсов в униполярные при оптической ионизации кристалла GaAs

- 4.1. Схема преобразования
- 4.2. Численное моделирование прохождения терагерцевых импульсов через слой нестационарной плазмы
- 4.3. Схема эксперимента и экспериментальные результаты
- 4.4. Выводы по главе 4

Заключение

Список литературы

Список публикаций по диссертации

Подписано в печать __.__.____ г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 1. Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.
63000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37