



На правах рукописи

ЮРОВСКИЙ Лев Александрович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УСИЛЕНИЯ
КОРОТКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ**

1.3.4 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Гинзбург Наум Самуилович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Куркин Семен Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор АНО ВО "Университет Иннополис" (г. Казань);

Рожнёв Андрей Георгиевич, кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУ им. Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов)

Ведущая организация: ФГБУН «Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук» (г. Екатеринбург).

Защита состоится «5» декабря 2022 года в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 при ИПФ РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПФ РАН <https://ipfran.ru/>

Автореферат разослан «1» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Формулировка и актуальность проблемы

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. Поскольку возможности повышения пиковой мощности коротких импульсов за счет увеличения энергетики электронных пучков ограничены, значительное число исследований 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 ступков, движущихся в периодических замедляющих структурах [1–4]. В Ка-диапазоне, в режимах генерации одиночных импульсов, источники СИ обеспечивают гигаваттный уровень пиковой мощности [3], а в режимах периодического следования импульсов с частотой до 1 кГц [4], 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 мультигигаваттного уровня пиковой мощности используются подходы, основанные на применении сверхразмерных замедляющих структур, а также когерентного суммирования импульсов СИ от нескольких независимых источников.

Альтернативный подход, развиваемый в настоящей работе, может быть основан на так называемом методе усиления chirпированных импульсов (англ. Chirped Pulse Amplification, CPA), который широко используется в физике лазеров и позволяет усиливать лазерные импульсы фемтосекундной длительности до петаваттного уровня мощности [5, 6]. 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 мультимегаваттной или

мультигигаваттной пиковой мощностью, в зависимости от типа и энергетических характеристик усилителя. Благодаря универсальности данного метода возможно его применение для усиления субгигаваттных 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 [7], целесообразно использование слабoreлятивистской винтовой giro-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 [8] или напряженности магнитного поля [9], 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 импульсов, перспективной представляется схема «генератор – частотный модулятор – компрессор» [10], 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 или длинноимпульсном режиме генерации [11]. 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 слабoreлятивистском электронном пучке с переменной энергией частиц. Следует отметить, что процессы вынужденного рассеяния волн широко исследовались ранее применительно к лазерам на свободных электронах (ЛСЭ) [12], 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-модули-

рованного 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, а также для спектроскопических приложений.

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 [13, 14, 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 определяются скоростью их распространения и частотным сдвигом относительно циклотронного резонанса. В таких процессах возможна ситуация, когда трансформация исходного импульса в солитон сопровождается 3-кратной компрессией с сопутствующим укорочением импульса.

Целью диссертационной работы является:

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 мультимегаваттной пиковой мощности и релятивистских черенковских усилителей для формирования импульсов мультигигаваттной пиковой мощности.

2. Анализ возможности реализации частотного модулятора на основе режима вынужденного обратного рассеяния излучения на попутном слабо-релятивистском 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.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Метод усиления чирпированных импульсов, включающий предварительное растяжение исходного импульса в стретчере, последовательное усиление спектральных компонент в широкополосном 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 винтовые гиро-ЛБВ для формирования импульсов мультимегаваттной пиковой мощности или релятивистские черенковские усилители для формирования импульсов мультигигаваттной 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, опи-

сываются двухпараметрическими аналитическими решениями. При этом амплитуда и длительность солитона определяются его скоростью и сдвигом несущей частоты солитона относительно частоты циклотронного резонанса.

Научная новизна

– На основе пространственно-временного подхода продемонстрирована возможность реализации метода усиления chirпированных импульсов (CPA-метода) в СВЧ-электронике с релятивистской черенковской ЛБВ в качестве усилителя для формирования мультигигаваттных коротких импульсов и с винтовой гиро-ЛБВ для формирования мультимегаваттных 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 гиро-частоты 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, сопровождающейся трехкратным увеличением пиковой мощности при формировании солитона самоиндуцированной прозрачности.

Практическая значимость диссертационной работы

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.

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1а–3а, 6а, 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.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 11 тезисов докладов.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Все приведенные в диссертации и вошедшие в работы [1а–20а] основные результаты получены лично соискателем 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. Численное моделирование в рамках усред-

ненных моделей осуществлено соискателем с помощью оригинальных численных кодов, написанных автором, а также программ, разработанных А.С. Сергеевым и А.В. Назаровским.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, приложения, заключения, списка литературы и списка трудов автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 132 страницы, включая 52 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 123 наименования, список трудов по теме диссертации состоит из 9 статей в рецензируемых журналах и 11 публикаций в материалах конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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 chirпированных 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 (chirпированием) 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) (рис. 1).

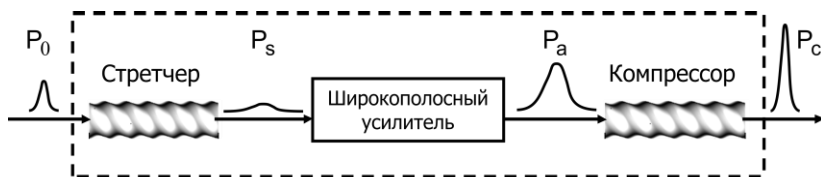


Рис. 1. Схема микроволнового CPA-усилителя со спирально гофрированными волноводами в качестве стретчера и компрессора

В разделе 1.1 в качестве дисперсионных элементов рассматриваются волноводы с многозаходной винтовой гофрировкой, в которой в условиях брэгговского резонанса осуществляется связь бегущей и квазикритической парциальных мод цилиндрического волновода. Эволюция формы импульса

в такой системе описывается на основе уравнений связанных парциальных мод [2a]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 a}{\partial z^2} - 2i \frac{\kappa_A}{c} \frac{\partial a}{\partial t} + 2\alpha \kappa_A^2 b - \frac{i \kappa_A^2}{Q_{ohm}} a &= 0, \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{gr}^B} \frac{\partial}{\partial t} \right) b - i(\bar{h} - h_0) b + i \frac{\kappa_A^2}{h_0} \alpha a &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь a и b – нормированные амплитуды квазикритической и бегущей парциальных мод, α – параметр связи волн на гофрированной поверхности волновода, Q_{ohm} – параметр омических потерь, $V_{gr}^B = h_0 c / \kappa_A$ – групповая скорость бегущей волны B , $\kappa_A = \omega_A / c$, ω_A – частота квазикритической моды, выбранная за несущую частоту, $h_0 = h_B(\omega_A)$ – продольное волновое число бегущей парциальной волны B на несущей частоте, \bar{h} – продольная компонента брэгговского вектора периодической решетки. Уравнения (1) дополняются безотражательными граничными условиями для квазикритической моды A и граничными условиями для бегущей моды B , соответствующими непрерывности потока мощности излучения при его передаче из одной секции в другую. Дисперсионные характеристики нормальных волн в волноводе с винтовой гофрировкой могут быть получены из уравнений (1) при записи решения в виде $a, b \sim \exp(i\Omega t - ihz)$:

$$\left(\Omega - \frac{h^2 c^2}{2\omega_A} \right) \left(\Omega - V_{gr}^B (h + \bar{h} - h_0) \right) = \alpha^2 \omega_A^2, \quad (2)$$

где $\Omega = \omega - \omega_A$ – отстройка частоты излучения от несущей частоты, h – продольное волновое число.

В работе рассмотрен ряд методов оптимизации параметров диспергирующих элементов 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 с учетом закона дисперсии, определяемого уравне-

нием (2), 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 (рис. 2).

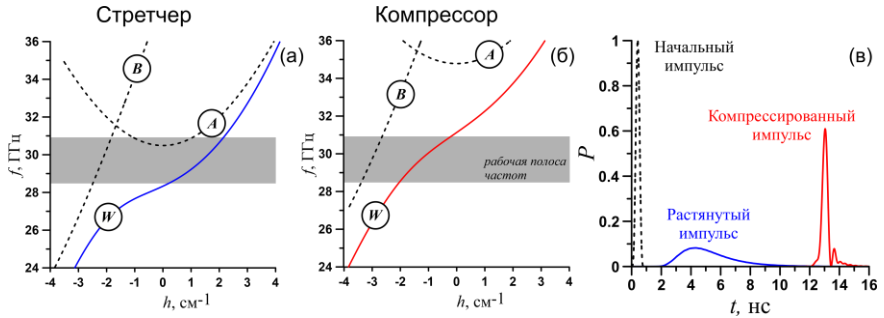


Рис. 2. Дисперсионные кривые нормальной волны W в стретчере (а) и компрессоре (б), обладающие дисперсией противоположного знака в рабочей полосе частот; ν – мощность исходного (штрихованная кривая), растянутого (синяя кривая) и компрессированного (красная кривая) импульсов после прохождения стретчера и компрессора длиной 100 см с оптимальными параметрами гофрировки

В разделе 1.2 рассмотрена возможность реализации СРА-схемы для повышения мощности импульсов сверхизлучения при использовании в качестве усилителя релятивистской черенковской ЛБВ Ка-диапазона [1а]. Высокий уровень пиковой мощности импульсов СИ делает невозможным их непосредственное усиление, что обусловлено эффектами насыщения при избыточно большом входном сигнале. Однако благодаря предварительному растяжению подобного импульса в стретчере и понижению пиковой мощности появляется возможность усиления отдельных спектральных компонент. При этом проведенный анализ амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик релятивистских ЛБВ показывает возможность достижения необходимого коэффициента усиления в рабочей полосе частот при малом паразитном набеге фаз (менее $\pi/2$). Оптимизация параметров стретчера и компрессора на основе метода, описанного в **разделе 1.1**, для исходного импульса СИ с длительностью 350 пс на частоте ~ 30 ГГц показывает возможность растяжения указанного импульса более чем в 10 раз. При этом в зависимости от его пиковой мощности рассматриваемая черенковская ЛБВ работает либо в линейном режиме (пиковая мощность входного сигнала < 100 МВт), либо в режиме нелинейного насыщения (пиковая мощность входного сигнала < 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 мощ-

ность импульсов на выходе СРА-схемы может достигать 8 ГВт, что соответствует коэффициенту конверсии (отношения пиковой мощности усиленного импульса к мощности используемого электронного пучка) ~ 4 (рис. 3).

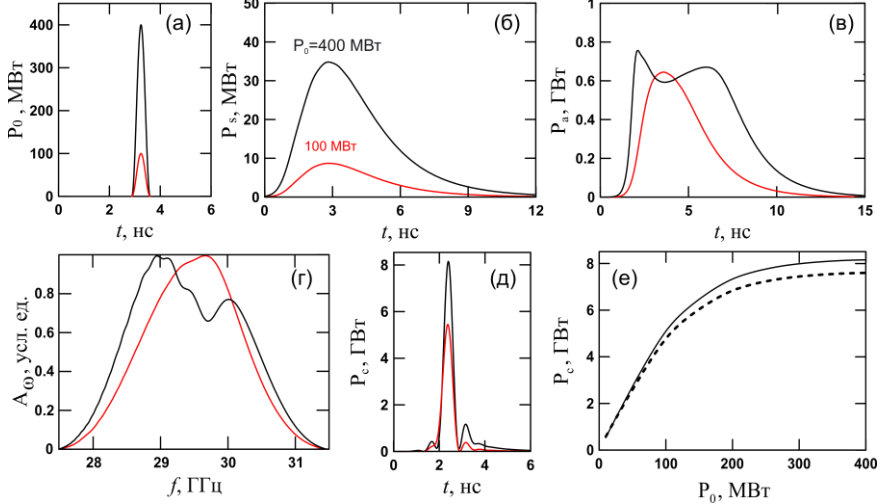


Рис. 3. Усиление импульсов СИ длительностью 360 пс, мощностью 100 МВт (красные линии) и 400 МВт (черные линии) в СРА-схеме на основе релятивисткой ЛБВ: *a* – профиль импульса на входе в систему, *б* – на выходе из стретчера, *в* – на выходе ЛБВ и *д* – на выходе компрессора. Спектры сигналов после усиления в ЛБВ, работающей в режиме линейного (красная кривая) и нелинейного (черная кривая) усиления (*е*), и зависимость пиковой мощности импульса на выходе СРА-схемы от мощности импульса на входе без (сплошная линия) и с учетом омических потерь (пунктирная линия) (*е*).

В разделе 1.3 рассматривается возможность реализации СРА-схемы с использованием винтовой giro-ЛБВ в качестве усилителя [2а, 3а]. Такой усилитель имеет достаточно большую и практически постоянную групповую скорость в широкой (10–20%) полосе частот, что позволяет обеспечить эффективное резонансное взаимодействие с винтовым электронным пучком на гармониках giroчастоты при выполнении равенства между групповой скоростью рабочей волны и поступательной скоростью частиц. Моделирование процесса растяжения и компрессии микроволнового импульса проводилось на основе системы уравнений (1). При описании giroусилителя эта система дополнялась усредненными уравнениями движения частиц и представлялась в виде

$$\frac{\partial^2 a}{\partial z^2} - 2i \frac{\kappa_A}{c} \frac{\partial a}{\partial t} = 2\alpha \kappa_A^2 b + \frac{i\kappa_A^2}{Q_{ohm}} a + i \frac{4eI_b}{\pi m c^3} \frac{\kappa_A^2}{\beta_{||0} \sqrt{N_A}} \frac{s^s}{2^s s!} \int_0^{2\pi} p_+^s d\theta_0,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{gr}^B} \frac{\partial}{\partial t} \right) b - i(\bar{h} - h_0)b = i \frac{\kappa_A^2}{h_0} \alpha a ,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{||0}} \frac{\partial}{\partial t} \right) p_+ + i \frac{\kappa_A}{2\beta_{||0}} \frac{p_+}{s} \left(\Delta + |p_+|^2 - \beta_{\perp 0}^2 \right) = \frac{s^s}{2^s s! \beta_{||0} \sqrt{N_A}} a \left(p_+^* \right)^{s-1} . \quad (3)$$

Здесь N_A – норма критической волны A , $V_{||0} = c\beta_{||0}$ и $V_{\perp 0} = c\beta_{\perp 0}$ – начальные продольная и поперечная скорости электронов, Δ – расстройка циклотронного синхронизма, I_b – ток электронного пучка, s – номер рабочей гармоники гирочастоты.

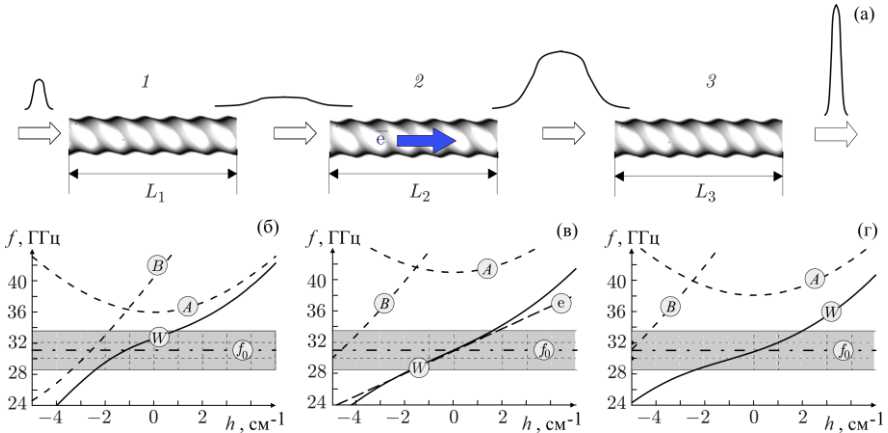


Рис. 4. Принципиальная схема реализации СРА-метода на основе винтовой гиролБВ (а). Дисперсионные характеристики парциальных волн в волноводах с многозаходной винтовой гофрировкой (А и В), нормальной волны (W) и электронного пучка e в стретчере (б), усилителе (в) и компрессоре (г). Закрашенная область соответствует рабочей полосе частот с центральной частотой f_0

Моделирование указанной СРА-схемы показало возможность усиления 3 кВт импульса длительностью 200 пс на частоте ~ 30 ГГц до 4 МВт при использовании усилителя с мощностью пучка 700 кВт, что соответствует коэффициенту конверсии ~ 6 .

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 (рис. 5, а), благодаря которой сигнальная волна возбуждается в отсутствие резонатора,

что позволяет плавно изменять частоту генерируемого излучения при варьировании энергии электронов.

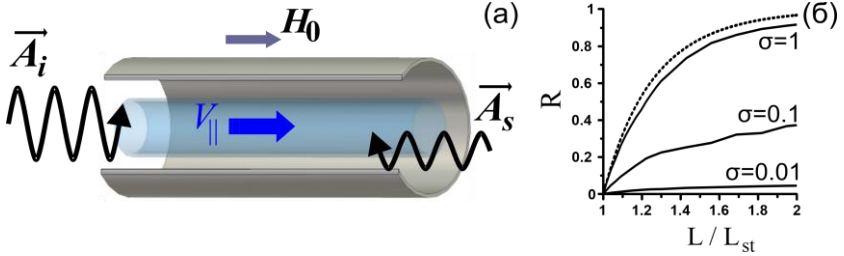


Рис. 5. Модель волноводного рассеяния высокочастотной попутной волны накачки на замагниченном электронном пучке в низкочастотную встречную волну (а) и зависимость квантового выхода R от длины пространства взаимодействия по результатам моделирования системы уравнений (4) при высокой плотности пучка для различных значений параметра истощения накачки σ (сплошные кривые) (б). Пунктир – то же в рамках модели трехволнового распада (5)

В разделе 2.1 рассматривается модель, в которой волна накачки рассеивается в сигнальную волну на трубчатом бесконечно тонком электронном потоке в цилиндрическом волноводе [12а]. Пучок фокусируется нерезонансным продольным магнитным полем. Предполагается, что обе волны имеют TE -поляризацию. Получена самосогласованная система уравнений, включающая уравнения для амплитуд волн сигнала и накачки, а также усредненные уравнения движение электронов в поле комбинационной волны с учетом влияния собственных полей пространственного заряда:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_i}{\partial Z} &= i\sigma\rho_1 a_s, & \left(-\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau}\right) a_s &= i\rho_1^* a_i, \\ \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau}\right)^2 \theta_c &= \text{Im} \left[a_i a_s^* e^{i\theta_c} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Q_k^2}{k} \rho_k e^{ik\theta_c} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь a_i и a_s – нормированные амплитуды волн сигнала и накачки, ρ_k – амплитуды гармоник модуляции плотности электронного потока, θ_c – фаза электронов относительно комбинационной волны, Q_k – нормированный параметр пространственного заряда.

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 (4) приведена к уравнениям трехволнового распада:

$$\frac{\partial m_b}{\partial Z} + \frac{\partial m_b}{\partial \tau} = m_i m_s, \quad \frac{\partial m_i}{\partial Z} = -m_b m_s, \quad -\frac{\partial m_s}{\partial Z} + \frac{\partial m_s}{\partial \tau} = m_b m_i, \quad (5)$$

где m_i , m_s , m_b – амплитуды волн накачки, сигнала и БВПЗ соответственно. На основе данной системы аналитически получена величина квантового выхода – числа квантов накачки, преобразованных в кванты сигнала (рис. 5, б).

В рамках полной модели (4) могут быть выделены два механизма насыщения роста амплитуды сигнальной волны (рис. 6). Первый механизм связан с истощением накачки и описывается уравнениями трехволнового распада (5). В рамках второго механизма истощением накачки можно пренебречь, и насыщение роста амплитуды сигнальной волны обусловлено нелинейными эффектами в движении электронов.

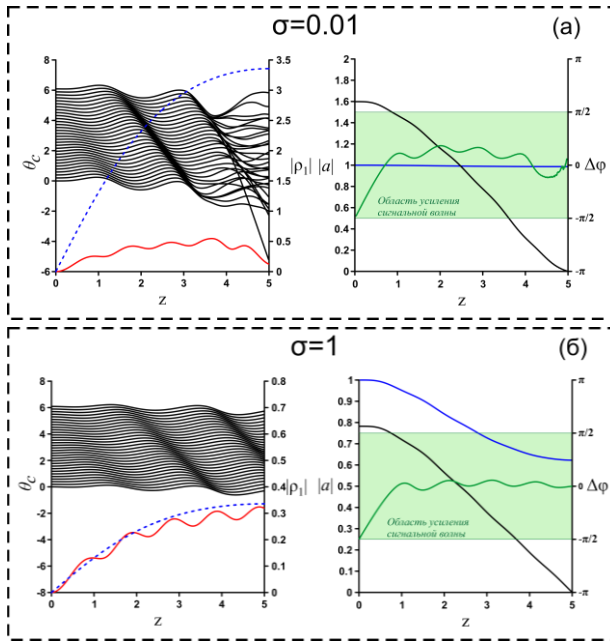


Рис. 6. Зависимость от продольной координаты Z фазы электронов относительно комбинационной волны θ_c (черные кривые), амплитуды модуляции плотности ρ_1 (красные кривые), амплитуды накачки (синие кривые), сигнала (черные кривые) и относительной фазы $\Delta\varphi$ (зеленые кривые). Синие штрихованные кривые описывают амплитуды волн пространственного заряда, полученные в рамках модели трехволнового распада; a – малый коэффициент истощения $\sigma = 0.01$ – механизм насыщения обусловлен нелинейными эффектами в движении электронов; b – большой коэффициент истощения накачки: $\sigma \sim 1$ – механизм насыщения обусловлен истощением накачки

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. Показано, что при рассеянии низших волноводных мод $TE_{1,1}$ или $TE_{0,1}$ накачки в аналогичные моды сигнала при длине области рассеяния ~ 50 см коэффициент трансформации по мощности может достигать 70%, а ширина полосы перестройки $\sim 10\%$. В то же время оценки рассеяния на электронном пучке с аналогичными параметрами для 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 разделе 2.2 проводится анализ схемы «гиротрон – частотный модулятор – компрессирующая линия» (рис. 7), позволяющей формировать мощные короткие микроволновые импульсы [11а]. В качестве компрессора рассматривается волновод с пятизаходной винтовой гофрировкой стенок. Для достижения максимальной пиковой мощности использован метод оптимизации, основанный на итерационной процедуре решения прямой и обратной задач и позволяющий получить оптимальные параметры диспергирующей линии (компрессора) в совокупности с оптимальной зависимостью энергии электронов от времени в частотном модуляторе. На этой основе показана возможность формирования короткого импульса длительностью 0.6 нс,

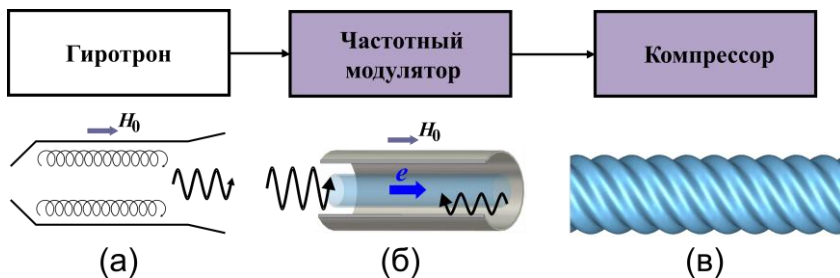


Рис. 7. Схема генератора коротких СВЧ-импульсов, состоящая из трех частей: *a* – источник микроволновой волны накачки; *b* – частотный модулятор на основе вынужденного обратного рассеяния; *в* – волновод с многозаходной винтовой гофрировкой, выполняющий роль компрессора

мощностью 2.8 МВт при использовании гиротрона мощностью 50 кВт на частоте 35 ГГц в качестве накачки и частотного модулятора, рассмотренного в **разделе 2.1**. Таким образом, пиковая мощность выходного компрессируемого импульса более чем в 50 раз превышает мощность исходного гиротронного излучения. Отмечена возможность генерации периодической последовательности компрессируемых 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) режимах.

В разделе 2.3 рассматривается возможность генерации терагерцовых импульсов сверхизлучения при вынужденном обратном рассеянии лазерных импульсов на попутном сильнооточном релятивистском электронном пучке [16a]. Показано, что в пренебрежении 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 [15, 16]. 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, при использовании в качестве накачки лазерных импульсов, генерируемых в установке «ИСКРА-5». В качестве источника электронов рассматривается как релятивистские электронные пучки, получаемые на основе взрывной эмиссии с длительностью до 100 нс, что при рассматриваемых временных интервалах позволяет считать их квазинепрерывными, так и пучки от фотоинжекторов, представляющие собой периодическую последовательность пикосекундных электронных сгустков. На основе моделирования показана возможность генерации импульсов на частоте 3 ТГц, длительностью 30 пс и мощностью до 600 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 (рис. 8) последний можно представить как набор неизохронных невозбужденных классических осцилляторов, где неизохронность вызвана релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии. В таких условиях, при малой интенсивности па-

дающей 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.

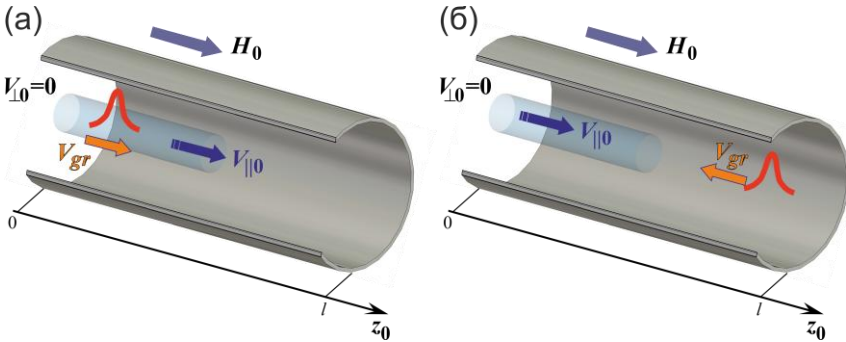


Рис. 8. Модель циклотронно-резонансного взаимодействия электромагнитного импульса в волноводе с первоначально прямолинейным попутным (а) и встречным (б) электронным пучком

В разделе 3.1 получена самосогласованная система уравнений, описывающая циклотронно-резонансное взаимодействие короткого микроволнового импульса как с попутным (знак +), так и со встречным (знак -) первоначально прямолинейным электронным потоком [13]:

$$\pm \frac{\partial a}{\partial Z} + \frac{\partial a}{\partial \zeta} = -p, \quad \frac{\partial p}{\partial Z} + ip|p|^2 = a, \quad (6)$$

Здесь a и p – нормированные амплитуды микроволнового излучения и поперечного импульса электронов. Предполагается, что микроволновый 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 разделе 3.2 аналитически найдено двухпараметрическое солитонное решение:

$$\hat{a}(Z, \tau) = \sqrt{s^3 \left(\frac{4 \left(\frac{1 - \sin^2 \chi_0}{\sin \chi_0 + \cosh [2s^{-1} (Z - U\tau) \cos \chi_0]} \right)}{s^3} \right)}, \quad (7)$$

где $\sin \chi_0 = \Omega / 2s$, $s = \sqrt{U \mp 1}$, U – скорость солитона, Ω – сдвиг несущей частоты солитона относительно циклотронного резонанса. 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 U и сдвигом частоты Ω . Таким образом, по своим характеристикам солитонное решение для микроволнового СИП-солитона близко к солитонам, являющимся решением нелинейного уравнения Шредингера.

В разделе 3.3 проводится моделирование самосогласованной системы уравнений, полученной **в разделе 3.1**, с граничными условиями, соответствующими попутному распространению импульса и электронов [18a]. Демонстрируется аналогия с оптическим эффектом самоиндуцированной прозрачности (рис. 9), а именно, смена циклотронного поглощения образова-

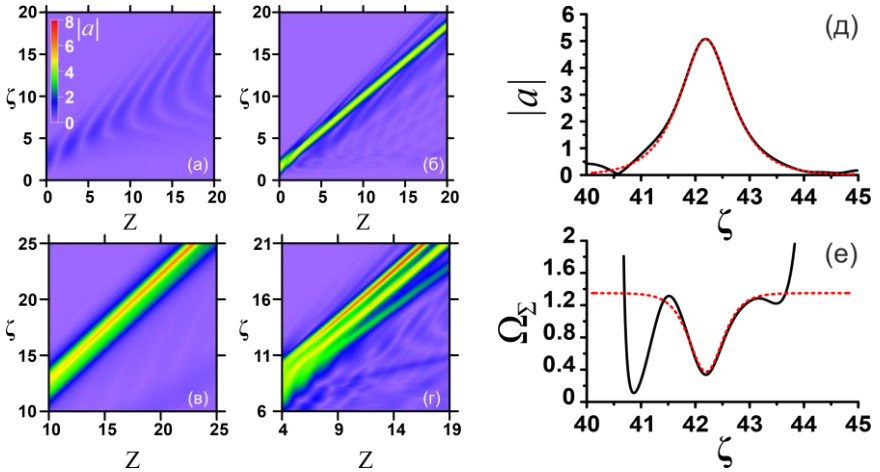


Рис. 9. Характерные режимы взаимодействия электромагнитного импульса с первоначально прямолинейным попутным электронным пучком: *a* – циклотронно-резонансное поглощение; *b* – эффект микроволновой самоиндуцированной прозрачности с образованием солитона; *c* – формирование СИП-солитона, сопровождающееся компрессией падающего э/м импульса; *d* – распад исходного импульса на несколько солитонов. Сравнение профилей микроволнового СИП-солитона (*d*) и частотного чирпа (*e*), найденных при численном моделировании граничной задачи (черные сплошные кривые), с аналитическими решениями (красные пунктирные кривые)

нием микроволнового СИП-солитона при повышении энергии падающего импульса. При дальнейшем повышении энергии возникает эффект нелинейной самокомпрессии, к которому, при превышении определенного уровня энергии в импульсе, добавляется формирование дополнительных солитонов (солитонов-сателлитов), обладающих различными амплитудами, длительностями, скоростями и частотными чирпами. Показано соответствие аналитических и численных результатов для профилей микроволновых СИП-солитонов.

В разделе 3.4 проводится моделирование формирования микроволновых СИП-солитонов в условиях встречного распространения падающего импульса и электронов [19a]. 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 (рис. 10). 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.

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 **разделу 3.3** проводится сравнение характеристик, прошедших и увлеченных пучком микроволновых СИП-солитонов, полученных в результате моделирования и восстановленных на основе аналитических решений.

Кроме того, 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.

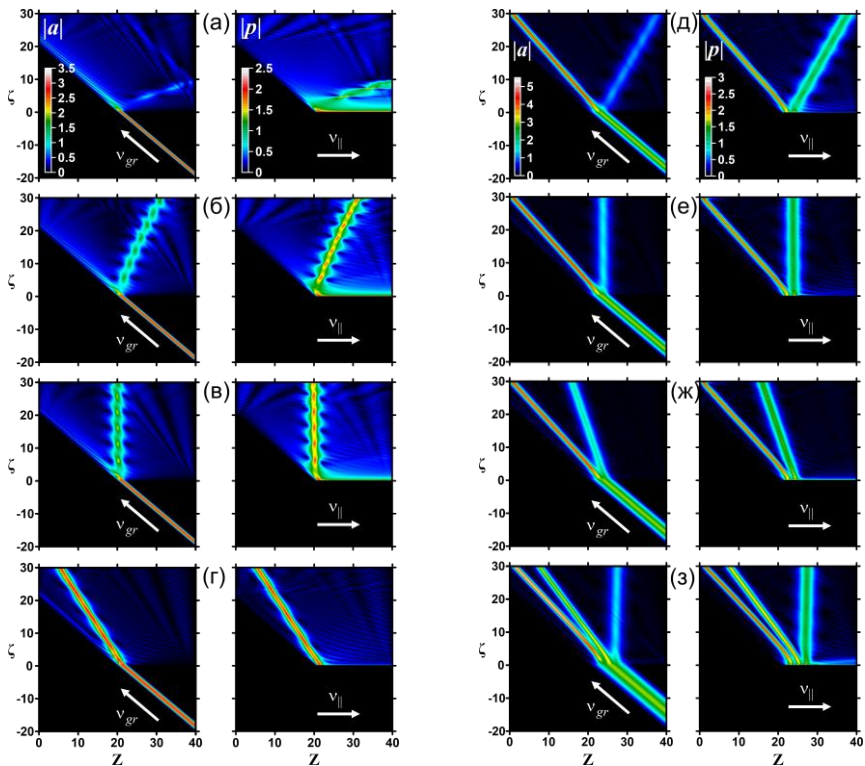


Рис. 10. Режим взаимодействия со встречной волной. Эволюция амплитуды микро-волнового импульса $|a|$ (левый столбец) и поперечного импульса электронов $|p|$ (правый столбец): a – циклотронное поглощение; $б$ – $г$ – образование солитонов 1-го порядка, включая: $б$ – увлечение слабознергетического солитона электронным потоком; $в$ – остановку солитона; $г$ – распространение высокоэнергетического солитона по направлению невозмущенной групповой скорости; $д$ – $з$ – распад высокоэнергетического падающего импульса на несколько солитонов первого и более высоких порядков, включая: $д$ – увлечение солитона 2-го порядка; $е$ – остановка солитона 2-го порядка; $ж$ – распространение солитона 2-го порядка в направлении невозмущенной групповой скорости; $з$ – компрессия солитона 2-го порядка и образование солитона 3-го порядка со скоростью, близкой к нулю

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показана возможность применения в СВЧ-электронике метода Chirped Pulse Amplification (CPA), который может быть реализован при использовании спирально-гофрированных волноводов в качестве стретчера и компрессора. Разработан метод оптимизации геометрических параметров волноводов, который позволяет реализовать растяжение импульса Кадиапазона более чем на порядок с последующим восстановлением формы с эффективностью, превышающей 80%. В качестве широкополосных усилителей могут быть использованы винтовые giro-ЛБВ для формирования импульсов мультимегаваттной пиковой мощности или релятивистские черенковские усилители для формирования импульсов мультигигаваттной пиковой мощности.

2. Показана возможность реализации частотного модулятора на основе вынужденного рассеяния волны накачки, попутной электронам, в сигнальную волну, распространяющуюся во встречном направлении. Вследствие развития абсолютной неустойчивости в отсутствие резонатора в такой системе возможно плавное изменение частоты генерируемого излучения в широких пределах (до 10%) при варьировании энергии электронов. При этом мощность излучения остается практически постоянной.

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, до 50 раз превышающей мощность используемого гиротрона.

4. Показана возможность генерации импульсов сверхизлучения (СИ) терагерцового диапазона при вынужденном обратном рассеянии лазерного импульса на попутном релятивистском электронном пучке. Исследована возможность использования как квазинепрерывного электронного пучка для генерации единичного мощного импульса СИ, так и последовательности электронных сгустков, эмитируемых с фотокаатода, для генерации импульсов СИ с периодом равным периоду следования сгустков.

5. Аналитически найдены обобщенные (двухпараметрические) решения, описывающие формирование солитонов самоиндуцированной прозрачности при циклотронно-резонансном взаимодействии микроволновых импульсов с первоначально прямолинейным электронным потоком, выступающим в роли пассивной нелинейной среды. Показано, что профиль и чирп (зависимость частоты от времени) определяются скоростью солитона и сдвигом его центральной частоты относительно циклотронного резонанса. Устойчивость полученных солитонных решений продемонстрирована на основе моделирования начальных и граничных задач.

Список цитированной литературы

1. *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.
2. *Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zheleznov I.V., Zotova I.V., Zaslavsky V.Yu., Boltachev G.Sh., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Ul'masculov M.R., Yalandin M.I.* Generation of Subterahertz Superradiance Pulses Based on Excitation of a Surface Wave by Relativistic Electron Bunches Moving in Oversized Corrugated Waveguides // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 117. Iss. 20. P. 204801.
3. *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.
4. *Luybutin S.K., Rukin S.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Slovikovskiy B.G., Ulmaskulov M.R., Yalandin M.I., Korovin S.D., 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.
5. *Strickland D., Mourou G.* Compression of amplified chirped optical pulses. // *Optics Communications*. 1985. V. 56. Iss. 3. P. 219–221.
6. *Danson C., Hillier D., Hopps N., Neely D.* Petawatt class lasers worldwide. // *High Power Laser Science and Engineering*. 2015. V. 3. P. E3.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *Giordmaine J., Duguay M. and Hansen J.* Compression of optical pulses. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1968. V. 4. Iss. 5. P. 252–255.

11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *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.
15. *Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A. V., Chefonov O. V., Ashitkov S. I., Agranat M. B. and Hauri C. P.* High efficiency THz generation in DSTMS, DAST and OH1 pumped by Cr:forsterite laser // *Optics Express*. 2015. V. 23. Iss. 4. P. 4573–4580.
16. *Kartner F.X., Huang S., Granados E., Huang W.R., Hong K., Zapata L.E.* High conversion efficiency, high energy terahertz pulses by optical rectification in cryogenically cooled lithium niobate // *Optics Letters*. 2013. V. 38. Iss. 5. P. 796–798.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 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 Electronics*. 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 // XII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн : тезисы докладов. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2022. 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 // XI всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн : тезисы докладов. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2022. 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-й 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., Yurovskiy 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. Под ред. проф. В.П. Гергеля. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2020. С. 424–425.

ЮРОВСКИЙ Лев Александрович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УСИЛЕНИЯ
КОРОТКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Автореферат

Подписано к печати 26.09.2022.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Палитра - НН,
603950, Н. Новгород, ул. Минина, 25а