

Вилков МН

На правах рукописи

ВИЛКОВ Михаил Николаевич

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
МОЩНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ
МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ
С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД**

01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2019

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, профессор, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Аржанников Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН» (г. Новосибирск);

Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский филиал ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН» (г. Саратов).

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

Защита состоится « 9 » декабря 2019 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.069.02 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 « 30 » октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,

 Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Формулировка и актуальность проблемы

В физике лазеров получил широкое применение механизм генерации ультракоротких импульсов (УКИ), основанный на синхронизации мод (англ. mode-locking) рабочего резонатора в процессе периодической модуляции его добротности [1-5]. При этом используются механизмы как активной, так и пассивной модуляции. В первом случае параметры резонатора модулируются внешним воздействием с периодом кратным времени прохождения светового импульса по резонатору (так называемая активная синхронизация мод). Во втором случае этот же эффект достигается с помощью просветляющегося поглотителя, устанавливаемого внутри резонатора (пассивная синхронизация мод). В качестве просветляющегося поглотителя (или нелинейного поглотителя) понимается элемент, который поглощает сигнал относительно малой амплитуды и практически без потерь пропускает сигнал относительно большой амплитуды.

Очевидно, что методы активной и пассивной синхронизации мод с целью генерации импульсов высокой амплитуды могут быть перенесены в СВЧ электронику [6-7]. Прежде всего, следует отметить, что метод активной синхронизации мод широко используется при реализации лазеров на свободных электронах терагерцевого и инфракрасного диапазонов. Его использование обусловлено характером работы ускорителей, формирующих ступки электронов пикосекундной длительности с энергией 10-100 МэВ и частотой следования 10-100 МГц. Для получения генерации от таких пучков расстояние между зеркалами резонатора подбирается таким образом, чтобы период следования импульсов тока был близок к времени обращения электромагнитного импульса по резонатору. В этом случае фактически реализуется режим вынужденной синхронизации мод за счет периодической модуляции тока инжекции, а генерируемые импульсы близки по длительности к импульсам тока. Активная синхронизация мод за счет периодической модуляции добротности СВЧ резонатора была экспериментально реализована в работе [6] и исследовалась теоретически [7]. В последней работе для модуляции добротности предлагалось использовать фазовый переход полупроводник-металл, инициируемый воздействием на полупроводниковую пластину периодического лазерного излучения. Однако, область применимости такого метода, с одной стороны, ограничена требованием относительно невысокой интенсивности СВЧ полей внутри резонатора, чтобы последние не влияли на процесс фазового перехода. С другой стороны, в соответствии с характерным временем распространения СВЧ импульсов по пространству взаимодействия необходима достаточно высокая (до сотен мегагерц) частота следования переключающих лазерных импульсов.

В данной работе исследуется альтернативная возможность - использование метода пассивной синхронизации мод для генерации ультракоротких микроволновых импульсов, состоящая в установке просветляющегося поглотителя в цепь обратной связи электронных генераторов. Следует отметить, что концепция метода пассивной синхронизации мод, как в квантовой, так и в классической электронике восходит к пионерской работе [8]. В лазерной физике этот метод генерации УКИ получил широкое практическое применение. Одновременно было дано теоретическое обоснование указанного метода с точки зрения нелинейной динамики. В частности, было показано, что импульсы можно интерпретировать как диссипативные солитоны (или автосолитоны), существование которых является следствием баланса между процессами усиления, нелинейного поглощения, генерации гармоник и дисперсии групповых скоростей [4-5].

В классической электронике метод пассивной синхронизации широкого распространения не получил, хотя исследовался в ряде работ (см., например, [9]). В частности, в недостаточной степени были исследована специфика, связанная с движением электронных потоков, как в усилительных, так и в абсорбирующих элементах, которая, как будет показано ниже, непосредственно влияет на параметры генерируемых импульсов, включая их длительность и пиковую амплитуду.

Микроволновое излучение в виде мощных ультракоротких импульсов с высокой частотой повторения может иметь большое практическое значение для радиолокации высокого разрешения, спектроскопии, диагностики плазмы. Кроме того, детальный анализ метода пассивной синхронизации мод в микроволновой электронике представляет чисто фундаментальный радиофизический интерес.

Целью диссертационной работы является:

1. Теоретическое исследование генерации УКИ микроволнового диапазона с помощью метода пассивной синхронизации мод на основе генератора, состоящего из электронного усилителя, нелинейного поглотителя, цепи обратной связи и ответвителя, выводящего часть излучения в полезную нагрузку.
2. Теоретическое исследование эффектов, позволяющих реализовать нелинейное поглощение микроволнового излучения, и синтез на их основе насыщающихся абсорберов, необходимых для реализации метода пассивной синхронизации мод в различных частотных диапазонах.
3. Разработка макетов генераторов УКИ с пассивной синхронизацией мод на основе двухсекционных схем с усиливающими и поглощающими электронными пучками с использованием моделей, учитывающих реальные дисперсионные характеристики электродинамических систем.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Генерация периодической последовательности ультракоротких микроволновых импульсов на основе метода пассивной синхронизации мод может быть осуществлена в схеме, включающей в цепь обратной связи широкополосный электронный усилитель и насыщающийся нелинейный поглотитель на основе взаимодействия излучения с дополнительным электронным пучком.

2. Для генерации импульсов максимальной амплитуды оптимальна ситуация, когда в усилителе групповая скорость волны отличается от поступательной скорости частиц. В этом случае смещение (проскальзывание) импульса вдоль электронного потока способствует более эффективному усилению импульсов за счет отбора энергии у различных электронных фракций. В поглотителе, напротив, оптимален режим группового синхронизма (равенство поступательной скорости частиц и групповой скорости волны). В этом случае минимизируется влияние друг на друга смежных фрагментов электромагнитного импульса через электронный поток. В перечисленных условиях пиковая амплитуда импульсов может превосходить уровень стационарной генерации, а в ряде случаев мощность запитываемого электронного потока.

3. В микроволновом диапазоне при уровне мощности излучения 10^3 - 10^6 Вт насыщающиеся нелинейное поглощение может быть реализовано при циклотронно-резонансном взаимодействии излучения с первоначально прямолинейным замагниченным пучком, когда эффект насыщения обусловлен релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц. Альтернативный вариант состоит в использовании эффекта компферевского подавления входного сигнала в черенковских ЛБВ и гиро-ЛБВ с гладким или винтовым волноводами.

4. На основе УКИ генератора, содержащего в цепи обратной связи гиро-ЛБВ с многозаходным винтовым волноводом и насыщающийся поглотитель, основанный на циклотронном взаимодействии излучения с прямолинейным электронным пучком, может быть осуществлена генерация периодической последовательности субнаносекундных импульсов миллиметрового диапазона с субмегаваттным уровнем мощности и гигагерцовой частотой повторения.

Научная новизна

Теоретически на основе пространственно-временного подхода продемонстрирована возможность применения метода пассивной синхронизации мод в СВЧ электронике для генерации периодической последовательности ультракоротких микроволновых импульсов. Определены условия для генерации импульсов максимальной амплитуды. Проведено исследование эф-

фектов, позволяющих реализовать нелинейное поглощение микроволнового излучения, и выполнить на этой основе синтез насыщающихся абсорберов, которые наряду с широкополосными усилителями являются необходимыми элементами для реализации метода пассивной синхронизации мод.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость работы обусловлена её направленностью на разработку генераторов ультракоротких импульсов микроволнового диапазона на основе пассивной синхронизации мод. Источники периодической последовательности когерентных ультракоротких микроволновых импульсов в зависимости от диапазона и мощности излучения могут найти применение в радиолокации высокого разрешения, спектроскопии, а также в диагностике плазмы.

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1a – 9a] и обсуждались на международных конференциях «IRMMW-THz» (Гонконг, Китай, 2015 г.; Копенгаген, Дания, 2016 г.; Нагоя, Япония, 2018 г.), «IVEC» (Лондон, Великобритания, 2017 г.; Пусан, Южная Корея, 2019 г.), “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” (Н. Новгород - Москва, 2017 г.), «EuMC» (Нюрнберг, Германия, 2017 г.), «TERA» (Н.Новгород, 2018 г.), Международной школе-конференции "Хаотические автоколебания и образование структур ХАОС-2016" (Саратов, 2016 г.), Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2017 и 2018 гг.), XI Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2019 г.), а также на внутренних семинарах ИПФ РАН. Результаты докладывались на конкурсе молодых ученых ИПФ РАН 2016 года.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 16 тезисов докладов.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Все приведенные в диссертации и вошедшие в работы [1a-25a] результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Аналитические исследования, численное моделирование в рамках усредненных моделей, оценка и оптимизация параметров генераторов ультракоротких импульсов, а также физическая интерпретация результатов

проведены автором самостоятельно при консультативной поддержке научного руководителя и соавторов совместных работ. Численное моделирование в рамках усредненных моделей осуществлено соискателем с помощью оригинальных численных кодов, написанных автором, а также программ, созданных совместно с А.С. Сергеевым.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, приложения, списка условных обозначений, заключения, списка литературы и списка трудов автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, включая 41 рисунок и 3 таблицы. Список литературы содержит 90 наименований, список трудов по теме диссертации состоит из 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 16 тезисов докладов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассматривается универсальная двухсекционная схема генератора УКИ, цепь обратной связи которого включает электронный усилитель, насыщающийся поглотитель, а также ответвитель, выводящий часть излучения в полезную нагрузку (рис. 1).

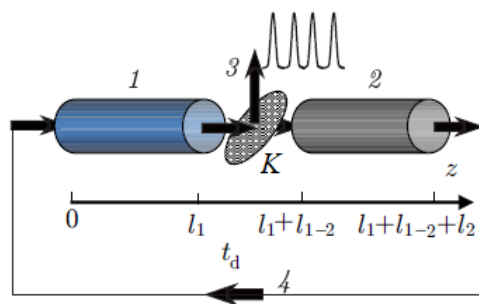


Рис. 1. Схема генераторов ультракоротких импульсов, включающая электронный усилитель 1, просветляющийся поглотитель 2, линию задержки 3 и ответвитель 4, выводящий излучение в полезную нагрузку. Вывод излучения осуществляется непосредственно с выхода усилителя. K - коэффициент, характеризующий работу ответвителя, t_d - время задержки

В разделе 1.1 даётся описание простейшей модели генератора УКИ. В качестве активного элемента используется универсальная модель электронного усилителя с преобладающей инерционной группировкой частиц, которой могут быть описаны многие типы электронных усилителей в приближении малого изменения энергии частиц [10-11]:

$$\frac{\partial a_n}{\partial Z} + \frac{\partial a_n}{\partial \tau} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = \text{Re}(a_n e^{i\theta}), \quad \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \delta + u.$$

Для описания поглощения используется типичная для лазерных схем безынерционная модель поглотителя с насыщающейся нелинейностью $\sigma(a_n)$ [1]:

$$\frac{\partial a_n}{\partial Z} + \frac{\partial a_n}{\partial \tau} + \sigma(a_n) a_n = 0, \quad \sigma(a_n) = \frac{\sigma_0}{1 + \nu |a_n|^2}. \quad (2)$$

Здесь a_n - медленно меняющаяся во времени и в пространстве нормированная амплитуда поля на n -м проходе, θ - фаза электронов, u - относительные изменения их энергии, δ - расстройка синхронизма, $Z = C\omega z / c$ и $\tau = C\omega(t - z / V_{||0}) / c\varepsilon$ - нормированные координата и временная переменная, учитывающая отличие начальной поступательной скорости электронов $V_{||0}$ от групповой скорости волны V_{gr} , $\varepsilon = (1/V_{gr} - 1/V_{||0})$ - параметр проскальзывания излучения относительно электронного потока, C - параметр усиления (параметр Пирса), σ_0 - коэффициент линейного поглощения, ν - параметр, характеризующий насыщение поглощения. Уравнения (1) и (2) дополняются граничными условиями для поля на границах секций, соответствующими непрерывности потока мощности излучения при его передаче из одной секции в другую с учетом наличия ответвителя.

В разделе 1.2 описаны основные динамические режимы работы, характерные для электронных генераторов УКИ. Показано, что в зависимости от параметров исследуемая двухсекционная система обладает большим набором динамических режимов, включая стационарные и хаотические режимы генерации, а также режимы генерации регулярных последовательностей УКИ. Если уровень подавления малого сигнала в поглощающей секции таков, что условия самовозбуждения генератора выполнены, то генерация (в том числе импульсно-периодическая) развивается из малых начальных флуктуаций плотности электронного потока. Это мягкий режим возбуждения (рис. 2, а-в). В противоположном случае, генерация может развиваться только после подачи в систему достаточно большого сигнала, просветляющего поглотитель. Это жёсткий режим возбуждения (рис. 2, г-е).

В мягком режиме в цепи обратной связи образуется последовательность импульсов, интервал следования которых вырабатывается системой самостоятельно и примерно равен нормированной длине пространства взаимодействия усилителя L_1 . Увеличение времени задержки приводит к росту числа импульсов, циркулирующих внутри системы. При этом интервал

между импульсами в выходном сигнале практически не меняется. Соответственно, на смену импульсу, покидающему пространство взаимодействия усилителя, почти сразу по цепи обратной связи поступает новый импульс. В результате в мягком режиме средний по времени электронный КПД при увеличении времени задержки остается неизменным.

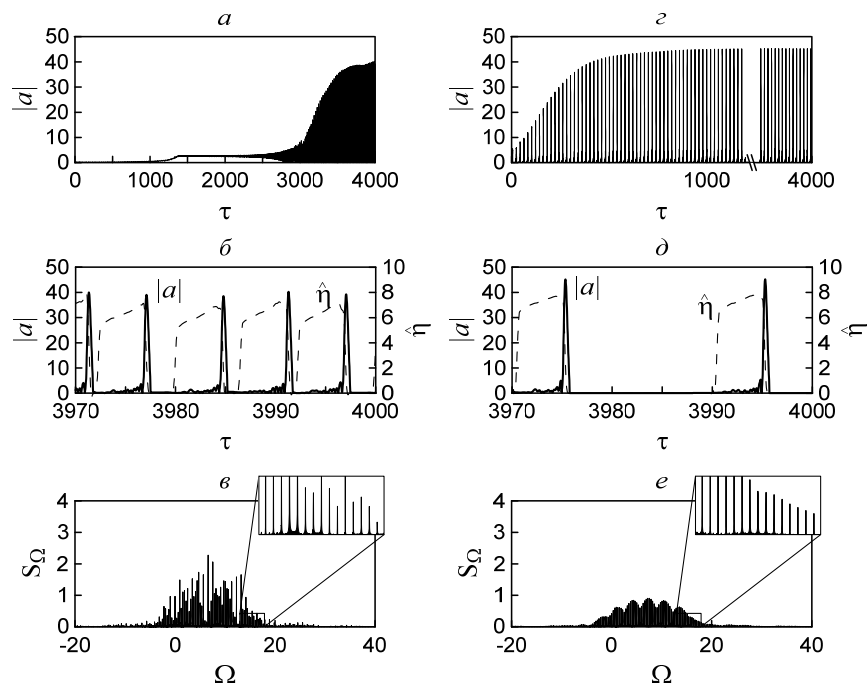


Рис. 2. Генерация УКИ при мягком и жёстком режимах самовозбуждения. Левая колонка мягкий режим запуска: (а) зависимость от времени амплитуды поля на выходе усилителя в процессе установления, (б) детальный профиль генерируемых импульсов (сплошная линия) и текущий приведённый электронный КПД (пунктир) в развернутом по времени масштабе, (е) спектр излучения. Правая колонка рисунки (z - e) – то же в жёстком режим запуска. Нормированные параметры - длина усилителя $L_1=5$, времени задержки $T_d=15$, коэффициенте передачи по амплитуде $K = 0.9$, длина поглотителя $L_2=5$, $\sigma_0=0.63$, $\nu=0.25$ в мягком режиме и $\sigma_0=1$, $\nu=0.6$ в жёстком режиме

В жестком режиме в зависимости от начальных условий внутри резонатора может образоваться и циркулировать от одного до нескольких импульсов. На рис. 2, z-e показана генерация последовательности УКИ в жёстком режиме самовозбуждения при подаче одного внешнего импульса большой амплитуды. В этом случае на всей длине обхода поля по цепи обратной свя-

зи формируется единственный импульс излучения. В результате при увеличении времени задержки и, соответственно, времени пробега импульса по цепи обратной связи часть электронов пучка, непрерывно инжектируемых в пространство взаимодействия усилителя, не взаимодействует с излучением (появляются «безработные» электроны). Как следствие, в жёстком режиме генерации средняя по времени эффективность энергообмена падает по мере увеличения времени задержки сигнала. Однако, стабильность генерации УКИ (повторяемость формы импульса) в жёстком режиме значительно выше, чем в мягком.

Моделирование демонстрируют наличие достаточно широкой области параметров, в которой реализуются режимы генерации периодической последовательности коротких импульсов. Важно подчеркнуть, что для получения таких режимов необходимо, чтобы в отсутствие поглощающей секции имело место достаточно большое превышение над порогом, обеспечивающее развитие широкополосных хаотических автомодуляционных режимов генерации (рис. 3). При относительно малом превышении над порогом, когда в исходной системе (генераторе с запаздывающей обратной связью) устанавливается стационарный одночастотный режим, введение просветляющегося поглотителя не приводит к развитию импульсной генерации. На спектральном языке это означает, что в отсутствие нелинейного поглотителя должно возбуждаться большое число продольных мод резонатора (рис. 3, в), образованного цепью обратной связи, которые в режиме УКИ генерации синхронизует между собой нелинейный поглотитель.

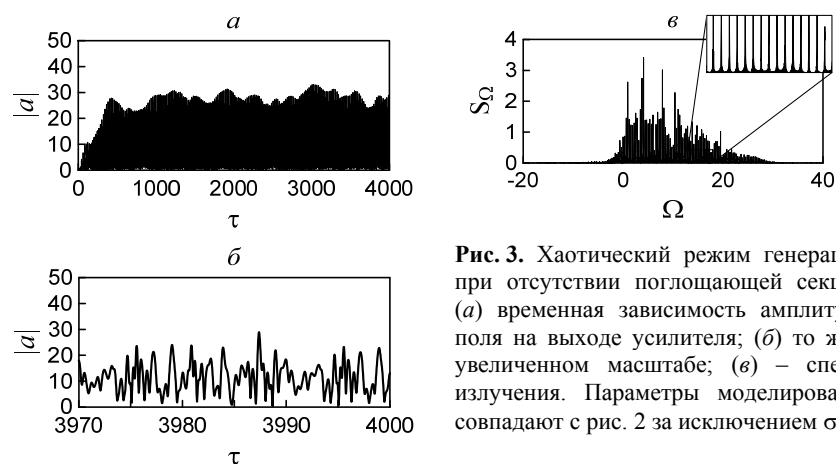


Рис. 3. Хаотический режим генерации, при отсутствии поглощающей секции: (а) временная зависимость амплитуды поля на выходе усилителя; (б) то же в увеличенном масштабе; (е) – спектр излучения. Параметры моделирования совпадают с рис. 2 за исключением $\sigma_0=0$

Необходимо также подчеркнуть важность отличия начальной поступательной скорости электронов $V_{||0}$ от групповой скорости излучения V_{gr} для генерации УКИ с максимальной пиковой мощностью. При $V_{||0} \neq V_{gr}$ форми-

рующийся электромагнитный импульс смещается по электронному потоку и последовательно отбирает энергию у различных электронных фракций. Таким образом, реализуется кумулятивный отбор энергии у различных электронных фракций. В результате пиковая мощность усиливаемых импульсов может превосходить мощность стационарной генерации, а в ряде случаев – и мощность электронного потока [3а-4а, 8а].

Следует отметить, что для одиночных СВЧ импульсов аналогичный описанному выше механизм нестационарного усиления в условиях отличия групповой скорости волны от поступательной скорости частиц, теоретически и экспериментально исследовался в [12-13]. В настоящей работе речь идет о генерации периодической последовательности коротких импульсов, формирующихся в результате синхронизации большого числа продольных мод резонатора, образованного петлей обратной связи. При этом усиление происходит не за один, как в [12-13], а за много проходов, в результате чего устанавливается баланс между усилением и поглощением, и форма импульса приобретает стационарный характер, не меняющийся от прохода к проходу. Генерируемые импульсы имеют высокую степень фазовой корреляции, что подтверждается вычислением взаимной корреляционной функции между тестовым импульсом излучения и полной последовательностью импульсов.

Заметим, что вывод излучения в нагрузку может быть осуществлён как на выходе усилителя (см. рис. 1), так и после нелинейного поглотителя. В последнем случае улучшается форма генерируемых УКИ, вследствие того, что насыщающийся поглотитель срезает сопровождающий импульсы шумовой пьедестал. При таком способе вывода все перечисленные выше режимы генерации УКИ также реализуются. Очевидно, что при использовании вывода излучения непосредственно после усилителя (см. рис. 1) форма импульсов, поступающих в полезную нагрузку, несколько хуже. Однако если поглощение во второй секции основано на взаимодействии излучения с электронным пучком (Глава 3), то вследствие того, что в эту секцию поступает относительно небольшая часть мощности, использование такой схемы приводит к снижению рабочего тока поглощающего пучка. Соответственно, применение схемы, представленной на рис. 1, может быть актуальным в случае генерации импульсов с высокой пиковой мощностью.

В разделе 1.3 теоретически продемонстрирована возможность генерации УКИ в случае, когда электронный усилитель функционирует в режиме неоднородного уширения линии [2, 3]. Такие режимы актуальны, например, при использовании сильноточных релятивистских электронных пучков, которые обладают существенным разбросом начальных энергий.

Во второй главе рассматриваются методы реализации насыщающихся поглотителей на основе электронно-волнового взаимодействия, которые способны функционировать при высоких уровнях входящего излучения.

В разделе 2.1 анализируется нелинейный поглотитель [2а,4а] на основе циклотронного взаимодействия излучения с первоначально прямолинейным замагниченным электронным пучком. Показано, что в этом случае насыщение поглощения излучения большой амплитуды обусловлено релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц [14]. В циклотронном поглотителе процесс электронно-волнового взаимодействия описывается уравнениями

$$\frac{\partial a}{\partial Z} = p_+, \quad \frac{\partial p_+}{\partial Z} + ip_+ (\delta + |p_+|^2) = -a, \quad (3)$$

$$a(Z=0) = a_{in}, \quad p_+(Z=0) = 0$$

где p_+ - нормированный поперечный импульс электронов, a - амплитуда поля, Z - нормированные продольная координата, δ - расстройка циклотронного резонанса.

На рис. 4 представлен коэффициент передачи $\Gamma = a_{out} / a_{in}$ (отношение амплитуды выходного сигнала a_{out} к амплитуде входного сигнала a_{in}) в зависимости от величины входного сигнала, с учётом неизохронности циклотронных осцилляторов и когда ей искусственно пренебрегли. Из приведённых зависимостей следует, что циклотронный абсорбер обладает насыщающимся поглощением: для малых амплитуд входного сигнала коэффициент передачи мал, для больших - стремится к единице.

В работе получены аналитические формулы, позволяющие найти значения оптимальных физических параметров циклотронного поглотителя для заданных характеристик входного излучения (центральной частоты, характерного значения мощности входного сигнала, при которой должно происходить просветление).

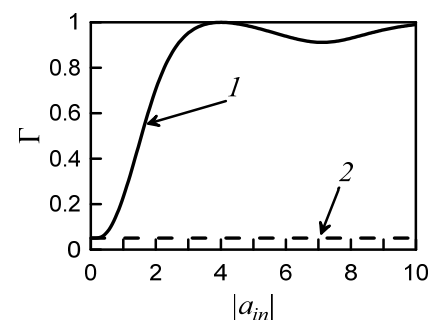


Рис. 4. Просветляющийся абсорбер на основе эффекта циклотронного поглощения. Зависимость коэффициента прохождения Γ от амплитуды падающего сигнала $|a_{in}|$ при нормированной длине поглотителя $L = 0.53$ в режиме точного циклотронного резонанса $\delta = 0$ с учётом зависимости гирочастоты от энергии частиц (кривая 1) и без её учёта (кривая 2)

В разделе 2.2 ([4а-5а]) рассматривается нелинейный поглотитель на основе черенковских ламп бегущей волны (ЛБВ), работающих в режимах компфнеровского подавления [15-16], реализующегося в области расстроек синхронизма, при которых фазовая скорость волны превосходит поступа-

тельную скорость электронов (электроны в процессе взаимодействия группируются в ускоряющей фазе волны). При этом требуемые характеристики поглотителя достигаются соответствующим подбором параметров, в том числе расстройки синхронизма, длины рабочего пространства и тока пучка.

Подавление малого сигнала в этом типе поглотителей обусловлено взаимным гашением трёх нормальных волн, возникающих при функционировании ЛБВ в линейном режиме. Просветление поглотителя для большого уровня сигнала происходит в силу группировки электронов в нейтральной фазе поля и как следствие перехода режима работы лампы в режим насыщения (рис. 5).

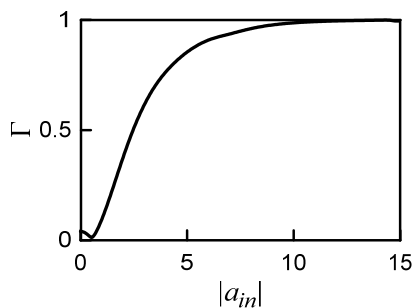


Рис. 5. Коэффициент прохождения Γ для компфнеровского поглотителя в зависимости от амплитуды входного сигнала ($L = 1.98$, $\delta = 1.52$)

В разделе 2.3 анализируется просветляющийся поглотитель на основе гиро-ЛБВ с регулярным волноводом, запитываемыми винтовыми электронными пучками, которые работают в режиме компфнеровского подавления входного сигнала [17]. Исследование этого типа поглотителя проводилось на основе системы уравнений [18]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial Z} &= I \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_+^s d\theta_0, \\ \frac{\partial p_+}{\partial Z} + i \frac{p_+}{s} (\delta + |p_+|^2 - 1) &= -a (p_+^*)^{s-1}, \\ a(Z=0) &= a_{in}, \quad p_+(Z=0) = e^{i\theta_0} \quad (\theta_0 \in [0; 2\pi)), \end{aligned} \quad (4)$$

где s - номер рабочей гармоники гирочастоты, I - параметр тока, прочие обозначения нормированных параметров те же, что и у системы уравнений (3). С помощью аналитического и численного анализа системы уравнений (4) получены соотношения, позволяющие определить оптимальные параметры поглотителя при известных характеристиках входного сигнала.

Необходимо заметить, что в отличие от усилителя, в котором, как показано в **Главе 1**, благоприятны режимы, в которых имеет место отличие поступательной скорости частиц от групповой скорости волны, в поглотителе, напротив, наиболее предпочтительна ситуация, когда эти скорости совпа-

дают. Поскольку в этом случае минимизируется влияние смежных фрагментов электромагнитного импульса друг на друга через электронный поток, чем достигается максимальный контраст между поглощением излучения малой амплитуды и прозрачностью для излучения большой амплитуды. В физике лазеров с этой целью используются просветляющие поглотители, обладающие максимальной безынерционностью (например, ячейка Керра [23]).

Применение того или иного типа поглотителя зависит от рабочего частотного диапазона. В сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазона волн возможно использование поглотителей, основанных на компфнеровском подавлении в черенковских ЛБВ, в миллиметровом диапазоне - на основе гиро-ЛБВ. Поглотитель, основанный на циклотронном взаимодействии излучения с прямолинейным электронным пучком, по сравнению с другими исследованными типами поглотителей обеспечивает большую устойчивость с точки зрения паразитных самовозбуждений, поскольку в нём используется неактивный электронный поток, который может только поглощать во всей полосе частот. Однако такой поглотитель требует вдвое большей величины ведущего магнитного поля по сравнению с гиро-абсорберами, оперирующими с винтовыми электронными пучками, которые позволяют работать на гармониках гирочастоты.

В третьей главе рассмотрены детально несколько схем генераторов УКИ, основанных на режиме пассивной синхронизацией мод. При этом в отличие от **Главы 1** используются более полные модели, в которых прохождение импульсов, как через усилитель, так и через просветляющийся поглотитель описываются системами динамических уравнений, учитывающими специфику электронно-волнового взаимодействия, включая дисперсию, ограниченность частотной полосы усиления и поглощения и т. д.

В разделе 3.1 возможность импульсной генерации продемонстрирована в рамках модели генератора, состоящего из цепочки двух черенковских ламп бегущей волны [5а], одна из которых работает в режиме усиления, а другая - в режиме компфнеровского подавления. Здесь же рассматривается схема, в которой в качестве активного элемента использует черенковская лампа обратной волны (ЛОВ), а нелинейное поглощение обеспечивается ЛБВ в режиме компфнеровского подавления [8а]. В последнем случае также возможна генерация УКИ, при этом длительность генерируемых импульсов оказывается больше по сравнению с генератором на основе ЛБВ-усилителя. Ещё одно достоинство последней схемы является то, что она обладает мягким режимом самовозбуждения, поскольку условия самовозбуждения ЛОВ значительно превышены.

В разделе 3.2 для модели УКИ генератора на основе релятивистской ЛБВ в сочетании с циклотронным поглотителем демонстрируется возможность реализации режимов, в которых пиковые мощности генерируемых импульсов превосходят мощность запитывающего электронного потока

(коэффициент конверсии больше единицы). При использовании релятивистских ЛБВ [19], запитываемых сильноточными электронными пучками, это означает возможность генерации периодической последовательности импульсов с мультигигаватным уровнем пиковой мощности [3а-4а].

В разделе 3.3 рассматривается клистронная модель генератора УКИ, в которой взаимодействие усиливающего (индекс 1) и поглощающего (индекс 2) электронных пучков с полем излучения происходит в двух коротких промежутках, разделенных областью дрейфа. Вся система находится внутри резонатора, обладающего высокой добротностью. В рамках такой модели электронная восприимчивость, вносимая пучками в резонатор, в том числе, в нелинейных режимах задается аналитически, а эволюция амплитуды поля описывается уравнением

$$\frac{\partial a}{\partial \bar{\tau}} + a + iD \frac{\partial^2 a}{\partial \xi^2} = -iX_1 e^{-i\Psi_1} \left[\frac{a}{|a|} J_1(|a|) \right]_{\xi-l_1} - iX_2 e^{-i\Psi_2} \left[\frac{a}{|a|} J_1(\mu|a|) \right]_{\xi-l_2} \quad (5)$$

Здесь $\bar{\tau}$ - медленное время [1], ξ - волновая переменная, по которой решение периодически с периодом T_d , D - параметр дисперсии, X_i - параметр тока, l_i - параметр, пропорциональный отлтичию групповой скорости излучения от поступательной скорости частиц i -го электронного пучка, Ψ_i - угол пролёта, который определяет режим усиления или поглощения, μ - отношение параметров группировки, $J_1(x)$ - функция Бесселя первого порядка.

Уравнение (5) аналогично по форме уравнениям, описывающим диссипативные солитоны в лазерах с пассивной синхронизацией мод [4-5]. Соответственно это позволяет трактовать колоколообразные решения уравнений (5) (рис. 6, а) как автосолитоны или диссипативные солитоны [5]. Спектральный состав такого солитона содержит большое число дискретных линий, соответствующих возбуждению различных продольных мод с коррелированными фазами (рис. 6, б).

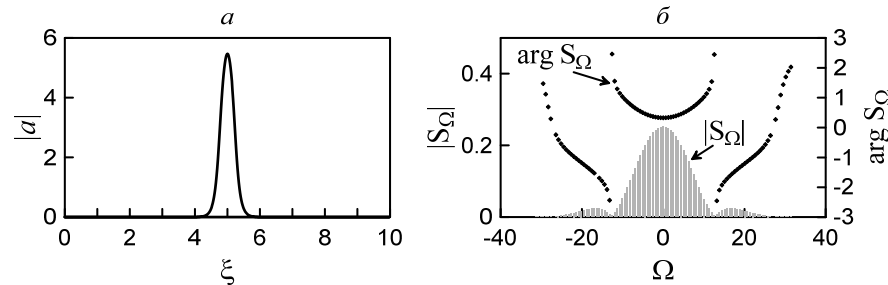


Рис. 6. Клистронная модель генератора УКИ. (а) Установившейся профиль солитона, (б) его спектральный состав, включая модуль и фазы мод; $T_d = 10$, $\mu = 0.5$, $D = 0.005$, $\Psi_1 = \pi/2$, $\Psi_2 = -\pi/2$, $l_1 = l_2 = 0$

В рамках рассматриваемой модели формирование диссипативных солитонов происходит в жёстком режиме, т. е. для их возбуждения необходима достаточно большая амплитуда затравочного сигнала.

В разделе 3.4 проведен анализ генераторов УКИ на основе цепочки двух giro-ЛБВ с многозаходным винтовым волноводом (винтовая giro-ЛБВ) [20-21], одна из которых работает как усилитель, а другая - как нелинейный поглотитель [6а]. Для описания усиления и нелинейного поглощения импульсов используется одноптичная система уравнений, состоящая из уравнений для амплитуд квазикритической A и бегущей B парциальных волн регулярного цилиндрического волновода, а также уравнения для поперечного импульса электронов [22]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - 2i \frac{\kappa_A}{c} \frac{\partial A}{\partial t} &= 2\sigma \kappa_A^2 B + i \frac{8eI_b}{m_e c^3 \beta_{||0} \sqrt{N_A}} \frac{\kappa_A^2}{2^s s!} \frac{s^s}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_+^s d\theta_0, \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{gr}} \frac{\partial}{\partial t} \right) B - i(\bar{h} - h_0) B &= i \frac{\kappa_A^2}{h_0} \sigma A, \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{||0}} \frac{\partial}{\partial t} \right) p_+ + i \frac{\kappa_A}{2\beta_{||0}} \frac{p}{s} (\Delta + |p_+|^2 - \beta_{\perp 0}^2) &= \frac{s^s}{2^s s! \beta_{||0} \sqrt{N_A}} A (p_+^{s*})^{s-1} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь σ - коэффициент связи, пропорциональный амплитуде гофрировки волновода, N_A и κ_A - норма и поперечное волновое число критической волны A , h_0 - продольное волновое число бегущей волны B , $V_{||0} = c\beta_{||0}$ и $V_{\perp 0} = c\beta_{\perp 0}$ - начальные продольная и поперечная скорость электронов, V_{gr} - групповая скорость бегущей волны, Δ - расстройка циклотронного синхронизма, $\bar{h} = 2\pi/d$, d - период гофрировки, I_b - ток электронного пучка, s - номер рабочей гармоники гирочастоты.

Режимы усиления или нелинейного поглощения в соответствующей секции реализуются за счёт подбора параметров, включая расстройку циклотронного синхронизма, ускоряющее напряжение, ток пучка, питч-фактор, а также длину пространства взаимодействия и параметры гофрировки.

Параметры обеих секций выбирались близкими к параметрам экспериментально реализованной винтовой giro-ЛБВ Ка-диапазона [21] (энергия частиц 50-70 кэВ, ток пучка 2-10 А, питч-фактор 0.8-1.2). Вместе с тем оптимальные режимы взаимодействия в усилительной и поглощающей секциях генератора УКИ должны существенно различаться. Для секции усиления параметры подбирались таким образом, чтобы имело место пересече-

ние дисперсионной кривой рабочей нормальной волны и прямой, отвечающей электронному пучку (рис. 7, *a*). Как показано в **Главе 1**, вследствие отличия групповой скорости электромагнитных импульсов от поступательной скорости электронов (режим проскальзывания) реализуется кумулятивный отбор энергии у различных электронных фракций, что способствует более эффективному усилению импульсов. В то же время для секции поглощения, согласно **Главе 2**, напротив, оптимален режим группового синхронизма, когда поступательная скорость электронов поглощающего пучка близка к групповой скорости нормальной волны, и который реализуется при касании дисперсионных характеристик (рис. 7, *б*). В этом случае минимизируется влияние одних фрагментов микроволнового импульса на другие через электронный пучок.

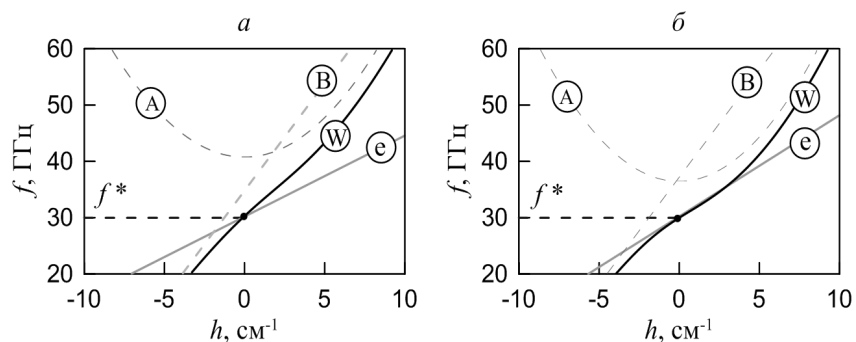


Рис. 7. Дисперсионная диаграмма для парциальных (A, B) и нормальной (W) волны, и электронного потока (e) в усилительной секции (a) и в секции поглощения (б). $f^* = 30$ ГГц

При выбранных параметрах исследуемая схема обладает жёстким режимом включения, т. е. для запуска генерации требуется достаточно большой начальный импульс. В отсутствие источников внешних импульсов запуск может быть реализован путем выбора сценария включения секции усиления и секции поглощения. Фактически сначала должно происходить включение секции усиления, в результате чего из малых шумов развивается хаотическая генерация (рис. 8, *б*). Далее включается секция нелинейного поглощения, и хаотический режим трансформируется в режим периодического следования импульсов (рис. 8, *в*).

Генерируемое излучение (рис. 8, *в*) представляет собой периодическую последовательность импульсов с пиковой мощностью ~ 400 кВт длительностью по полувысоте 200 пс и частотой повторения 1 ГГц.

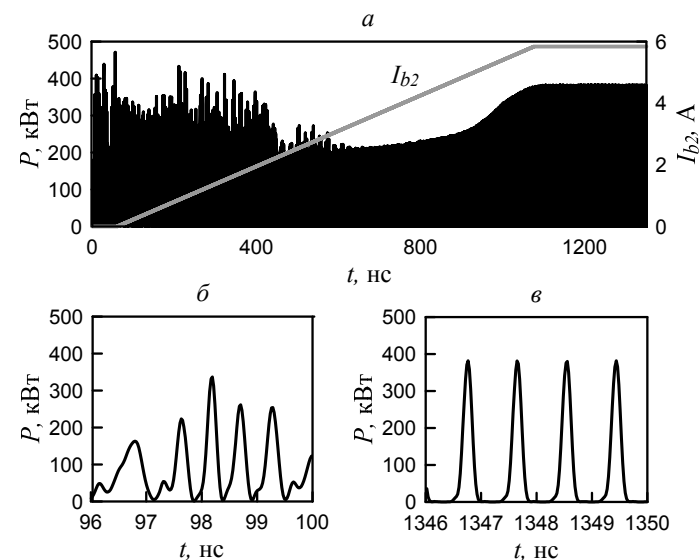


Рис. 8. Генерация УКИ на основе цепочки двух винтовых giro-ЛБВ. Выход на режим УКИ генерации осуществляется за счет задержки времени включения секции поглощения относительно секции усиления. *a* - зависимость амплитуды поля и тока пучка I_{b2} в поглотителе от времени, *б* - сигнал в увеличенном временном масштабе на стадии развития хаотической автомодуляции, *в* - сигнал на стадии генерации периодической последовательности импульсов после включения поглотителя

Нелинейные поглощающие свойства винтовой giro-ЛБВ исследовались экспериментально [17a]. В эксперименте на вход лампы подавался сигнал от внешнего источника - магнетрона с частотой 30-31 ГГц и мощностью до 100 Вт в стационарном режиме и до 10 кВт в импульсном режиме. Исследовалась зависимость коэффициента передачи $\Gamma^2 = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$, (где P_{out} - мощность прошедшего сигнала, P_{in} - мощность падающего сигнала) от мощности падающего сигнала и значения ведущего магнитного поля. На рис. 9 приведено сопоставление результатов экспериментального (сплошные линии) и теоретического (пунктир) исследования поглотителя на основе винтовой giro-ЛБВ. На рис. 9, *a* представлена зависимость коэффициента передачи от величины ведущего магнитного поля H . Можно видеть, что наряду с зоной усиления ($\Gamma^2 > 1$) существуют зона, для которой электромагнитная волна поглощается электронным пучком ($\Gamma^2 < 1$), т.е. реализуется режим комфнеровского подавления. Для ведущего магнитного поля, несколько превышающего значение $H^* = 0.568$ Тл, отвечающее точному резонансу, слабый сигнал (на рис. 9, *a*) полностью поглощается в процессе взаимодей-

ствия. Нелинейные поглощающие свойства системы подтверждает рис. 9, б, на котором для оптимального значения ведущего магнитного поля представлена зависимость коэффициента прохождения от мощности падающего сигнала P_{in} .

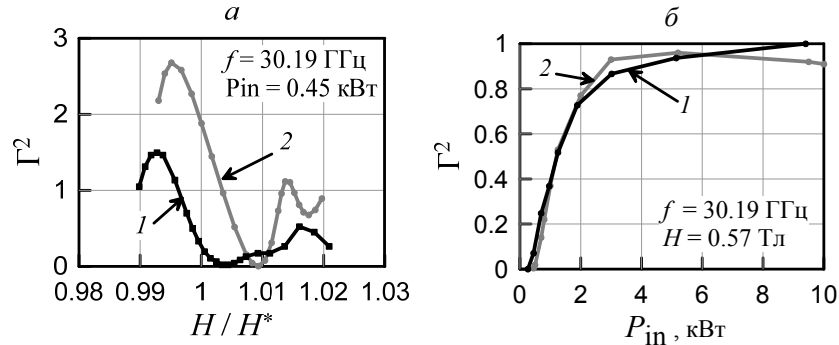


Рис. 9. Сопоставление результатов экспериментального (кривая 1) и теоретического (кривая 2) исследования поглотителя на основе винтовой giro-ЛБВ, работающей на второй гармонике гирочастоты. Зависимость коэффициента передачи Γ^2 (а) от величины ведущего магнитного поля и (б) от мощности входного сигнала при магнитном поле, соответствующему максимальному поглощению. Ток пучка $I_{b2} = 0.2$ А, начальная энергия частиц 30 кэВ, питч-фактор $g = 1$, $H^* = 0.568$ Тл значение магнитного поля, отвечающее точному циклотронному резонансу

В разделе 3.5 рассматривается схема генератора УКИ, в которой, как и в разделе 3.4 в качестве усилителя используется винтовая giro-ЛБВ, но в качестве нелинейного поглотителя используется циклотронный поглотитель на основе регулярного волновода. При этом для описания распространения импульсов используется более полная модель, учитывающая дисперсионную характеристику цилиндрического волновода (рис. 10), которая задается уравнением параболического типа. Кроме того, принято во внимание изменение профиля волновода при его сопряжении с усилителем.

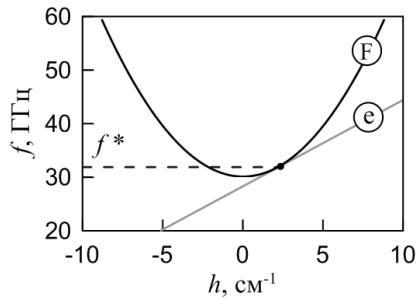


Рис. 10. Дисперсионная диаграмма для рабочей волны (F) и электронного потока (e) в циклотронном поглотителе

$$\frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - i \frac{2\kappa_F}{c} \left(i\delta(z) + \frac{\partial F}{\partial t} \right) = i \frac{4eI_{b2}}{m_e c^3} \frac{\kappa_F^2}{\beta_{||0} \sqrt{N_F}} P_+, \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{V_{||0}} \frac{\partial}{\partial t} \right) p_+ + i \frac{\kappa_F}{2\beta_{||0}} p_+ (\Delta + |p_+|^2) = \frac{\kappa_F}{2\beta_{||0} \sqrt{N_B}} F$$

Здесь I_{b2} - ток электронного пучка в поглотителе, $\delta(z)$ - функция, описывающая изменение профиля резонатора, N_F и κ_F - норма и поперечное волновое число рабочей волны, соответственно.

При моделировании данного варианта генератора УКИ параметры усилителя были близки к параметрам усилителя в схеме, исследованной в разделе 3.4. Затем синтезировались параметры поглотителя, который работал в режиме касания дисперсионных характеристик волны и пучка. На рис. 11 представлены результаты моделирования при мягком запуске режима УКИ генерации. Импульсы имеют пиковую мощность ~ 400 кВт длительностью по полувысоте 200 пс и частоту повторения 1 ГГц. Вычисление автокорреляционной функции $\mathfrak{R}(t)$ между выбранным импульсом \tilde{P} и полной последовательностью импульсов показывает, что генерируемые импульсы обладают высокой степенью фазовой корреляции.

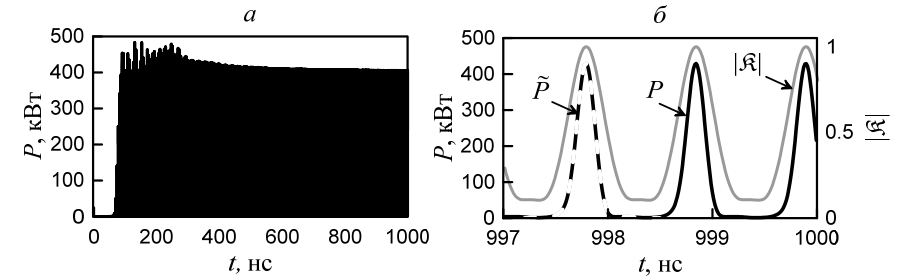


Рис. 11. Генерация последовательности УКИ в генераторе на основе винтовой giro-ЛБВ с циклотронным поглотителем в цепи обратной связи. а - установление генерации УКИ в мягком режиме; б - генерируемый сигнал и модуль автокорреляционной функции в развёрнутом по времени масштабе (\tilde{P} - «тестовый» импульс с которым производится сравнение при вычислении автокорреляционной функции)

Исследование изменения формы генерируемых импульсов при отклонении параметров абсорбера от значений, обеспечивающих режим касания, показывает, что данная схема обладает определённой толерантностью по отношению к вариации параметров. Однако импульсы с максимальной амплитудой генерируются в режиме касания.

В настоящее время в ИПФ РАН ведётся разработка экспериментального макета генератора УКИ на основе усилителя винтовой гиро-ЛБВ с циклотронным поглотителем на основе регулярного волновода, поскольку циклотронный поглотитель обеспечивает большую устойчивость к паразитному самовозбуждению.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформулированы оптимальные условия для генерации УКИ в схеме с электронным усилителем и насыщающимся нелинейным поглотителем в цепи обратной связи. В усилителе благоприятна ситуация, когда имеет место различие между поступательной скоростью частиц электронного потока и групповой скоростью волны. В этом случае импульс поля смещается вдоль электронного потока, что способствует более эффективному усилению импульсов. В поглотителе, напротив, оптимален режим группового синхронизма (равенство поступательной скорости частиц и групповой скорости волны). В этом случае минимизируется влияние смежных фрагментов электромагнитного импульса друг на друга через электронный поток и достигается максимальный контраст между подавлением малого шумового фона и практически полной прозрачностью для фрагментов импульсов большой амплитуды. Показано, что в таких условиях пиковая амплитуда импульсов может превосходить уровень стационарной генерации, а ряде случаев мощность запитывающего электронного потока.

2. Показана возможность реализации насыщающегося поглотителя на основе циклотронного резонансного взаимодействия излучения с первоначально прямолинейным замагниченным пучком. Насыщение поглощения обусловлено релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц.

3. Показана возможность реализации насыщающегося поглотителя на основе черенковских ЛБВ и гиро-ЛБВ с гладким или многозаходным винтовым волноводом, работающих в режиме компфнеровского подавления входного сигнала.

4. Проведено моделирование и разработан макет генератора УКИ 8-ми миллиметрового диапазона на основе винтовой гиро-ЛБВ и циклотронно-резонансного насыщающегося поглотителя. Динамические модели усилителя и поглотителя учитывают реальную дисперсию электродинамических систем, конечность рабочих полос усиления и поглощения. Расчетная пиковая мощность импульсов достигает 400 кВт при длительности по высоте 200 пс и частоте повторения до 1 ГГц.

Список цитированной литературы

1. *Haus H. A.* Mode-locking of lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2000. V. 6, №6. P. 1173-1185.
2. *Крюков П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов // *Квантовая электроника.* 2001. Т. 31, № 2. С. 95. №103102.
3. *Ярив А.* Квантовая электроника под ред. Ханина Я.И., М.: Советское радио, 1980. С. 149.
4. *Владимиров А.Г., Розанов Н.Н., Федоров С.В., Ходова Г.В.* Бифуркационный анализ лазерных автосолитонов // *Квантовая электроника.* 1997. Т. 24, №11. С. 978-982.
5. *Розанов Н.Н.* Диссипативные оптические солитоны // *УФН.* 2000. Т. 170, №4. P.462-465.
6. *Jerby E., Bekefi G.* AM mode-locking of a free-electron laser oscillator // *IEEE J. Quantum Electron.* 1993. V. 29, №11. P. 2845-2851.
7. *Denisov G.G., Kuzikov S.V., Savilov A.V.* Q-switching in the electron backward-wave oscillator // *Phys. Plasmas.* 2011. V.18, №103102.
8. *Cutler C.C.* The Regenerative Pulse Generator // *Proc. IRE.* 1955. Т. 43, P. 140-148.
9. *Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Скороходов В.Н., Трубецков Д.И., Шаравский Ю.П.* Диссипативные спин-волновые солитоны в микроволновых генераторах на основе вакуумных элементов с насыщающимся поглощением // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* 2017. Т. 1. С. 218-222.
10. *Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалёв Н.Ф. Нусинович Г.С. и Петелин М.И.* Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 249-274.
11. *Гинзбург Н.С., Сергеев А.С.* Динамика ЛСЭ генераторов с резонаторами произвольной добротности // *Журн. техн. физ.* 1991. Т. 61, №6. С. 133-140.
12. *Гинзбург Н.С., Зотова И.В. Сергеев А.С.* Об особенностях усиления коротких электромагнитных импульсов при распространении вдоль стационарных электронных потоков // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25, №20. С. 8-15.
13. *Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шунайлов С.А., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Кочаровская Е.Р., Сергеев А.С.* Эффект нелинейной компрессии ультракоротких микроволновых импульсов в процессе усиления квазистационарными электронными потоками // *Письма в ЖЭТФ.* 2010. Т. 91, №11. С. 620-625.
14. *Гапонов А.В., Петелин М.И. и Юллатов В.К.* Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1967. Т. 10, №9-10. С. 1414-1453.

15. *Kompfner R.* On the operation of the travelling wave tube at low level // J.Brit. IRE. 1950. V. 10, № 8-9. P. 283-289.
16. *Шевчик В.Н., Трубецков Д.И.* Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. Москва: Советское радио, 1970.
17. *Kou C.S., Chu K.R., McDermott D.B., Luhmann Jr. N.C.* Effective bandwidth and the Kompfner dip for cyclotron autoresonance maser amplifiers // Phys. Rev. E. 1995. V. 51. P. 642.
18. *Nusinovich G. S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004. P. 143-146.
19. *Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuks M.I., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Petelin M.I., Savelyev A.V., Schamiloglu E., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V.* An X-Band Gigawatt Amplifier // IEEE Trans. Plasma Sci., 2002. V. 30, № 3. P. 1041-1052
20. *Denisov G.G., Bratman V.L., Cross A.W., He W., Phelps A.D. R., Ronald K., Samsonov S.V., Whyte C.G.* Gyrotron Traveling Wave Amplifier with a Helical Interaction Waveguide // Phys. Rev. Lett. 1998. V.81, №25, P. 5680-5684.
21. *Samsonov S.V., Gachev I.G., Denisov G.G. Bogdashov A.A., Mishakin S.V., Fiks A.S., Soluyanov E.A., Tai E.M., Dominyuk Y.V., Levitan B.A., Murzin V.N.* Ka-Band Gyrotron Traveling-Wave Tubes with the Highest Continuous-Wave and Average Power // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. T. 61, №12. P. 4264-4267.
22. *Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu., Zhelezov I.V., Samsonov S.V. Mishakin S.V.* Mechanisms of amplification of ultrashort electromagnetic pulses in gyrotron traveling wave tube with helically corrugated waveguide // Phys. Plasmas. 2015. T. 22, Art.no.113111.
23. *Brabec T., Spielmann C., Curley P.F. Krausz F.* Kerr lens mode locking // Opt. Lett. 1992. T. 17, №18. P.1292-1294.
24. *Ginzburg N.S., Zavol'sky N.A. Nusinovich G.S.* Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // Int. J. Electron. 1986. V. 61, №6. P. 881-894.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1а. *Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в лампе бегущей волны с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, №17. С. 44-52.
- 2а. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в гиро-ЛБВ с просветляющимся циклотронным поглотителем в цепи обратной связи // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, №8. С. 664-673.

- 3а. *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 // Phys. Plasmas. 2016. V.23, Art.no.050702.
- 4а. *Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генераторы мощных ультракоротких СВЧ-импульсов с просветляющимися поглотителями в цепи обратной связи // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т.59, №8-9. С.1-19.
- 5а. *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 компфнеровского подавления // Письма в ЖТФ. 2017. Т.43, №18. С.47-55.
- 6а. *Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S., Samsonov S.V. Mishakin S.V.* Generation of train of ultrashort microwave pulses by two coupled helical gyro-TWTs operating in regimes of amplification and nonlinear absorption // Phys. Plasmas. 2017. V.24, Art.no.023103.
- 7а. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Сценарии включения генератора ультракоротких импульсов на основе двух связанных винтовых гиро-ЛБВ, работающих в режимах усиления и нелинейного поглощения // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т.82, №1. С.1-6.
- 8а. *Гинзбург Н.С., Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке связанных релятивистских ламп обратной и бегущей волны, работающих в режимах усиления и нелинейного компфнеровского подавления // ЖТФ. 2018. Т.88, №8. С.1241-1247.
- 9а. *Ginzburg N. S., Denisov G. G., Vilkov M. N., Zotova I. V., Sergeev A. S., Samsonov S.V. Mishakin S.V., Marek A. Jelonnek J.* Ultra-Wideband Microwave Oscillator Performance by Coupling of Two Gyro-TWTs with Helical Waveguide // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. V.65, No.6. P.2334-2339.
- 10а. *Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S.* Generation Of Ultrashort Microwave Pulses In Gyro-TWT With Saturable Cyclotron Absorber In The Feedback Loop // Proc. of 40th Inter. Conf. IRMMW-THz 2015, Hong Kong, China, 22-28 August, 2015, TIE-3.
- 11а. *Вилков М.Н.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в электронных СВЧ-генераторах с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи // Материалы докладов XXI Нижегородской сессии молодых ученых. Естественные, математические науки. Нижегородская обл., с. Морозовка, 17-20 мая, 2016, с. 10
- 12а. *Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Zotova I.V., Kocharovskaya E.R.* Passive mode-locking, dissipative solitons and generation of ultrashort pulses in electron oscillators with saturable absorber in the

- feedback loop // Proc. of 41st Int. Conf. IRMMW-THz 2016, Copenhagen, Denmark, 25-30 September, 2016, НЗВ.5.
- 13а. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке гиро-ЛБВ, работающих в режимах усиления и нелинейного подавления // Материалы XI международной школы-конференции "Хаотические автоколебания и образование структур" ХАОС-2016. Саратов, 3-8 октября, 2016, с. 46.
- 14а. *Вилков М.Н.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке винтовых гиро-ЛБВ, работающих в режимах усиления и нелинейного подавления // Материалы докладов XXII Нижегородской сессии молодых ученых. Нижегородская обл., с. Морозовка, 23-26 мая, 2017, с. 11-12.
- 15а. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке двух связанных винтовых гиро-ЛБВ, работающих в режимах усиления и нелинейного поглощения // Труды Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2017»). Можайск, 4-9 июня, 2017, г. с. 12-13.
- 16а. *Vilkov M.N., Ginzburg N.S., Denisov G.G., Zotova I.V., Sergeev A.S., Samsonov S.V. and Mishakin S.V.* Ultrashort pulse generation based on two coupled helical gyro-TWTs // Proc. of 10th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", Nizhny Novgorod – Moscow, 17-22 July, 2017 (EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149. 04041).
- 17а. *Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Sergeev A.S., Rozental R.M., Samsonov S.V., Mishakin S.V., Jelonnek J. and Marek A.* Passive Mode-Locking and Generation of Ultrashort Pulses in Electron Oscillators with Saturable Absorber in the Feedback Loop // Proc. of 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, Germany, 8-13 October, 2017, P. 684-686.
- 18а. *Zotova I.V., Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Mishakin S.V.* Mode-locked electron oscillator based on two coupled helical gyro-TWTs // Proc. of 18th Int. Vacuum Electronics Conference, London, UK, 24-26 April, 2017.
- 19а. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Самсонов С.В., Мишакин С.В.* Режим пассивной синхронизации мод в электронном генераторе на основе двух связанных винтовых гиро - ЛБВ // Тезисы докладов V Всероссийской микроволновой конференции, Москва, 29 ноября - 1 декабря, 2017, с. 309-312.
- 20а. *Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Самсонов С.В.* Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в винтовой гиро-ЛБВ с просветляющимся циклотронным поглотителем в цепи обратной связи // Тезисы докладов VI Все-

- российской Микроволновой конференции. Москва, 26-30 ноября, 2018, с. 199-203.
- 21а. *Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Zotova I.V.* Generation of Train of Ultrashort Ka-band Pulses by Helical Gyro-TWTs with Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber in the Feedback Loop // Proc. of 43rd Inter. Conf. IRMMW-THz 2018, Nagoya, Japan, 9-14 September, 2018.
- 22а. *Zaslavsky V.Yu., Abubakirov E.B., Vilkov M.N., Ginzburg N.S., Rozental R.M., Zheleznov I.V.* Nonlinear Kompfner absorption in the course of interaction of a high-current relativistic beam with the fundamental decelerated mode of a waveguide with a shallow corrugation // Proc. of 22nd Inter. Conf. on High-Power Particle Beams, Changsha, China, 16-20 September, 2018.
- 23а. *Vilkov M.N., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S.* Generation of Ultrashort Microwave Pulses in Passive Mode-Locked Electron Oscillators with Homogeneous and Inhomogeneous Line Broadening // Proc. of 3rd Inter. Conf. «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications», Nizhny Novgorod, Russia, 22-25 October, 2018 (EPJ Web of Conferences. 2018. V. 195. 01020).
- 24а. *Гинзбург Н.С., Вилков М.Н., Зотова И.В., Сергеев А.С., Самсонов С.В.* Разработка генератора ультракоротких импульсов на основе винтовой гироЛБВ и насыщающегося абсорбера, основанного на циклотронном поглощении излучения прямолинейным электронным пучком // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Н. Новгород, 25-28 февраля, 2019, с. 67.
- 25а. *Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Samsonov S.V., Zotova I.V., Bogdashov A.A., Marek A., Jelonnek J.* Development of Ultrashort Pulse Generators based on Helical Gyro-TWT with Saturable Cyclotron Resonance Absorber in the Feedback Loop // Proc. of 20th Int. Vacuum Electronics Conference, Busan, South Korea, 28 April - 1 May, 2019.

ВИЛКОВ Михаил Николаевич

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
МОЩНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ
С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД**

Автореферат

Подписано к печати 04.10.2019.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 74(2019).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46