

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов»**

**Аспирант:** Юровский Лев Александрович

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:** д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН,  
зав. отд. Гинзбург Наум Самуилович

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

Радиофизика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород  
2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность работы

Повышение пиковой мощности микроволнового импульсного излучения традиционно является одной из основных задач электроники больших мощностей, включая релятивистскую высокочастотную электронику. Вместе с тем, в последние годы увеличивается интерес к использованию мощных короткоимпульсных источников в ряде как исследовательских (ускорение элементарных частиц, физика плазмы, плазмохимия и др.), так и прикладных (медицина, радиолокация, связь и др.) приложений [1–9]. Поскольку возможности повышения пиковой мощности коротких импульсов за счет увеличения энергетики электронных пучков ограничены, значительное число исследований [10–13] связано с поиском механизмов повышения мощности без увеличения энергозапаса электронных пучков. В этой связи представляется актуальной проблема поиска новых и развитие известных методов, позволяющих формировать и усиливать короткие микроволновые импульсы.

В настоящее время короткие субнаносекундные электромагнитные импульсы с наибольшей пиковой мощностью получены на основе черенковского сверхизлучения (СИ) протяженных электронных сгустков, движущихся в периодических замедляющих структурах [14–17]. В Ка-диапазоне в режимах генерации одиночных импульсов источники СИ обеспечивают гигаваттный уровень пиковой мощности [14,15], а в режимах периодического следования импульсов с частотой до 1 кГц [16,17], реализуемых при меньших ускоряющих напряжениях и токах, пиковая мощность импульсов СИ снижается до субгигаваттных (400–500 МВт) значений. Очевидно, что прямое усиление мощных импульсов СИ ограничено нелинейными эффектами. В этой связи для достижения мульти-гигаваттного уровня пиковой мощности используются подходы, основанные на применении сверхразмерных замедляющих структур, а также когерентного суммирования импульсов СИ от нескольких независимых источников [18,19].

Альтернативный подход, развиваемый в настоящей работе, может быть основан на так называемом методе усиления чирпированных импульсов (англ. Chirped Pulse Amplification, CPA), который широко используется в физике лазеров и позволяет усиливать лазерные импульсы фемтосекундной длительности до петаваттного уровня мощности [20–25]. Такой подход включает в себя растяжение исходного импульса в диспергирующей линии (стретчере), в которой пиковая мощность импульса снижается и он приобретает зависимость частоты от времени, последовательное усиление различных спектральных компонент в одном или нескольких широкополосных усилителях и восстановление исходной формы в компрессоре. Как показано в работах [1А–10А], CPA-метод может быть перенесен в микроволновый диапазон частот для формирования импульсов с мульти-мегаваттной или мульти-гигаваттной пиковой

мощностью в зависимости от типа усилителя. Благодаря универсальности данного метода, возможно его применение для усиления суб-гигваттных импульсов СИ при использовании в качестве усилителя релятивистской черенковской ЛБВ. В то же время для усиления ультракоротких импульсов (УКИ) с мощностью в десятки киловатт, получаемых в генераторах, основанных на пассивной синхронизации мод [26–30], целесообразно использование слаборелятивистской винтовой гиро-ЛБВ, обладающей более широкой полосой усиления.

Еще одним способом получения chirпированных сигналов для последующего сжатия в компрессоре является использование СВЧ генераторов, работающих в непрерывном режиме. Изменение параметров в таких системах, например, энергии электронного пучка [31,32] или напряженности магнитного поля [33,34], позволяет варьировать частоту излучаемого сигнала и, тем самым, формировать частотно-модулированный импульс. Однако, ширина полосы перестройки генераторов обычно ограничена, а ее расширение, как правило, ведет к снижению эффективности генерации (электронного КПД). В этой связи, для генерации сигналов с широкой полосой частотной перестройки с последующим формированием коротких и ультракоротких импульсов перспективной представляется схема «генератор – частотный модулятор – компрессор» [35–38], в которой перестройка частоты обеспечивается за счет дополнительного элемента – модулятора. В качестве первой секции могут использоваться гиротроны, как эффективные источники мощного микроволнового излучения, работающие в непрерывном (длинно-импульсном) режиме генерации [39–43]. В то же время для эффективной компрессии и достижения высоких пиковых мощностей в формируемом коротком импульсе, частотный модулятор должен удовлетворять определенным требованиям, а именно, обладать высокой эффективностью преобразования излучения и возможностью плавной и достаточно быстрой перестройки частоты в широком диапазоне. Как показано в работах [11А–15А], частотный модулятор с такими характеристиками может быть реализован при использовании режима вынужденного обратного рассеяния излучения на дополнительном слаборелятивистском электронном пучке с переменной энергией частиц. Следует отметить, что процессы вынужденного рассеяния волн широко исследовались ранее применительно к лазерам на свободных электронах (ЛСЭ) [44–48], в которых волна накачки, распространялась навстречу релятивистскому электронному пучку, а частота рассеянного попутного излучения вследствие эффекта Доплера существенно превышала частоту накачки. В случае частотного модулятора предполагается, что имеет место преобразование частоты вниз, когда волна накачки распространяется попутно, а рассеянная волна – навстречу электронному пучку. В этом случае, в условиях абсолютной неустойчивости, возможно самовозбуждение сигнальной волны в отсутствие внешних электродинамических систем (резонаторов). Далее, аналогично СРА-схеме, возможна последующая компрессия частотно-модулированного сигнала при использовании волноводов с многозаходной винтовой гофрировкой стенок. Кроме того, для гиротронного

излучения возможность плавной перестройки частоты может представлять интерес для более эффективного нагрева плазмы в установках термоядерного синтеза [49], а также для спектроскопических приложений [50,51].

Еще одним перспективным методом повышения пиковой мощности коротких (в масштабе времени жизни электронов в пространстве взаимодействия) микроволновых импульсов является нелинейная компрессия, имеющая место при циклотронно-резонансном взаимодействии с первоначально прямолинейным электронным потоком, выступающим в роли пассивной (поглощающей) среды. Как показано в работах [52–58, 18А–20А], в этих условиях имеют место эффекты, являющиеся классическими аналогами эффекта самоиндуцированной прозрачности, реализующейся при распространении световых импульсов в неинвертированных двухуровневых средах. В этом случае, при достаточно большой энергии исходного импульса, он трансформируется в один или несколько солитонов, амплитуда и длительность которых определяется скоростью их распространения и частотным сдвигом относительно циклотронного резонанса. В таких процессах возможна ситуация, когда трансформация исходного импульса в солитон сопровождается 3-х кратной компрессией с сопутствующим укорочением импульса.

## **Цели диссертационной работы**

Основными целями диссертационной работы являются:

1. Теоретическое исследование возможности реализации СРА-метода в микроволновой электронике для генерации импульсов с ультравысокой пиковой мощностью. Анализ возможности использования волноводов с многозаходной винтовой гофрировкой в качестве диспергирующих элементов для растяжения исходного импульса и компрессии chirпированного сигнала с восстановлением начальной формы. Анализ возможности использования в указанных схемах в качестве усилителей широкополосных винтовых гиро-ЛБВ для формирования импульсов мульти-мегаваттной пиковой мощности и релятивистских черенковских усилителей для формирования импульсов мульти-гигаваттной пиковой мощности.
2. Анализ возможности реализации частотного модулятора на основе режима вынужденного обратного рассеяния излучения на попутном слаборелятивистском электронном пучке с переменной энергией. Исследование особенностей механизмов насыщения амплитуды рассеянной волны, связанной с истощением накачки и нелинейными эффектами в движении электронов. Оптимизация закона изменения энергии электронов от времени, обеспечивающего формирование на выходе компрессора коротких микроволновых импульсов с пиковой мощностью, значительно превышающей мощность задающего генератора (гиротрона).

3. Исследование генерации импульсов сверхизлучения терагерцового диапазона при обратном рассеянии лазерного импульса на попутном сильноточном релятивистском электронном пучке. Анализ возможности использования взрывоэмиссионного катода, формирующего квазинепрерывный электронный пучок, и фотокатода, эмитирующего периодическую последовательность электронных сгустков.
4. Получение обобщенных (двухпараметрических) солитонных решений, описывающих формирование солитонов самоиндуцированной прозрачности при циклотронно-резонансном взаимодействии микроволновых импульсов с первоначально прямолинейным электронным потоком, выступающим в роли пассивной нелинейной среды. Исследование устойчивости полученных решений на основе моделирования начальных и граничных задач попутного и встречного распространения электронного потока и короткого микроволнового импульса.

### **Научная новизна и практическая значимость**

– На основе пространственно-временного подхода продемонстрирована возможность реализации метода усиления чирпированных импульсов (СРА-метода) в СВЧ-электронике с релятивистской черенковской ЛБВ в качестве усилителя для формирования мульти-гигаваттных коротких импульсов и с винтовой гиро-ЛБВ для формирования мульти-мегаваттных ультракоротких импульсов. Показана возможность использования волноводов с пятизаходной винтовой гофрировкой стенок для реализации эффективной пары «стретчер – компрессор». Разработан метод оптимизации геометрических параметров спирально-гофрированных волноводов, выступающих в роли диспергирующих элементов, для получения наибольших коэффициентов растяжения и компрессии, и, соответственно, для достижения максимальной пиковой мощности сформированного импульса.

– Исследована возможность использования режима вынужденного обратного рассеяния для реализации частотного модулятора с широкой полосой перестройки. Проанализированы различные механизмы насыщения амплитуды сигнальной волны. На основе пространственно-временного подхода продемонстрирована возможность реализации частотного модулятора с полосой перестройки до 10%. Разработан метод оптимизации зависимости энергии электронов от времени в частотном модуляторе и соответствующих параметров компрессора для достижения максимальной пиковой мощности на выходе из диспергирующей линии с учетом омических потерь.

– Продемонстрирована возможность генерации терагерцовых импульсов СИ при обратном рассеянии лазерного излучения на попутном релятивистском электронном пучке. Показана возможность генерации периодической последовательности терагерцовых импульсов при

многократном взаимодействии лазерного импульса, циркулирующего в резонаторе, с последовательностью электронных сгустков, эмитируемых фотокатодом.

– Исследованы особенности циклотронно-резонансного взаимодействия коротких микроволновых импульсов с первоначально прямолинейным электронным пучком. Продемонстрирована аналогия возникающих эффектов с эффектами самоиндуцированной прозрачности, имеющими место при распространении коротких световых импульсов через неинвертированные двухуровневые среды. В рамках модели, учитывающей зависимость гирочастоты от энергии электронов, аналитически получены обобщенные солитонные решения, форма которых определяется скоростью солитона и его частотным сдвигом относительно циклотронного резонанса. Устойчивость таких решений подтверждена на основе моделирования граничной пространственно-временной задачи. На основе PIC-моделирования, в миллиметровом диапазоне частот продемонстрирована возможность самокомпрессии субнаносекундного импульса СИ импульса, сопровождающейся трехкратным увеличением пиковой мощности, при формировании солитона самоиндуцированной прозрачности.

Практическая значимость работы обусловлена её направленностью на разработку новых методов формирования мощных коротких микроволновых импульсов. Такие импульсы, в зависимости от диапазона и мощности излучения, могут найти применение для ускорения частиц, радиолокации, спектроскопии, а также диагностики плазмы. Кроме этого, для указанных выше приложений представляют непосредственный интерес частотно-модулированные (чирпированные) сигналы.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Метод усиления чирпированных импульсов, включающий предварительное растяжение исходного импульса в стретчере, последовательное усиление спектральных компонент в усилителе и заключительное восстановление начальной формы в компрессоре, может быть реализован в микроволновом диапазоне частот при использовании в качестве диспергирующих элементов волноводов с многозаходной винтовой гофрировкой. В качестве усилителей могут быть использованы широкополосные винтовые гиро-ЛБВ для формирования импульсов мульти-мегаваттной пиковой мощности или релятивистские черенковские усилители для формирования импульсов мульти-гигаваттной пиковой мощности.
2. Режим вынужденного обратного рассеяния попутной волны накачки в сигнальную волну, распространяющуюся навстречу электронам, может быть использован для реализации широкополосного частотного модулятора с высоким квантовым выходом.

3. В системе «гиротрон – частотный модулятор – компрессор», при оптимизации закона изменения энергии электронов в модуляторе, возможно преобразование исходного квазинепрерывного излучения в последовательность коротких микроволновых импульсов с пиковой мощностью, многократно превышающей мощность исходного излучения.
4. Генерация импульсов сверхизлучения терагерцового диапазона может быть получена в процессе обратного рассеяния лазерных импульсов на попутном релятивистском электронном потоке или на последовательности протяженных электронных сгустков.
5. Солитоны самоиндуцированной прозрачности, формирующиеся в процессе циклотронно-резонансного взаимодействия микроволнового излучения с первоначально прямолинейными электронными потоками, описываются двухпараметрическими аналитическими решениями. При этом амплитуда и длительность солитона определяются его скоростью и сдвигом несущей частоты солитона относительно частоты циклотронного резонанса.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты, включенные в диссертационную работу, получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка задач, определение подходов к их решению, анализ, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем Н.С. Гинзбургом, а также с И.В. Зотовой и А.С. Сергеевым.

Расчеты выполнялись на основе оригинальных программ, созданных автором самостоятельно, а также с помощью вычислительных кодов, разработанных А.С. Сергеевым и А.В. Назаровским.

### **Публикации и апробация результатов**

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1А-3А,11А,12А,16А,18А,19А], и обсуждались на международных конференциях «IRMMW-THz» (Париж, Франция, 2019 г.; Ченду, Китай, 2021 г.), «IVEC» (Нидерланды, 2021 г.), «TERA» (Н.Новгород, 2018 г.), «BEAMS» (Чанша, Китай, 2018 г.), «PhysicA.Spb» (Санкт-Петербург, 2019 г.), VII Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2020 г.), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2019 и 2022 гг.), XVIII Научной школе «Нелинейные волны» (Н. Новгород, 2018 г.), Нижегородской сессии молодых учёных (Нижегородская обл., г. Арзамас, 2019 г.), а также на внутренних семинарах ИПФ РАН. Результаты докладывались на конкурсе молодых ученых ИПФ РАН 2021 года.

## Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, одного приложения, списка литературы из 143 наименований. Общий объем диссертации составляет 132 страницы, включая 52 рисунка и 2 таблицы.

## Краткое содержание диссертационной работы

Во *введении* обоснована актуальность темы, кратко сформулированы цели и задачи диссертации, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и значимость работы.

В *первой главе* рассматривается возможность переноса в микроволновый диапазон частот метода усиления чирпированных импульсов, широко используемого в физике лазеров для формирования фемтосекундных импульсов петаваттного уровня мощности. Данный метод включает в себя три этапа. На первом этапе в диспергирующей линии (стретчере) осуществляется растяжение исходного короткого импульса, которое сопровождается его частотной модуляцией (чирпированием) и понижением пиковой мощности. На втором этапе происходит последовательное усиление различных спектральных компонент в широкополосном усилителе. На заключительном этапе происходит восстановление исходной формы импульса в диспергирующей линии с отрицательной дисперсией (компрессоре). Использование данного метода позволяет избежать развития различных нелинейностей в усилителе, а также его разрушения. Благодаря тому, что исходная идея данного метода восходит к радиолокации, очевидно, что он может быть реализован в СВЧ электронике. При этом усилители, помимо высокого коэффициента усиления, должны обладать широкой рабочей полосой и вносить минимальные фазовые искажения в усиливаемый сигнал. В то же время для реализации эффективных диспергирующих элементов (стретчера и компрессора) они должны обладать достаточно большой и монотонной зависимостью групповых скоростей от частоты. В них должно отсутствовать отражение в рабочей полосе частот, для передачи сигнала между различными секциями, и они должны обладать высокой электропрочностью.

В **п.1.1** в качестве дисперсионных элементов рассматриваются волноводы с многозаходной винтовой гофрировкой. Такая гофрировка в условиях брэгговского резонанса связывает две противоположно вращающиеся парциальные моды цилиндрического волновода, одна из которых является бегущей, а другая – квазикритической. При этом важной особенностью такого волновода является то, что дисперсионные свойства одной из формирующихся нормальных волн сильно зависят от параметров гофрировки и могут изменяться в широких пределах, позволяя реализовывать эффективные стретчер и компрессор. На основе известной системы динамических уравнений, описывающих эволюцию амплитуды связанных парциальных



волн, рассматриваются различные методы оптимизации параметров гофрировки для достижения максимально возможного растяжения исходного импульса после прохождения первой секции и восстановления его формы на заключительном этапе. Один из методов является аналогом метода компенсации дисперсии второго порядка, применяемого в оптических СРА-схемах для оптимизации параметров дифракционных решеток. Второй метод основан на известном «кинематическом подходе», который заключается в представлении импульса на входе в диспергирующую линию в виде набора виртуальных частиц, скорости которых соответствуют групповым скоростям нормальной волны на различных частотах. В этом случае, оптимальный стретчер обеспечивает эффективный равномерный разлет частиц, в то время как компрессор обеспечивает их сбор в одну точку. В рамках такого метода проведена оптимизация геометрических параметров волноводов с пятизаходной винтовой гофрировкой, выступающих в роли диспергирующих элементов и обеспечивающих растяжение и восстановление формы импульса с длительностью 300 пс и центральной частотой 30 ГГц.

В п.1.2 рассмотрена возможность реализации СРА-схемы для повышения мощности импульсов сверхизлучения при использовании в качестве усилителя релятивистской черенковской ЛБВ Ка-диапазона. Высокий уровень пиковой мощности импульсов СИ делает невозможным их непосредственное усиление в связи с развивающимися нелинейными эффектами в усилителе. Однако после растяжения подобного импульса в стретчере и понижения пиковой мощности появляется возможность усиления отдельных спектральных компонент. При этом проведенный анализ амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик релятивистских ЛБВ на основе слабогофрированных волноводов показывает возможность достижения необходимого коэффициента усиления в рабочей полосе частот для всех величин входящих мощностей при малом паразитном набеге фаз (менее  $\pi/2$ ). Проведена оптимизация параметров стретчера и компрессора на основе метода, разработанного в п.1.1, для исходного импульса сверхизлучения длительностью 350 пс на частоте  $\sim 30$  ГГц. Показана возможность растяжения импульса сверхизлучения более чем в 10 раз. При этом в зависимости от его пиковой мощности рассматриваемая черенковская ЛБВ работает либо в линейном режиме (исходная пиковая мощность  $< 100$  МВт), либо в режиме нелинейного насыщения (исходная пиковая мощность  $< 500$  МВт). В последнем случае имеет место искажение спектра усиленного импульса. Тем не менее, благодаря оптимизации компрессора в обоих режимах происходит эффективное восстановление исходной формы на третьем этапе. При этом пиковая мощность импульсов на выходе СРА-схемы может достигать 8 ГВт, что соответствует коэффициенту конверсии (отношения пиковой мощности усиленного импульса к мощности используемого электронного пучка)  $\sim 4$ .

В п.1.3 рассматривается возможность реализации СРА-схемы для усиления ультракоротких импульсов с шириной спектра  $>10\%$ . Для этих целей предлагается использовать гири-ЛБВ на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности. При соответствующем выборе параметров одна из нормальных мод такого волновода имеет достаточно большую и практически постоянную групповую скорость в широкой (10–20%) полосе частот, что позволяет во всей этой области обеспечить эффективное резонансное взаимодействие с винтовым электронным пучком на гармониках гирочастоты при выполнении равенства между групповой скоростью рабочей волны и поступательной скоростью частиц. Благодаря использованию волноводов с винтовой гофрировкой во всех 3-х секций рассматриваемую СРА-схему удастся описать единой системой уравнений для медленно меняющихся амплитуд связанных парциальных мод, где передача энергии от одной секции к другой осуществляется за счет бегущей парциальной моды. В случае усилителя данная система дополняется соответствующими уравнениями движения электронов. На этой основе показана возможность усиления 3 кВт импульса, длительностью 200 пс на частоте  $\sim 30$  ГГц до 4 МВт, при использовании усилителя с мощностью пучка 700 кВт, что соответствует коэффициенту конверсии  $\sim 6$ . В заключение обсуждается возможность повышения мощности за счет эффективного увеличения длины стретчера и компрессора при использовании невзаимных элементов для обеспечения двойного прохода через стретчер и компрессор.

Во *второй главе* рассматривается возможность использования режима вынужденного обратного рассеяния на потоке электронов с переменной энергией для генерации частотно-модулированного сигнала с его последующей компрессией и формированием короткого импульса. Предполагается, что волна накачки попутна с электронным потоком, а рассеянная сигнальная волна распространяется во встречном направлении. В этом случае в системе имеет место абсолютная неустойчивость, благодаря которой сигнальная волна возбуждается в отсутствие резонатора, что позволяет плавно изменять частоту генерируемого излучения при варьировании энергии электронов.

В п.2.1 рассматривается модель, в которой волна накачки рассеивается в сигнальную волну на трубчатом бесконечно тонком электронном потоке в цилиндрическом волноводе. Пучок фокусируется нерезонансным продольным магнитным полем. Предполагается, что обе волны имеют  $TE$  поляризацию. В рамках пространственно-временного подхода получена самосогласованная система уравнений, включающая уравнения для амплитуд волн сигнала и накачки, а также усредненные уравнения движения электронов в поле комбинационной волны. Так же учитывается влияние собственных полей пространственного заряда на движение электронов.

В пренебрежении нелинейными эффектами в движении частиц электронный поток может быть представлен как среда, в которой возбуждаются волны пространственного заряда. В

исследуемом случае преобразования частоты вниз происходит возбуждение быстрой волны пространственного заряда (БВПЗ), обладающей положительной энергией. Движение электронов в этом случае может быть описано в рамках линейного приближения, а полученная система уравнений приведена к уравнениям трехволнового распада. На этой основе проводится оценка квантового выхода, т.е. числа квантов накачки преобразованных в кванты сигнала.

В рамках модели, учитывающей нелинейные эффекты в движении и группировке электронов в поле комбинационной волны, могут быть выделены два механизма насыщения роста амплитуды сигнальной волны. Первый механизм связан с истощением накачки и описывается уравнениями трехволнового распада. В рамках второго механизма истощением накачки можно пренебречь, и насыщение роста амплитуды сигнальной волны обусловлено нелинейными эффектами в движении электронов. В работе приводится критерий преобладания того или иного механизма насыщения. Показано, что истощение накачки важно в случае достаточно плотного электронного пучка и относительно небольших интенсивностей полей накачки. В противном случае доминирует второй механизм. Поскольку при преобразовании частоты вниз в энергию рассеянного излучения преобразуется только энергия волны накачки, наиболее привлекательной является реализация режимов с большим квантовым выходом. В частности, такой режим может быть реализован при рассеянии излучения гиротрона на частоте 35 ГГц с мощностью 50 кВт на электронном пучке с напряжением 10–15 кВ и током 30–50 А. Исследовано рассеяние низших волноводных мод  $TE_{1,1}$  или  $TE_{0,1}$  накачки в аналогичные моды сигнала. Показано, что при длине области рассеяния ~50 см коэффициент трансформации по мощности может достигать 70%, а ширина полосы перестройки ~10%. В то же время оценки рассеяния на электронном пучке с аналогичными параметрами гиротрона с частотой 300 ГГц показывают, что в этом случае квантовый выход мал, т.е. мощность рассеянного излучения много меньше мощности накачки. Тем не менее, широкая полоса перестройки рассеянного излучения делает перспективным использование такого излучения в спектроскопических задачах.

В п.2.2 проводится анализ схемы «гиротрон – частотный модулятор – компрессирующая линия», позволяющей формировать мощные короткие микроволновые импульсы. В качестве компрессора рассматривается волновод с пятизаходной винтовой гофрировкой стенок. Для достижения максимальной пиковой мощности обсуждается метод оптимизации, основанный на итерационной процедуре решения прямой и обратной задач и позволяющий получить оптимальные геометрические параметры диспергирующей линии (компрессора) в совокупности с оптимальной зависимостью энергии электронов от времени в частотном модуляторе. На этой основе а показана возможность формирования короткого импульса длительностью 0.6 нс, мощностью 2.8 МВт при использовании частотного модулятора, рассмотренного в п.2.1, что более чем в 50 раз превышает мощность используемого в качестве источника волны накачки

гиротрона. Отмечается возможность генерации периодической последовательности компрессированных импульсов с периодом, определяемым длительностью chirпированного импульса, при многократном периодическом варьировании энергии электронов в частотном модуляторе и использовании в качестве накачки излучение гиротрона, работающего в непрерывном или длинноимпульсном (миллисекундном) режиме.

В п.2.3 рассматривается возможность генерации терагерцовых импульсов сверхизлучения при вынужденном обратном рассеянии лазерных импульсов на попутном сильноточном релятивистском электронном пучке. Показано, что в пренебрежение истощением накачки процесс генерации описывается уравнениями, аналогичными уравнениям, описывающим генерацию импульсов черенковского СИ в режиме взаимодействия со встречной волной (режим ЛОВ). С другой стороны, подобную схему можно рассматривать, как разновидность схем генерации терагерцового излучения при воздействии лазерного излучения на различные нелинейные среды. Однако, в отличие от указанных моделей, генерируемое терагерцовое излучение представляет собой не одноцикловый импульс, а импульс с высокочастотным заполнением, включающий порядка  $10 - 10^2$  периодов колебаний. Проведены оценки параметров терагерцовых импульсов СИ, формируемых при использовании в качестве накачки лазерных импульсов, генерируемых в установке «ИСКРА-5». В качестве источника электронов рассматривается возможность использования как взрывной эмиссии с формированием электронных пучков длительностью до 100 нс, что при рассматриваемых временных интервалах позволяет считать их квазинепрерывными, так и фото-эмиссию, сопровождающуюся формированием периодической последовательности электронных сгустков. На основе моделирования показана возможность генерации импульсов на частоте 3 ТГц, длительностью 30 пс и мощностью до 500 кВт, что позволяет рассматривать данный механизм как альтернативу ЛСЭ терагерцового диапазона, основанных на излучении высокоэнергичных электронных сгустков в ондуляторных полях.

В *третьей главе* исследуется классический аналог эффектов самоиндуцированной прозрачности, имеющих место при распространении коротких световых импульсов через неинвертированные пассивные двухуровневые среды. При циклотронно-резонансном взаимодействии микроволнового излучения с прямолинейным потоком электронов последний можно представить, как набор неизохронных невозбужденных классических осцилляторов, где неизохронность вызвана релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии. В таких условиях, при малой интенсивности падающей волны в области нормального эффекта Доплера, имеет место циклотронное поглощение электромагнитного излучения. Однако, распространение короткого микроволнового импульса большой интенсивности сопровождается формированием микроволнового солитона самоиндуцированной прозрачности, форма которого не меняется при движении через систему и определяется его скоростью и сдвигом несущей частоты относительно

циклотронного резонанса. При этом неизменность формы объясняется тем, что передний фронт электромагнитного импульса возбуждает поперечные циклотронные осцилляции, которые возвращают энергию солитону на заднем фронте.

В **п.3.1** рассматривается самосогласованная система уравнений, описывающая циклотронно-резонансное взаимодействие короткого микроволнового импульса как с попутным, так и со встречным первоначально прямолинейным электронным потоком. Предполагается что импульс распространяется в волноводе. При этом фазовая скорость волны должна быть отлична от скорости света, т.е. взаимодействие происходит вне области авторезонанса, где вследствие полной компенсации смещения фазы, вызванной релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии и эффектом отдачи, электроны ведут себя как линейные осцилляторы.

В **п.3.2** аналитически найдено двухпараметрическое солитонное решение. Важно подчеркнуть, что в отличие от решения, описывающего оптический солитон самоиндуцированной прозрачности (СИП-солитон), которое зависит только от одного параметра – скорости солитона, форма микроволнового СИП-солитона определяется двумя параметрами – его скоростью и сдвигом несущей частоты относительно частоты циклотронного резонанса. Таким образом, по своим характеристикам солитонное решение для микроволнового СИП-солитона близко к солитонам, являющимся решением нелинейного уравнения Шредингера. Также в данном разделе исследуется зависимость характеристик солитона, включая амплитуду, длительность, энергию и чирп от его скорости и параметра частотного сдвига.

В **п.3.3** проводится численное моделирование самосогласованной системы уравнений, полученной в **п.3.1**, с граничными условиями, соответствующими попутному распространению импульса и электронов. Демонстрируется аналогия с оптическим эффектом самоиндуцированной прозрачности, а именно, смена циклотронного поглощения образованием микроволнового СИП-солитона при повышении энергии падающего импульса. При дальнейшем повышении энергии, аналогично оптическому случаю, возникает эффект нелинейной самокомпрессии, к которому, при превышении определенной энергии в импульсе, добавляется формирование дополнительных солитонов (солитонов-спутников), обладающих различными амплитудами, длительностями, скоростями и частотными чирпами. Показано соответствие аналитических и численных результатов для профилей микроволновых СИП-солитонов. В заключение проводится оценка возможности экспериментального наблюдения эффекта нелинейной компрессии импульса сверхизлучения на частоте 90 ГГц и мощностью 160 МВт до 530 МВт на длине взаимодействия равной 2 м.

В **п.3.4** проводится моделирование формирования микроволновых СИП-солитонов в условиях встречного распространения падающего импульса и электронов. При этом рассматриваются две задачи – одна из них отвечает системе, в которой электронный пучок подается в пространство взаимодействия с задержкой, тем самым обеспечивая начало

взаимодействия микроволнового импульса и потока электронов внутри рабочего пространства. Показаны особенности формирования микроволновых солитонов, обусловленные движением среды, с которой взаимодействует падающее излучение. В таких условиях слабоэнергетические солитоны увлекаются электронным потоком и распространяются в направлении движения противоположном направлению групповой скорости исходного импульса. В то же время солитоны большой интенсивности распространяются в направлении, соответствующем направлению микроволнового импульса. Показано наличие промежуточного случая – солитона, скорость распространения которого близка к нулю, что можно рассматривать как аналог «остановки света». Исследована закономерность эволюции поведения солитонов разных порядков при увеличении энергии исходного импульса.

Вторая задача соответствует случаю, когда начальный микроволновый импульс подается в пространство взаимодействия, заполненное электронами, что соответствует решению «граничной» задачи и более характерно для экспериментальной реализации. Моделирование показывает, что такая схема оптимальна для достижения высокого коэффициента сжатия при трансформации импульса в микроволновый СИП-солитон. Однако, поскольку пиковая мощность компрессированного солитона достигает своего максимального значения внутри пространства взаимодействия, для получения импульсов с максимальной выходной амплитудой следует ограничивать длительность электронного пучка. Кроме того, аналогично п.3.3, проводится сравнение характеристик прошедших и увлеченных пучком микроволновых СИП-солитонов, полученных в результате моделирования и восстановленных на основе аналитических решений.

В заключение, в рамках PIC-моделирования с использованием кода KARAT, проводится оценка возможности экспериментальной реализации компрессии импульса сверхизлучения с частотой 90 ГГц, длительностью 0.6 нс и пиковой мощностью 100 МВт, сопровождающейся формированием микроволнового СИП-солитона длительностью 300 пс и пиковой мощностью 280 МВт на длине области взаимодействия 20 см.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н, Тяпкин В.Н., Фатеев Ю.Л., Лютиков И.В., Богданов А.В., Кордюков Р.Ю. Радиолокационные системы. (Красноярск: СФУ, 2012).
2. Benford, J., Swegle, J.A. and Schamiloglu, E. High Power Microwaves (2nd ed.). 2007. CRC Press.
3. Gaponov-Grekhov A.V. and Granatstein V.L. Application of High-Power Microwaves. 1994. Artech House, Boston, London.

4. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. (М.: Радио и связь, 1989).
5. Ipatov V.P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications. (John Willy & Sons Ltd, 2004)
6. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров под редакцией М.И. Петелина. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2002. С.45
7. Wiedemann H. Particle Accelerator Physics. (Springer Nature, 2015).
8. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. (М.: Мир, 2003).
9. Хилд М.А. Микроволновая диагностика плазмы. (Под ред. Шпигеля И.С., Абакан: Атомиздат, 1968).
10. Ginzburg N.S., Novozhilova Yu.N., Zotova I.V., Sergeev A.S., Peskov N.Yu., Phelps A.D.R., Wiggins S.M., Cross A.W., Ronald K., He W., Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Tarakanov V.P. Generation of powerful subnanosecond microwave pulses by intense electron bunches moving in a periodic backward wave structure in the superradiative regime. // *Physical Review E*. 1999. V.60. Iss.3. P.3297–3304.
11. Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I. Review of Studies of Superradiative Microwave Generation in X-Band and Ka-band Relativistic BWOs. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. V.32. Iss.3. P.1093–1099.
12. Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Pegel I.V., Mesyats G.A., Rukin S.N., Shpak V.G., Yalandin M.I., Ginzburg N.S. Production of short microwave pulses with peak power exceeding the driving electron beam power. // *Laser and particle beams*. 2003. V.21. Iss.2. P.187–196.
13. Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Высокоэффективная генерация импульсов субнаносекундной длительности в релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона длин волн. // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т.28. Вып.2. С.81–89.
14. Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I., Ginzburg N.S., Sergeev A.S. and Zotova I.V. Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam. // *Physical Review E*. 2006. V.74. Iss.1. P.016501.
15. Rostov V.V., Romanchenko I.V., Pedos M.S., Rukin S.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ul'masculov M.R. and Yalandin M.I. Superradiant Ka-band Cherenkov oscillator with 2-GW peak power. // *Physics of Plasmas*. 2016. V.23. Iss.9. P.093103.
16. Grishin D.M., Gubanov V.P., Korovin S.D., Lyubutin S.K., Mesyats G.A., Nikiforov A.V., Rostov V.V., Rukin S.N., Slovikovskii B.G., Ul'masculov M.R., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A. and Yalandin M.I. High-power subnanosecond 38-GHz microwave pulses

- generated at a repetition rate of up to 3.5 kHz. // *Technical Physics Letters*. 2002. V.28. Iss.10. P.806–809.
17. Luybutin S.K., Rukin S.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Slovikovsky B.G., Ulmaskulov M.R., Yalandin M.I., Korovin S.D. and Rostov V.V. Nanosecond hybrid Modulator for the fast-repetitive driving of X-band, gigawatt-power microwave source. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005. V.33. Iss.4. P.1220–1225.
18. Sharypov K.A., El'chaninov A.A., Mesyats G.A., Pedos M.S., Romanchenko I.V., Rostov V.V., Rukin S.N., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ul'masculov M.R. and Yalandin M.I. Coherent summation of Ka-band microwave beams produced by sub-gigawatt superradiance backward wave oscillators. // *Applied Physics Letters*. 2013. V.103. Iss.13. P.134103.
19. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A., Mesyats G.A., Pedos M.S., Phelps A.D.R., Romanchenko I.V., Rostov V.V., Rukin S.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Yalandin M.I. and Zotova I.V. Generation of Electromagnetic Fields of Extremely High Intensity by Coherent Summation of Cherenkov Superradiance Pulses. // *Physical Review Letters*. 2015. V.115. Iss.11. P.114802.
20. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. // *Optics Communications*. 1985. V.56. Iss.3. P.219–221.
21. Korzhimanov A.V., Gonoslov A.A., Khazanov E.A., Sergeev A.M. Horizons of petawatt laser technology. *Physics – Uspekhi*. 2011. V.54. Iss.1. P.9–28.
22. Danson C., Hillier D., Hopps N., Neely D. Petawatt class lasers worldwide. // *High Power Laser Science and Engineering*. 2015. V.3. P.E3.
23. Danson C.N., Haefner C., Bromage J., Butcher T., Chanteloup J.-C.F., Chowdhury E.A., Galvanauskas A., Gizzi L.A., Hein J., Hillier D.I., Hopps N.W., Kato Y., Khazanov E.A., Kodama R., Korn G., Li R., Li Y., Limpert J., Ma J., Nam C.H., Neely D., Papadopoulos D., Penman R.R., Qian L., Rocca J.J., Shaykin A.A., Siders C.W., Spindloe C., Szatmári S., Trines R.M.G.M., Zhu J., Zhu P. and Zuegel J.D. Petawatt and exawatt class lasers worldwide. // *High Power Laser Science and Engineering*. 2019. V.7. P.E54.
24. Yakovlev I.V. Stretchers and compressors for ultra-high power laser systems. // *Quantum Electronics*. 2014. V.44. Iss.5. P.393–414.
25. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A. and Yakovlev I.V. Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals. // *Laser Physics Letters*. 2007. V.4. Iss.6. P.421–427.
26. Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S. Generation of “gigantic” ultra-short microwave pulses based on passive mode-locking effect in electron oscillators with saturable absorber in the feedback loop. // *Physics of Plasmas*. 2016. V.23. Iss.5. P.050702.



27. Гинзбург Н.С., Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С. Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке связанных ламп бегущей волны, работающих в режимах усиления и нелинейного компрессорного подавления. // Письма в ЖТФ. 2017. Т.43. Вып.18. С.47–55.
28. Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S., Samsonov S.V. and Mishakin S.V. Generation of train of ultrashort microwave pulses by two coupled helical gyro-TWTs operating in regimes of amplification and nonlinear absorption. // *Physics of Plasmas*. 2017. V.24. Iss.2. P.023103.
29. Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Mishakin S.V., Marek A. and Jelonek J. Ultra-Wideband Microwave Oscillator Performance by Coupling of Two Gyro-TWTs with Helical Waveguide. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. V.65. Iss.6. P.2334–2339.
30. Ginzburg N.S., Samsonov S.V., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Bogdashov A.A., Gachev I.G., Sergeev A.S., Rozental R.M. Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber. // *Physical Review Applied*. 2021. V.16. Iss.5. P.054045.
31. Idehara T., Pereyaslavets M., Nishida N., Yoshida K. and Ogawa I. Frequency Modulation in a Submillimeter-Wave Gyrotron. // *Physical Review Letters*. 1998. V.81. Iss.9. P.1973–1976.
32. Idehara T., Khutoryan E.M., Tatematsu Y., Yamaguchi Y., Kuleshov A.N., Dumbrajs O., Matsuki Y., Fujiwara T. High-Speed Frequency Modulation of a 460-GHz Gyrotron for Enhancement of 700-MHz DNP-NMR Spectroscopy. // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. V.36. Iss.9. P.819–829.
33. Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., Pereyaslavets M., Nishida N. and Yoshida K. Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (Gyrotron FU series) as submillimeter wave radiation sources. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1999. V.27. Iss.2. P.340–354.
34. Chang T.H., Idehara T., Ogawa I., Agusu L. and Kobayashi S. Frequency tunable gyrotron using backward-wave components. // *Journal of Applied Physics*. 2009. V.105. Iss.6. P.063304.
35. Klauder J.R., Price A.C., Darlington S. and Albersheim W.J. The theory and design of chirp radars. // *Bell System Technical Journal*. 1960. V.39. P.745–808.
36. Klauder J.R. The Design of Radar Signals Having Both High Range Resolution and High Velocity Resolution // *Bell System Technical Journal*. 1960. V.39. P.809–820.
37. Mims W.B. The detection of chirped radar signals by means of electron spin echoes. // *Proceedings of the IEEE*. 1963. V.51. Iss.8. P.1127–1134.
38. Giordmaine J., Duguay M. and Hansen J. Compression of optical pulses. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1968. V.4. Iss.5. P.252–255.

39. Belov Y.N., Chirkov A.V., Denisov G.G., Efimov Y.V., Ereemeev A.G., Litvak A.G., Malygin V.I., Miasnikov V.E., Popov L.G., Roy I.N., Sokolov E.V., Soluyanov E.A., Tai E.M., Usachev S.V. Completion phase of Russian gyrotron system development for ITER. // Proceedings of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 25–30 September 2016. Copenhagen, Denmark. P.1–2.
40. Glyavin M.Yu., Denisov G.G. Development of high power THz band gyrotrons and their applications in physical research. // Proceedings of 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 27 August – 1 September 2017. Cancun, Mexico. P.1–2.
41. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. // Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany. 2017. KIT Scientific Reports 7750.
42. Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K. and Tran M.Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive. // Nuclear Fusion. 2019. V.59. Iss.7. P.073001.
43. Kariya T., Minami R., Imai T., Okada M., Motoyoshi F., Numakura T., Nakashima Y., Idei H., Onchi T., Hanada K., Shimozuma T., Yoshimura Y., Takahashi H., Kubo S., Oda Y., Ikeda R., Sakamoto K., Ono M., Nagasaki K., Eguchi T. and Mitsunaka Y. Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices. // Nuclear Fusion. 2019. V.59. Iss.6. P.066009.
44. McDermott D.B., Marshall T.C., Schlesinger S.P., Parker R.K. and Granatstein V.L. High-Power Free-Electron Laser Based on Stimulated Raman Backscattering. // Physical Review Letters. 1978. V.41. Iss.20. P.1368–1371.
45. Chu T.S., Hartemann F.V., Danly B.G. and Temkin R.J. Single-mode operation of a Bragg free-electron maser oscillator. // Physical Review Letters. 1994. V.72. Iss.15. P.2391–2394.
46. Kehs R.A., Carmel Y., Granatstein V.L. and Destler W.W. Free electron laser pumped by a powerful traveling electromagnetic wave. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1990. V.18. Iss.3. P.437–446.
47. Chen J., Wang M.C., Wang Z., Lu Z., Zhang L. and Feng B. Study of Raman free-electron laser oscillator with Bragg reflection resonators. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1991. V.27. Iss.3. P.488–495.
48. Danly B.G., Hartemann F.V., Chu T.S., Legorburu P., Menninger W.L., Temkin R.J., Faillon G., Mourier G. Long-pulse millimeter-wave free-electron laser and cyclotron autoresonance maser experiments. // Physics of Fluids B: Plasma Physics. 1992. V.4. Iss.7. P.2307–2314.
49. Zohm H., Thumm M. On the use of step-tuneable gyrotrons in ITER. // Journal of Physics: Conference Series. 2005. V.25. P.274–282.
50. Namba T. Precise measurement of positronium. // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2012. V.2012. Iss.1. P.04D003.

51. Yamazaki T., Miyazaki A., Suehara T., Namba T., Asai S., Kobayashi T., Saito H., Ogawa I., Idehara T. and Sabchevski S. Direct Observation of the Hyperfine Transition of Ground-State Positronium. // *Physical Review Letters*. 2012. V.108. Iss.25. P.253401.

52. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Self-Induced transparency and electromagnetic pulse compression in a plasma or an electron beam under cyclotron resonance conditions. // *Physical Review Letters*. 2010. V.105. Iss.26. P.265001.

53. Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Kocharovskaya E.R., Zaslavsky V.Yu. Conversion of Electromagnetic Wave into a Periodic Train of Solitons under Cyclotron Resonance Interaction with Backward Beam of Unexcited Oscillators. // *Physical Review Letters*. 2014. V.113. Iss.14. P.143901.

54. Ginzburg N.S., Zotova I.V. and Sergeev A.S. Self-induced transparency, compression, and stopping of electromagnetic pulses interacting with beams of unexcited classical oscillators. // *JETP*. 2011. Vol.113. Iss.5. P.772–780.

55. Ginzburg N.S., Zotova I.V., Kocharovskaya E.R., Sergeev A.S., Zheleznov I.V. and Zaslavsky V.Yu. Self-Induced Transparency Solitons and Dissipative Solitons in Microwave Electronic Systems. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021. V.63. Iss.9–10. P.716–741.

56. Ginzburg N.S., Zotova I.V., Cross A.W., Phelps A.D.R., Yalandin M.I. and Rostov V.V. Generation, Amplification, and Nonlinear Self-Compression of Powerful Superradiance Pulses. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013. V.41. Iss.4. P.646–660.

57. Zotova I., Fedotov A., Sergeev A. Manuilov V., Rozental R., Zaslavsky V., Bratman V., Ginzburg N. Mechanisms of Intense Pulses Generation in Gyrodevices. // *Proceedings of 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*. 28 April – 1 May 2019. Busan, Korea. P.1–2.

58. Zotova I.V., Ginzburg N.S., Fedotov A.E., Rozental R.M., Zaslavskiy V.Yu., Semenov E.S., Sergeev A.S. Periodical pulse generation under cyclotron resonance interaction with amplifying and absorbing electron beams. // *Proceedings of IV International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2020)*. 24–26 August 2020. Tomsk, Russia. P.37.

### **Публикации автора по теме диссертационной работы**

1A. Yurovskiy L.A., Zotova I.V., Ginzburg N.S. Vilkov M.N., Rozental R.M., Samsonov S.V., Abubakirov E.B. Production of Multi-Gigawatt Sub-Nanosecond Microwave Pulses by the Method of Chirped-Pulse-Amplification. // *IEEE Electron Device Letters*. 2021. V.42. Iss.3. P.426–429.

2A. Ginzburg N.S., Yurovsky L.A., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Yakovlev I.V. Stretching, Amplification, and Compression of Microwave Pulses Using Helically Corrugated Waveguides. // *Radiophysics and Quantum Elelectronics*. 2019. V.62. Iss.7–8. P.472–480.

3A. Yurovskiy L.A., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Vilkov M.N., Samsonov S.V. and Sergeev A.S. Frequency modulation, amplification and compression of microwave pulses in a system with helically corrugated waveguides as dispersive elements. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V.1400. Iss. 4. P.044006.

4A. Zotova I.V., Ginzburg N.S., Yurovskiy L.A., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Bogdashev A.A. Microwave-Band Chirped Pulse Amplification Technique Based on a System of Helically Corrugated Waveguides. // *Proceedings of 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. 1–6 September 2019, Paris, France. P.1.

5A. Yurovskiy L., Zotova I., Ginzburg N., Vilkov M., Rozental R., Samsonov S., Abubakirov E. Microwave CPA-Amplifier with Multi-Gigawatt Ultrashort Output Pulses. // *Proceedings of IVEC 2021*. 27–30 April 2021. Virtual event. Netherlands. P.1–2.

6A. Юровский Л.А., Зотова И.В., Абубакиров Э.Б., Розенталь Р.М., Сергеев А.С., Гинзбург Н.С. Формирование сверхмощных микроволновых импульсов в системах стретчер-усилитель-компрессор // *Журнал радиоэлектроники*. 2020. Вып.12. С.1–11.

7A. Юровский Л.А., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Назаровский А.В. Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов. // *Труды XII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн*, 28 Февраля – 4 Марта 2022, Нижний Новгород. С.36.

8A. Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Юровский Л.А., Вилков М.Н., Сергеев А.С. Формирование мощных микроволновых импульсов путем предварительного растяжения, последовательного усиления спектральных компонент и последующей компрессии. // *Труды XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн*. 25–28 Февраля 2019. Нижний Новгород. С.80.

9A. Юровский Л.А., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Вилков М.Н., Сергеев А. С. Частотная модуляция, усиление и компрессия импульсов микроволнового диапазона в системе со спирально гофрированными волноводами в качестве диспергирующих элементов. // *Труды Международной конференции PhysicA.SPb/2019*. 22–24 Октября 2019. Санкт-Петербург. С.355–356.

10A. Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Юровский Л.А., Сергеев А.С., Самсонов С.В. Компрессия усиленных чирпированных микроволновых импульсов. // *Труды 24-ой Нижегородской сессии молодых ученых*. 12–14 Ноября 2019. Нижний Новгород. С.127.

11A. Yurovskiy L.A., Nazarovskiy A.V. and Ginzburg N.S. Generation of Short Microwave Pulses by Compression of Chirped Signals Obtained by Raman Backscattering on Electron Beam With Variable Energy. // *IEEE Electron Device Letters*. 2021. V.42. Iss.10. P.1548–1550.

12A. Ginzburg N.S., Yurovskii L.A., Zotova I.V., Sergeev A.S. Frequency Conversion of High-Power Gyrotron Radiation under Conditions of Raman Backscattering on an Auxiliary Electron Beam. // *Technical Physics Letters*. 2019. V.45. Iss.2. P.134–137.

13A. Yurovskiy L., Ginzburg N., Nazarovskiy A., Sergeev A., Zotova I. Chirping of Gyrotron Radiation in the Process of Raman Backscattering on Electron Beam with Variable Voltage for Subsequent Pulse Compression. // *Proceedings of IVEC 2021*. 27–30 April 2021. Virtual event. Netherlands. P.1–2.

14A. Yurovskiy L.A., Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zotova I.V. Transformation of High-Power Gyrotron Output Radiation Frequency under Conditions of Raman Scattering on Additional Electron Beam. // *EPJ Web of Conferences*. 2018. V.195. P.01021.

15A. Malkin A.M., Ginzburg N.S., Yurovskiy L.A., Sergeev A.S., Zotova I.V. Gyrotron radiation frequency tuning in the regime of Raman backscattering on intense electron beam. // *Proceedings of EAPPC & BEAMS 2018*. 16–20 September 2018. Changsha, China. P.437–440.

16A. Ginzburg N.S., Yurovskiy L.A., Nazarovskiy A.V., Sergeev A.S., Zotova I.V. Generation of Terahertz Superradiance Pulses under Stimulated Scattering of Laser Radiation by an Associated High-Current Relativistic Electron Beam. // *Technical Physics Letters*. 2020. V.46. Iss.12. P.1162–1166.

17A. Ginzburg N., Yurovskiy L., Nazarovskiy A., Zotova I. Terahertz-Range Superradiant Generation In The Process Of Laser Pulses Scattering With Frequency Down-Conversion. // *Proceedings of 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. 29 August – 3 September 2021. Virtual Event. Chengdu, China. P.1.

18A. Ginzburg N.S., Yurovskiy L.A., Sergeev A.S., Zotova I.V. and Malkin A.M. Formation of microwave frequency-chirped solitons of self-induced transparency under conditions of cyclotron resonance absorption. // *Physical Review E*. 2021. V.104. Iss.3. P.034218.

19A. Sergeev A.S., Yurovskiy L.A., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Zheleznov I.V., Rozental R.M., Rostuntsova A.A., Ryskin N.M. Entrainment, Stopping, and Transmission of Microwave Solitons of Self-Induced Transparency in Counter-Propagating Magnetized Electron Beam. // *Chaos*. 2022. V.32. Iss.5. P.053123.

20A. Юровский Л.А., Сергеев А.С., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Железнов И.В. Формирование солитонов самоиндуцированной прозрачности при циклотронно-резонансном взаимодействии излучения с прямолинейным электронным пучком. // *Труды XX Международной конференции Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии*, 23–27 ноября 2020. Нижний Новгород. С.424–425.