

На правах рукописи

Розенталь Роман Маркович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
АВТОМОДУЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ В ПРИБОРАХ
ГИРОРЕЗОНАНСНОГО ТИПА**

01.04.03 – радиопизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2018

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

Научный руководитель: Зотова Ирина Валерьевна, доктор физико-математических наук, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты: Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Саратовского Филиала ФГБУН "ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН" (г.Саратов).

Дубинов Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, РФЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров), заместитель директора НПЦФ по НИР, начальник отдела.

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

Защита состоится « 8 » октября 2018 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д002.069.02 при ФГБНУ ФИЦ Институт прикладной физики РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН, а также на сайте www.ipfran.ru.

Автореферат разослан «30» июля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,

Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Формулировка и актуальность проблемы

Исследование сложной динамики, возникающей в различных типах СВЧ генераторов, является актуальной задачей современной радиофизики. С теоретической точки зрения интерес к этой проблеме обусловлен тем, что указанные устройства являются типичными примерами распределенных автоколебательных систем. Практический интерес к данной тематике связан с возможностью создания мощных источников широкополосного излучения с высоким КПД и заданными спектральными свойствами. К настоящему времени наибольший объем теоретических и экспериментальных исследований сложных динамических режимов выполнен применительно к приборам, основанным на взаимодействии прямолинейных электронных пучков с электромагнитными волнами, – клистроном, виркатором, а также черенковским лампам бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ) [1, 2]. Многочастотное и шумоподобное излучение сантиметрового диапазона, которое может быть получено на этой основе, представляет интерес для систем радиоэлектронного подавления [3, 4], экспериментов по нагреву плазмы [5], ускорения электронов [6], радиолокации [7, 8], скрытой передачи информации [9].

В то же время общеизвестно, что при переходе в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны мощность подобных источников СВЧ излучения существенно снижается, что обусловлено необходимостью уменьшения характерных размеров замедляющих структур и быстрым спаданием поля синхронной волны. Очевидным решением для генерации мощных сигналов со сложным спектром в указанных диапазонах является использование гирорезонансных приборов – гиротронов и гиросилителей с внешней обратной связью, для которых, вследствие взаимодействия с быстрыми волнами, не требуются замедляющие структуры. Вместе с тем, подавляющее число исследований гиросилителей посвящено анализу стационарных режимов генерации. Принципиальная возможность реализации периодических и хаотических автомодуляционных режимов в гиротронах впервые была продемонстрирована в работе [10], где на основе модели с нефиксированной (самосогласованной) продольной структурой высокочастотного поля была показана возможность возникновения указанных режимов с ростом превышения рабочего тока над стартовым значением. В работе [11] показано, что хаотические колебания в модели гиротрона с выходным рупором могут возникать либо через последовательность бифуркаций удвоения периода, либо при разрушении квазипериодического движения. В [12] продемонстрировано, что аттракторы хаотических режимов в гиротронах обладают аномально большой размерностью. В [13] при увеличении рабочего тока режимы периодической и хаотической автомодуляции впервые были зарегистрированы экспериментально в слабо-релятивистском генераторе с рабочей частотой ~33 ГГц. В то же время обычно в гиротронах бифуркационные значения токов существенно превосходят

рабочие токи винтовых электронных пучков, что затрудняет реализацию на этой основе генераторов шумоподобного излучения. В таких условиях необходимое превышение надкритичности может быть обеспечено другими методами. В частности, в [14] усложнение формы выходного сигнала в релятивистском гиротроне диапазона 23 ГГц наблюдалось при увеличении длины пространства взаимодействия. В [15, 16] в слабо-релятивистском гиротроне диапазона 260 ГГц для этой же цели использовалось повышение пичч-фактора электронов запитывающего пучка. Следует отметить, что во всех перечисленных экспериментах относительная ширина спектра излучения характеризовалась достаточно малыми значениями, не превышающими 1%, что существенно ограничивает возможные практические приложения.

Перспективным методом снижения бифуркационных значений токов, при которых в гиротронах происходит переход к нестационарным режимам генерации, является введение запаздывающей обратной связи (ЗОС), например, за счет отражений выходного сигнала от неоднородностей, расположенных в выходном волноводном тракте. Теоретически эта возможность была продемонстрирована в [17] на основе простейшей модели с заданной функцией электронной восприимчивости электронного потока и в ряде работ в рамках приближения фиксированной [18] и нефиксированной [19–21] структуры высокочастотного поля. В работе [22] при введении отражений за счет рассогласования выходного окна экспериментально наблюдалось значительное уширение спектра генерации в технологическом гиротроне с уровнем мощности в несколько киловатт.

Для генерации мощного многочастотного коротковолнового излучения также могут быть использованы гиросилители (гироклистроны и гиросил-ЛБВ) с запаздывающей обратной связью. Подобный метод хорошо известен для различных радиофизических систем [23, 24], включая такие электронные усилители как ЛБВ [25–28] и клистроны [6, 29, 30]. Гироклистроны с запаздывающей обратной связью теоретически были рассмотрены только в работах [31, 32] на основе приближения фиксированной продольной структуры поля. В то же время к настоящему моменту разработан и реализован новый тип широкополосных (ширина полосы 10–15%) гиросил-ЛБВ с винтовой гофрированной рабочей волноводом [33–35], которые при введении ЗОС могут быть использованы для генерации широкополосного хаотического излучения.

Данная диссертационная работа посвящена дальнейшему развитию перечисленных выше исследований по генерации многочастотного излучения в приборах гирорезонансного типа с целью повышения мощности и существенного расширения спектра генерации; а также возможности управления спектральными характеристиками выходного излучения, включая повышение равномерности спектрального состава. Отметим, что для теоретического анализа рассматриваемых систем потребовалась разработка новых или модификация уже имеющихся моделей гирорезонансного электронно-волнового взаимодействия. В отличие от приближенных подходов на основе точечных

или функциональных отображений [9, 36, 37], доминирующих в предшествующих исследованиях сложной динамики приборов черенковского типа, развиваемые в настоящей работе модели позволяют исследовать процессы усиления и генерации многочастотных сигналов в приборах с учетом реальной дисперсии электродинамической системы, конечности полосы усиления, а также эффектов нелинейного насыщения. Одновременно включение ряда дополнительных факторов, не существенных для анализа стационарных режимов, приводит к возможности адекватно описать режимы так называемого развитого хаоса в гироклистронах с ЗОС, а также генерацию хаотических последовательностей гигантских ультракоротких импульсов («волн-убийц») в гиротронах с большой надкритичностью.

Цели диссертационной работы

Основными целями диссертационной работы являются:

1. Теоретические и экспериментальные исследования условий реализации автомодуляционных (периодических и хаотических) режимов генерации в гиротронах с внешними отражениями. Анализ возможности управления спектром выходного излучения в указанных режимах.
2. Экспериментальное наблюдение режимов хаотической генерации с мегаваттным уровнем мощности в релятивистском гиротроне с внешними отражениями.
3. Теоретическое исследование нестационарной динамики гиротронов с большой надкритичностью в рамках модели, учитывающей изменение структуры поля за время пролета электронов, а также изменение продольного импульса частиц в процессе взаимодействия.
4. Теоретическое исследование моделей гироклистронов и гиро-ЛБВ с запаздывающей обратной связью с целью демонстрации возможности создания на этой основе широкополосных источников хаотического излучения большой мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Анализ возможности повышения равномерности спектра хаотического излучения.

Научная ценность и новизна результатов

В результате выполнения работы:

1. Впервые в релятивистском гиротроне с рабочей частотой ~9 ГГц при введении отражений от диафрагмы, расположенной в выходном волноводном тракте, экспериментально получены режимы периодической и хаотической автомодуляции с мегаваттным уровнем мощности излучения.
2. В релятивистском гиротроне с рабочей частотой ~30 ГГц и отражателем брэгговского типа впервые реализован метод управления частотой периодической автомодуляции с уровнем выходной мощности в сотни киловатт за счет изменения положения отражателя.
3. Впервые экспериментально реализованы режимы хаотической генерации в гиро-ЛОВ с внешними отражениями.

4. Впервые теоретически исследованы режимы хаотической генерации в гиротроне в режиме перекрытия низкочастотного и высокочастотного синхронизма и показана возможность использования указанного режима для генерации хаотического излучения с шириной полосы до 10%.

5. На основании модифицированной модели гиротрона с нефиксированной продольной структурой поля в условиях большого превышения над порогом обнаружены режимы генерации хаотической последовательности гигантских ультракоротких импульсов («волн-убийц») с мощностью, многократно превосходящей как среднюю мощность генерации, так и мощность электронного потока. Дано объяснение механизма формирования указанных импульсов.

6. Впервые теоретически показана возможность реализации режимов развитого хаоса в гироклистронах и винтовых гиро-ЛБВ миллиметрового диапазона с запаздывающей обратной связью. Показана возможность повышения равномерности спектра хаотического излучения в цепочке из двух связанных винтовых гиро-ЛБВ, одна из которых представляет собой усилитель, а вторая – нелинейный элемент с реактивной нелинейностью. Указанная схема является аналогом черенковских генераторов хаотического излучения сантиметрового диапазона – «шумотронов».

Практическое значение работы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования могут быть использованы для разработки источников мощного широкополосного (периодического и хаотического) излучения миллиметрового диапазона длин волн. Такие источники представляют потенциальный интерес для ряда приложений, включая

- перспективные системы радиолокации, в которых использование шумоподобных широкополосных сигналов позволяет улучшить разрешающую способность и снизить вероятность обнаружения и перехвата сигнала [7, 8, 38, 39];

- тестирование электропрочности волноведущих трактов при транспортировке многочастотных, сложно модулированных сигналов [40–42]. Использование случайных последовательностей коротких импульсов большой мощности («волн-убийц») в этих целях представляется перспективным направлением, учитывая наличие теоретических разработок процессов возникновения пробоев в стохастических СВЧ-полях [43];

- медицинские приложения, где недавние исследования продемонстрировали определенные преимущества использования импульсных сверхширокополосных сигналов по сравнению с монохроматическим излучением [44]. В частности, применение такого излучения значительно снижает число так называемых «горячих точек», представляющих собой локальные области перегрева тканей.

Результаты, представленные в диссертации, использовались при выполнении научно-исследовательских работ, поддержанных грантами РФФИ № 01-02-17173, 03-02-17560, 16-02-00745, 17-08-01077, РНФ № 16-42-01078.

Личный вклад автора

Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка задач, определение подходов к их решению, анализ, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем д.ф.м.н. И. В. Зотовой и проф. Н. С. Гинзбургом. Эксперименты по управлению частотой автомодуляции в релятивистском гиротроне диапазона 30 ГГц и получению периодических и хаотических автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне диапазона 9 ГГц проводились совместно с Н. И. Зайцевым, Е. В. Иляковым, И. С. Кулагиным, А. С. Шевченко. Эксперименты на стендах слаборелятивистских гиротронов в режимах рассогласования выходного окна, и в режиме гиро-ЛОВ с внешними отражениями проводились совместно с А.Г. Лучининым и М.Ю. Глявиным. При выполнении экспериментальных исследований автор осуществлял подготовку плана работ, разработку электродинамических компонент, регистрацию и обработку полученных данных.

Расчеты выполнялись автором на основе оригинальных вычислительных программ, разработанных А. С. Сергеевым, и на основе программного комплекса прямого численного моделирования методом крупных частиц KARAT, разработанного В. П. Таракановым.

Апробация работы

Основные материалы по теме диссертации опубликованы в работах [1*–14*] и докладывались на внутренних семинарах ИПФ РАН, а также на российских и международных конференциях [15*–34*], включая международную конференцию Института инженеров электротехники и электроники по физике плазмы (Монтерей, США, 2005 г.), международные конференции по волнам инфракрасного и миллиметрового диапазонов (Отцу, Япония, 2003 г.; Карлсруэ, Германия, 2004 г.; Канкун, Мексика, 2017 г.), Европейскую микроволновую конференцию (Париж, Франция, 2005 г.); Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 2016 г.), международную школу-конференцию «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2016 г.), Всероссийскую научно-техническую конференцию «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2016 г.), Всероссийскую школу-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова (Москва, 2017 г.), международные рабочие встречи «Мощные микроволны в плазме» (Нижний Новгород, 2002 г.) и «Мощные СВЧ и терагерцовые волны: источники и приложения» (Нижний Новгород, 2017 г.), международную конференцию по вакуумной электронике

(Лондон, 2017 г.), XVII международную зимнюю школу-семинар по радиофизике и электронике СВЧ (Саратов, 2018 г.).

Положения, выносимые на защиту

1. В гиротронах с внешними отражениями возможно управление частотой периодической автомодуляции в режиме возбуждения соседних продольных мод электродинамической системы, что обусловлено зависимостью собственных частот и добротностей указанных мод от положения отражателя.

2. Полоса хаотической генерации в гиротронах может быть существенно расширена за счет оптимального подбора отстройки гирочастоты относительно критической частоты рабочей моды, когда достаточно сильно разнесены высокочастотный и низкочастотный циклотронные резонансы. В этих условиях при большом превышении рабочих токов над стартовым значением возникает перекрытие полос генерации на указанных резонансах.

3. При введении запаздывающей обратной связи в гироклистронах и гиро-ЛБВ с винтовой гофрировкой могут быть реализованы режимы развитого хаоса, адекватное описание которых требует построения нестационарных моделей с нефиксированной (самосогласованной) продольной структурой высокочастотного поля.

4. Повышение однородности спектра шумоподобного излучения миллиметрового диапазона может быть реализовано в генераторе на основе винтовой гиро-ЛБВ при введении в цепь запаздывающей обратной связи элемента, который обеспечивает нелинейный амплитудно-зависимый сдвиг фазы сигнала (нелинейная флукутирующая задержка). В качестве такого элемента с доминирующей реактивной нелинейностью может быть использована дополнительная винтовая гиро-ЛБВ со специальной настройкой параметров.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, двух приложений, списка цитированной литературы (138 пунктов) и списка публикаций автора по теме диссертации (34 пункта). Объем диссертации составляет 148 страниц, включая 104 рисунка и 1 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обоснованы актуальность темы диссертации, кратко сформулированы цели и задачи, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы. Кратко, по главам, изложено содержание диссертации.

Глава 1 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию динамики гиротронов и гиро-ЛОВ при введении внешних запаздывающих отражений.

В Разделе 1.1 основное внимание уделено исследованию возможности управления периодом автомодуляционных режимов генерации в гиротронах с отражениями. В п.1.1.1 описана нестационарная самосогласованная модель, которая была использована как в первой, так и с некоторыми модификациями в последующих главах диссертации для теоретического анализа динамики гиротронов. В рамках этой модели пространственно-временная эволюция амплитуды генерируемого излучения описывается неоднородным параболическим уравнением, которое дополнено усредненными уравнениями движения частиц:

$$i \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + ia\delta(Z) = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_+^n d\theta_0, \quad \frac{\partial p_+}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p_+}{\partial \tau} + i \frac{p_+}{n} (\Delta - 1 + |p_+|^2) = -a(p_+^*)^{n-1} \quad (1)$$

Здесь $\tau = \bar{\omega}_c t \beta_{\perp 0}^4 / 8\beta_{\parallel 0}^2$, $Z = \bar{\omega}_c z \beta_{\perp 0}^2 / 2c\beta_{\parallel 0}$, $a = eAJ_{m-n}(\bar{\omega}_c r_b / c) / mc\bar{\omega}_c \gamma_0 \beta_{\perp 0}^3$, $p_+ = (p_x + ip_y) e^{-i\bar{\omega}_c t + i(m-n)\phi} / p_{\perp 0}$ – нормированные время, координата, амплитуда высокочастотного поля и поперечный импульс частиц, ϕ – азимутальный угол, $g = \beta_{\perp 0} / \beta_{\parallel 0}$ – питч-фактор,

$$I_0 = 64 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{\parallel 0} \beta_{\perp 0}^{2(n-4)}}{\gamma_0} \left(\frac{n^n}{2^n n!} \right)^2 \frac{J_{m-n}^2(\bar{\omega}_c r_b / c)}{(\nu^2 - m^2) J_m^2(\nu)} \quad (2)$$

– параметр тока, записанный в предположении взаимодействия трубчатого электронного пучка с радиусом инжекции r_b с модой TE_{mp} на n -й гармонике гирочастоты ω_H , ν_p – p -й корень уравнения $dJ_m(x)/dx = 0$, $\Delta = 2(\bar{\omega}_c - n\omega_H) / \bar{\omega}_c \beta_{\perp 0}^2$ – начальная расстройка циклотронного синхронизма, $\bar{\omega}_c$ – критическая частота рабочей моды в выходном сечении электродинамической системы $z = z_{out}$, выбранная за несущую частоту.

Особенностью модели (1) по сравнению с использованными ранее нестационарными моделями гиротронов (см., например, [10, 20, 21]), является учет в уравнениях движения частиц временной производной $\partial/\partial\tau$, ответственной за конечность времени пролета электронов через пространство взаимодействия и, соответственно, за реальный наклон дисперсионной характеристики электронного пучка [45]. Как было показано в [9*, 10*] (см. также Главу 2), указанный фактор имеет принципиальное значение для корректного описания режимов многочастотной генерации в гиротронах.

При анализе влияния на динамику гиротронов внешних отражений считалось, что указанные отражения обеспечиваются за счет диафрагмы, расположенной в выходном волноводе на расстоянии $dL = \bar{\omega}_c \beta_{\perp 0}^2 dL / 2c\beta_{\parallel 0}$ от области взаимодействия с электронным пучком. Профиль электродинамической сис-

темы, включая форму диафрагмы, задавался функцией $\delta(Z) = 8\beta_{\parallel 0}^2 (\bar{\omega}_c - \omega_c(Z)) / \beta_{\perp 0}^4 \bar{\omega}_c$ (где $\omega_c(Z) = cv_p / r(Z)$ – критическая частота рабочей моды в сечении Z). Вне диафрагмы на коллекторном конце использовалось излучательное граничное условие [10].

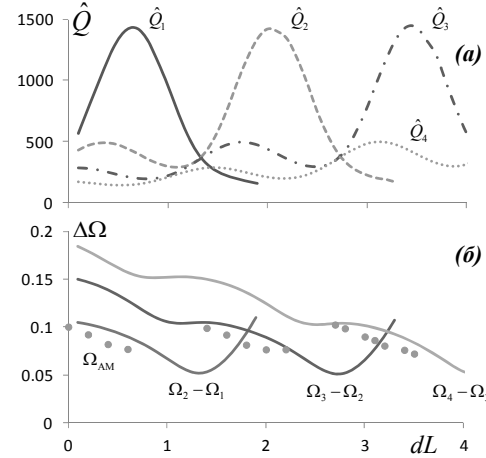


Рис. 1. Зависимость (а) приведенной добротности продольных мод электродинамической системы гиротрона и (б) разности частот между соседними модами от расстояния до отражателя. Точками показана частота автомодуляции, полученная при моделировании на основе уравнений (1).

темы частотой автомодуляции может осуществляться за счет изменения положения отражателя (см. рис. 1,б), что продемонстрировано также на основе моделирования с использованием усредненных уравнений (1) (см. п.1.1.3) и PIC (particle-in-cell) кода KARAT (см. п.1.1.4).

В Разделе 1.2 представлены результаты экспериментов, подтверждающие выводы, сделанные на основе теоретического анализа. Первый эксперимент (см. п.1.2.1) проводился на стенде непрерывного технологического гиротрона [46] при переходе в режим возбуждения моды TE_{12} на частоте ~ 21 ГГц, когда выходное окно становилось рассогласованным. Были зарегистрированы устойчивые режимы периодической авто-модуляции с частотой 54 ± 0.5 МГц, что находилось в хорошем соответствии с расчетной разностью частот 60.5 МГц между второй и третьей продольными модами [15*].

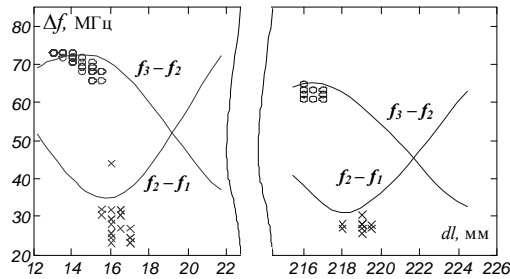


Рис. 2. Результаты экспериментов по управлению частотой автомодуляции в релятивистском гиротроне с частотой ~ 30 ГГц. Зависимости от положения отражателя разности частот между продольными модами (сплошные линии) и измеренной частоты автомодуляции при возбуждении 1-2-й (x) и 2-3-й (o) продольных мод.

$(66 \pm 73) \pm 1$ МГц. Сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями межмодового расстояния (рис. 2) позволили сделать вывод, что модуляция с меньшей частотой соответствовала режиму одновременного возбуждения первой и второй, а модуляция с большей частотой – второй и третьей продольных мод [3*, 18*]. При увеличении расстояния до отражателя на 200 мм наблюдалось уменьшение частоты автомодуляции. В совокупности полученные данные демонстрируют возможность управления частотой автомодуляции в гиротронах путем изменения положения отражателя. Отметим, что такой метод является достаточно универсальным и может быть, в частности, использован для управления частотой автомодуляции в черенковских ЛОВ с отражениями [5*] (см. Приложение 1).

В п.1.2.3 представлены результаты экспериментальных исследований нестационарных режимов генерации в релятивистском гиротроне с частотой ~ 9 ГГц, работающего на моде TE_{01} [48]. С целью снижения влияния эффектов высокочастотного пробоя отражатель с коэффициентом отражения по мощности $\sim 75\%$ располагался внутри вакуумного объема. В эксперименте по мере увеличения тока пучка наблюдались режимы как периодической, так и хаотической автомодуляции (рис.3) [1*, 2*]. При этом было зафиксировано удвоение периода автомодуляции (ср. рис. 3,б и рис. 3,в), что является одним из характерных сценариев перехода к хаосу. Максимальная выходная мощность в режимах хаотической автомодуляции достигала ~ 1.6 МВт при КПД около 8%.

В п.1.2.1 приведены результаты экспериментов по исследованию влияния внешних отражений на динамику релятивистского гиротрона с частотой ~ 30 ГГц и рабочей модой TE_{53} [47] в условиях изменения расстояния до отражателя брегговского типа. Были зарегистрированы две области генерации периодически модулированных сигналов с уровнем мощности 0,2–0,4 МВт и частотами модуляции $(23 \pm 32) \pm 1$ МГц и

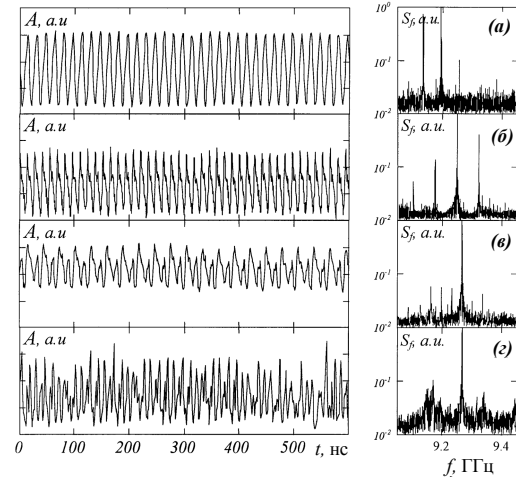


Рис. 3. Результаты экспериментов по реализации автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне с частотой ~ 9 ГГц. Показаны осциллограммы и спектры выходного сигнала при разных значениях тока пучка: (а) – 26 А; (б) – 69 А; (в) – 78 А; (г) – 80 А.

нарные (периодические и хаотические) режимы генерации с глубиной модуляции до 100% и уровнем мощности ~ 100 Вт.

Глава 2 посвящена теоретическому анализу возможности существенного расширения полосы шумоподобного излучения в гиротронах в условиях большой надкритичности. Это может быть достигнуто за счет специальной настройки гирочастоты относительно критической частоты рабочей моды, когда для заданного значения поступательных и поперечных скоростей электронов достаточно сильно разнесены высокочастотный (А) и низкочастотный (В) циклотронные резонансы (рис. 4,а). Как показало моделирование в рамках усредненного подхода, выполненное в Разделе 2.1, в таких условиях с ростом параметра тока I_0 происходит перекрытие зон генерации, соответствующих резонансным точкам А и В (см. рис. 4,б–д), в результате чего имеет место формирование шумового сигнала с практически равномерным спектром, ширина которого близка к разности частот между указанными точками [9*]. Отметим, что в пренебрежении временной производной в уравнениях движения в (1) дисперсионная характеристика пучка представляет собой вертикальную линию с единственным пересечением с характеристикой рабочей волноводной моды. Это не позволяет корректно описать режимы двойного пересече-

В п.1.3 исследовалась возможность снижения бифуркационных значений токов и реализации хаотических режимов генерации при введении умеренных отражений в гиро-ЛОВ [4*]. Теоретический анализ проводился на основе упрощенной модели, учитывающей взаимодействие электронного пучка только с обратной волной. Экспериментальные исследования выполнялись на стенде импульсного 24 ГГц гиротрона с рабочей модой TE_{11} , возбуждаемой на второй гармонике гирочастоты [49]. При установке внешнего отражателя впервые в приборах подобного типа были получены нестационарные (периодические и хаотические) режимы генерации с глубиной модуляции до 100% и уровнем мощности ~ 100 Вт.

ния указанных характеристики и приводит к значительным отличиям в спектре генерации гиротрона при больших превышениях над порогом.

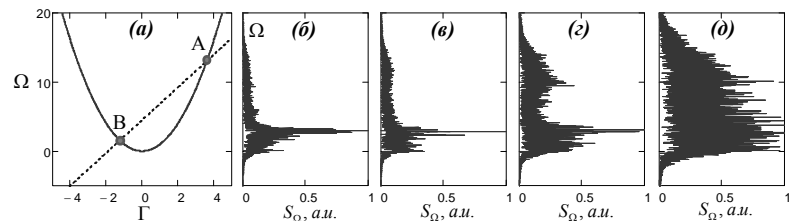


Рис. 4. Дисперсионные характеристики волны и пучка в гиротроне в режиме двойного пересечения (a) и трансформация спектра выходного сигнала при увеличении параметра тока: (б) – $I_0=0.2$; (в) – $I_0=1.0$; (г) – $I_0=2.0$, (д) – $I_0=3.0$.

Оценки показывают, что при параметрах электронного пучка, характерных для слаборелятивистских гиротронов (энергия электронов 20 кэВ, ток 2 А, питч-фактор 1.3), при взаимодействии с рабочей волной TE_{11} на первой гармонике гирочастоты ($n=1$) вблизи частоты 35 ГГц в режиме двойного пересечения дисперсионных характеристик относительная ширина спектра хаотической генерации может достигать $\sim 10\%$. Кроме того, исследуемый режим может быть также использован для генерации на гармониках гирочастоты ($n>1$), что при том же значении магнитного поля позволит реализовать широкополосные генераторы хаотических сигналов на более высоких частотах. В соответствии с выполненными расчетами на основе гиротрона [50], запитываемого приосевым электронным пучком с энергией 30 кэВ, током 0.7 А, питч-фактором 1.7, рабочим магнитным полем 4.5-5 Тл и длиной однородного участка магнитного поля до 5 см, при возбуждении мод TE_{11} на первой, TE_{21} на второй и TE_{31} на третьей гармониках гирочастоты может быть получено излучение с шириной спектра 18, 13.5 и 2.3 ГГц в окрестности частот 120, 240 и 360 ГГц. Полученные результаты были подтверждены также на основе прямого PIC моделирования с использованием кода KARAT (см. п.2.1.2).

Важно, отметить, что в режиме двойного пересечения дисперсионных характеристик (рис. 4) при больших значениях токового параметра I_0 излучение представляет собой случайную последовательность ультракоротких импульсов с длительностью обратно пропорциональной разности частот в точках А и В и пиковой мощностью, существенно (в десятки раз) превосходящей фоновый уровень излучения. Представляется, что подобные случайно возникающие импульсы высокой мощности могут быть отнесены к классу так называемых «волн-убийц» (freak/togue waves) – редких событий с экстремально большой амплитудой, впервые описанных в гидродинамике [51] и в настоящее время теоретически и экспериментально зарегистрированы в целом ряде физических систем [52, 53].

Отметим, что без включения временной производной в уравнения движения в (1) режимы генерации с формированием «волн-убийц» в моделировании не наблюдаются. В то же время сравнение результатов PIC-моделирования с результатами, полученными на основе усредненных уравнений, показало, что адекватное описание этого явления в гиротроне требует учета в модели (1) изменения продольного импульса электронов. Это связано с ультракороткой длительностью формируемых импульсов, что приводит к возникновению на их фронтах значительных перепады электрического поля. В результате инициируются сильные поперечные магнитные поля, приводящие, в свою очередь, к существенному изменению продольного импульса частиц. В конечном итоге в энергию излучения может трансформироваться не только энергия поперечного вращения частиц (что типично для гиротронов), но и в значительной степени энергия продольного движения [10*].

Моделирование динамики гиротронов на основе модифицированной системы уравнений с учетом изменения продольного импульса частиц было проведено в Разделе 2.2. Временные зависимости амплитуды излучения на выходе гиротрона при различной величине надкритичности, определяемой параметром тока I_0 , представлены на рис. 5. Видно, что на границе стохастических режимов генерации ($I_0=0.1$) отношение максимальной мощности сигнала P к среднему значению $\langle P \rangle$ составляет $6 \div 7$, в то время как при $I_0=3.0$ указанная величина достигает значений $100 \div 200$. Следует отметить, что при переходе к большим значениям параметров тока существенным образом изменяется вид функции распределения генерируемых импульсов по относительной мощности $P/\langle P \rangle$, на которой возникает плато в области $P/\langle P \rangle \approx 100 \div 200$, что соответствует достаточно большой вероятности появления гигантских импульсов. Таким образом, в этой области параметров гиротрон демонстрирует поведение характерное для «волн-убийц» в лазерах, имеющих близкие статистические характеристики (см. [54]).

Модифицированная модель электроно-волнового взаимодействия с учетом изменения продольного импульса частиц позволила проанализировать механизм формирования «волн-убийц» в гиротронах, который, фактически обусловлен возможностью одновременного взаимодействия с попутной и встречной электромагнитными волнами вблизи критической частоты. При этом сначала происходит возбуждение импульса на встречной волне, который после отражения от закритического сужения поглощается электронным пучком. В результате на катодном краю пространства взаимодействия образуется область, где поперечная энергия электронов заметно превышает начальное значение. Поступившие далее в пространство взаимодействия электроны инициируют генерацию на попутной волне. При этом, поскольку групповая скорость излучения превосходит поступательную скорость частиц, формирующийся электромагнитный импульс сдвигается (проскальзывает [45]) относительно раскачанных электронов с питч-фактором $\sim 3 \div 4$, аккумулирует их

энергию и эффективно усиливается. Указанный процесс сопровождается одновременным укорочением длительности формируемого импульса, что ведет к увеличению крутизны его фронтов, возникновению сильного поперечного магнитного поля и трансформации части продольного импульса частиц в поперечный. Это, в свою очередь, создает дополнительный источник вращательной энергии для усиления формирующихся «волн-убийц», пиковая мощность которых может в 4÷6 раз превышать мощность запитывающего гиротрон квазинепрерывного электронного пучка. Полученные результаты были подтверждены на основе РС моделирования для параметров гиротрона с рабочей частотой ~35 ГГц.

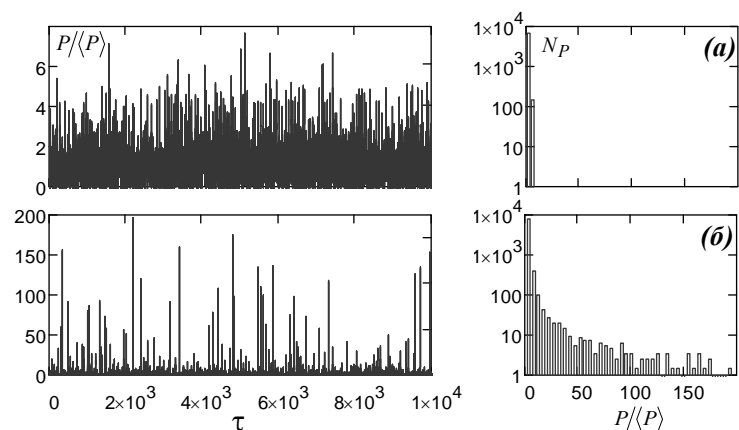


Рис. 5. Переход к генерации «волн-убийц» при увеличении параметра тока I_0 . Показаны временная зависимость амплитуды выходного сигнала (слева) и гистограмма (справа), демонстрирующая распределение генерируемых импульсов по мощности: (а) $I_0=0.1$, (б) – $I_0=3.0$.

В Главе 3 исследована возможность генерации многочастотного излучения миллиметрового диапазона на основе гироусилителей – гироклистронов и гиро-ЛБВ с рабочим пространством в виде волновода с винтовой многозаходной гофрировкой. Анализ во всех случаях проводился на основе динамических самосогласованных моделей, которые позволяют описать усиление и генерацию многочастотных широкополосных сигналов с учетом реальной дисперсии электродинамической системы, конечности полосы усиления, а также эффектов нелинейного насыщения.

В п.3.1.1 построена нестационарная самосогласованная модель гироклистронов с дифракционным вводом и выводом излучения. При этом рассмотрение базировалось на использовании системы уравнений (1), а поступление начального сигнала на вход усилителя описывалось модифицированными

граничными условиями [55, 6*]. На основе развитой модели была исследована динамика двухрезонаторного гироклистронов с рабочей частотой ~93 ГГц и параметрами, соответствующими экспериментально реализованному в [56] усилителю этого типа. Помимо усиления входного сигнала, был рассмотрен режим паразитного самовозбуждения выходного резонатора, а также захват возбуждаемых автоколебаний начальным сигналом. Продемонстрировано хорошее совпадение результатов теоретического анализа с экспериментальными данными.

В п.3.1.2 исследована динамика гироклистронов при введении запаздывающей обратной связи. Исследован сценарий перехода к хаосу и продемонстрирована возможность генерации хаотического излучения с мощностью в десятки киловатт и относительной шириной полосы около 1% [11*–13*]. Показано существенное усложнение хаотической динамики при приближении рабочей точки, определяемой нагрузочной характеристикой цепи обратной связи, к участку фазовой характеристики гироклистронов с сильной зависимостью набега фазы излучения на длине пространства взаимодействия от амплитуды входного сигнала. На основе полученных временных реализаций выходного сигнала выполнены расчеты показателей Ляпунова, имеющих смысл скорости экспоненциального роста возмущения за время спада до нуля автокорреляционной функции. Положительные значения двух старших показателей Ляпунова в сочетании с неструктурированным видом восстановленных методом запаздывания аттракторов позволили отнести полученные режимы к категории развитого хаоса или гиперхаоса [11*, 12*].

Важно отметить, что по сравнению с использованными ранее моделями гироклистронов в приближении фиксированной продольной структуры поля [31, 32], использованная нестационарная модель (1) позволяет адекватно описать подобные режимы генерации, поскольку они характеризуются существенными изменениями продольной структура высокочастотных полей с течением времени.

В Разделе 3.2 проведены теоретические исследования генераторов хаотического излучения на основе гиро-ЛБВ с рабочим пространством в виде многозаходного винтового волновода [57] («винтовой» гиро-ЛБВ). В настоящее время такие гиро-ЛБВ в миллиметровом диапазоне обеспечивают рекордную ширину полосы усиления порядка 10% [35]. Это достигается вследствие того, что на винтовой гофрировке имеет место связь двух парциальных волн круглого волновода, одна из которых является бегущей, а другая квазикритической. В результате формируется нормальная волна с практически постоянной групповой скоростью в широком частотном диапазоне вблизи нулевых значений продольного волнового числа. Одновременно с увеличением области синхронизма с электронным пучком (и соответственным расширением полосы усиления) это приводит также к снижению чувствительности электронно-волнового взаимодействия к разбросу скоростей частиц. Перечисленные характеристики делают привлекательным использование винтовых гиро-ЛБВ

для усиления многочастотных сигналов, а также в качестве активного элемента в генераторах хаотического излучения.

В п.3.2.1 проведено исследование динамики винтовых giro-ЛБВ при введении запаздывающей обратной связи. При этом для анализа использована нестационарная самосогласованная модель [58], включающая параболическое уравнение для амплитуды квазикритической волны, уравнение переноса для бегущей волны и усредненные уравнения движения, в которых, также как в п.1.1.1 был принят во внимание наклон дисперсионной характеристики электронного пучка. Наличие обратной связи учтено при записи граничных условий для бегущей волны, для квазикритической волны использованы стандартные граничные условия излучения [10]. В численном моделировании, в том числе с использованием PIC кода KARAT (см. п.3.2.2), было продемонстрировано, что для параметров экспериментально реализованной giro-ЛБВ с рабочей частотой ~ 35 ГГц [59] могут быть реализованы режимы развитого хаоса с шириной спектра 3-4 ГГц, соответствующей полосе усиления винтовой giro-ЛБВ $\sim 10\%$, и средней мощностью 50-70 кВт [7*, 8*]. Однако полученный в моделировании спектр излучения является достаточно сильно изрезанным, что обусловлено доминированием в нем частот близких к собственным частотам кольцевого резонатора, формируемого цепью обратной связи. Возможным решением для повышения равномерности спектра является использование двух связанных винтовых giro-ЛБВ (рис. 6) с разными расстройками (значениями ведущего магнитного поля), одна из которых работает как усилитель, а другая – как нелинейный элемент с областью резкой зависимости набега фазы на длине пространства взаимодействия от амплитуды входного сигнала (см. п.3.2.3) [14*].

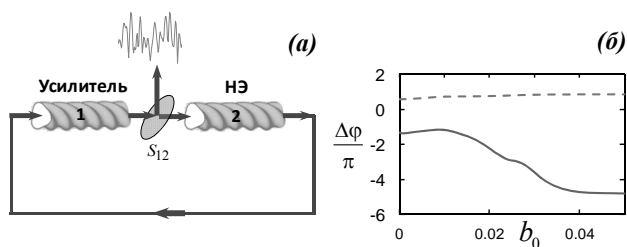


Рис. 6. (а) Модель генератора хаотического излучения на основе двух связанных винтовых giro-ЛБВ, одна из которых представляет собой усилитель, а другая – нелинейный элемент (НЭ); S_{12} - коэффициент передачи. (б) Зависимость набега фазы излучения $\Delta\varphi$ на длине пространства взаимодействия от амплитуды входного сигнала b_0 в усилительной секции (пунктир) и в нелинейном элементе (сплошная линия).

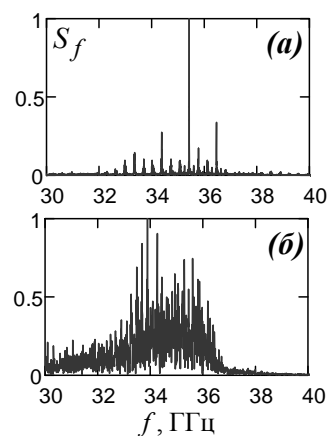


Рис. 7. Спектры хаотической генерации, которая может быть получена на основе винтовой giro-ЛБВ, при отсутствии (а) и при наличии (б) нелинейного элемента в цепи обратной связи.

В отсутствии такого элемента спектр генерации представляет собой набор линий (рис. 7,а) с относительно низким шумовым пьедесталом. Введение нелинейного элемента с указанными выше характеристиками приводит к размыванию этих линий и существенному повышению однородности спектра излучения (рис. 7,б).

Подобный генератор шума («шумотрон»), состоящий из двух черенковских ЛБВ, ранее был реализован в сантиметровом диапазоне в работах [36, 60, 61]. В Приложении 2 построена нестационарная самосогласованная теория такого генератора. Для рассмотренных систем на основе численного моделирования продемонстрирована возможность существенного повышения равномерности спектра хаотического излучения по сравнению с конфигурацией в виде одиночного усилителя с линейной цепью обратной связи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен метод управления частотой периодической автомодуляции в гиротронах с внешними отражениями, основанный на зависимости резонансных частот и добротностей собственных мод электродинамической системы от положения отражателя. Выводы теории подтверждены экспериментальными исследованиями релятивистского гиротрона диапазона 30 ГГц с уровнем мощности в сотни киловатт.

2. Экспериментально получены режимы многочастотной генерации с мегаваттным уровнем мощности в релятивистском гиротроне на рабочей частоте ~ 9 ГГц, реализующиеся при введении отражений в выходном волноводном тракте. Зарегистрирован переход к хаотической генерации через бифуркации удвоения периода.

3. Показана возможность значительного расширения полосы хаотического излучения в гиротронах в условиях, когда для рабочей моды достаточно сильно разнесены высокочастотный и низкочастотный циклотронные резонансы с электронным пучком. В результате при больших превышениях над порогом возникает перекрытие полос генерации на указанных резонансах. При этом выходное излучение представляет собой случайную последователь-

ность коротких импульсов с пиковой мощностью, в 100–150 раз превосходящей средний по времени уровень излучения и в 4–6 раз мощность запитывающего гиротрон электронного пучка. Высокая пиковая мощность наряду со статистическими характеристиками позволяют отнести генерируемые импульсы к классу так называемых «волн-убийц» – редких событий с экстремально большой амплитудой, регистрируемых в динамических системах различной физической природы.

4. Построена нестационарная самосогласованная модель электронно-волнового взаимодействия в гироклистронах с дифракционным вводом и выводом излучения, учитывающая влияние пучка на формирование продольной структуры поля. Наряду с известными режимами взаимодействия, такими как усиление монохроматических сигналов, режим паразитного самовозбуждения выходного резонатора и захват возбуждаемых автоколебаний начальным сигналом, предложенная модель позволяет адекватно описать режимы развитого хаоса, возникающие в гироклистронах при введении запаздывающей обратной связи.

5. На основе пространственно-временного подхода исследованы режимы широкополосной хаотической генерации, реализующиеся при введении запаздывающей обратной связи в гиро-ЛБВ с винтовым гофрированным волноводом. Показано, что включение в цепь обратной связи элемента с сильной фазовой нелинейностью позволяет существенно повысить равномерность спектра излучения за счет размывания спектральных линий, соответствующих собственным частотам системы. В качестве такого элемента при специальной настройке параметров может быть использована дополнительная винтовая гиро-ЛБВ.

Список цитированной литературы

1. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. В 2 т. Т.2. Нестационарные и хаотические процессы / Под ред. А. А. Короновского, Д. И. Трубецкова, А. Е. Храмова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 392 с.
2. Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А. С. М. : Техносфера, 2012. 424 с.
3. Залогин Н. Н. Как начиналась шумовая тематика в ИРЭ // Радиотехника. 2005. № 3. С. 5-12.
4. Мясин Е. А. Исследования генерации СВЧ-шума в ИРЭ АН СССР 1962-1967 годов-начало нового научного направления. Лекция // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 1. С. 104-122.
5. Puri S. Stochastic heating of plasma electrons using microwave noise // Plasma Physics. 1974. V. 16. P. 517-526.
6. Айзацкий Н. И., Волобуев В. В., Иванов Г. М. Автомодационный режим в задающем генераторе ЛУЭ // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13, № 12. С. 758-761.
7. Лукин К.А. Шумовая радиолокация миллиметрового диапазона // Радиофизика и электроника. 2008. Т. 13. С. 344-358.

8. Залогин Н. Н., Калинин В. И., Скняря А. В. Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. 2011. Т. 3. № 1. С. 3-17.

9. Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S., Booske J., Sengele S., Ryskin N., Titov V. Generation of chaotic radiation in a driven TWT amplifier with time-delayed feedback // Phys. Plasmas. 2006. V. 13, № 1. Art.no. 013104.

10. Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., Zavol'sky N. A. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // Int. J. Electronics. 1986. V.61, № 6. P. 881-894.

11. Блохина Е. В., Рожнев А. Г. Влияние отражений от выходного рупора на динамику гиротрона // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 11. С. 1390-1396.

12. Блохина Е. В., Рожнев А. Г. Хаос и гиперхаос в гиротроне // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 887-899.

13. Chang T. H., Chen S. H., Barnett L. R., Chu K. R. Characterization of Stationary and Nonstationary Behavior in Gyrotron Oscillators // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87, № 6. Art.no. 064802.

14. Ronald K., Cross A.W., Phelps A.D.R., He W. Observations of dynamic behaviour in an electron cyclotron maser oscillator // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34, № 3. P. L17-L22.

15. Alberti S., Ansermet J.-Ph., Avramides K. A., Braunmueller F., Cuanillon P., Dubray J., Fasel D., Hogge J.-Ph., Macor A., de Rijk E., da Silva M., Tran M. Q., Tran T. M., Vuillemin Q. Experimental study from linear to chaotic regimes on a terahertz-frequency gyrotron oscillator // Phys. Plasmas. 2012. V. 19, № 12. Art.no. 123102.

16. Alberti S., Braunmueller F., Tran T. M., Genoud J., Hogge J.-Ph., Tran M. Q., Ansermet J.-Ph. Nanosecond Pulses in a THz Gyrotron Oscillator Operating in a Mode-Locked Self-Consistent Q-Switch Regime // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111, № 20. Art.no. 205101.

17. Antonsen T. M., Cai S. Y., Nusinovich G. S. Effect of window reflection on gyrotron operation // Physics of Fluids B: Plasma Physics. 1992. V. 4, № 12. P. 4131-4139.

18. Глявин М. Ю., Запезалов В. Е., Кулыгин М. Л. Нестационарные процессы в гиротроне с отражением излучения от неоднородностей выходного тракта // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 12. С. 1616 -1622.

19. Гинзбург Н. С., Глявин М. Ю., Завольский Н. А., Запезалов В. Е., Мусеев М. А., Новожилова Ю. В. Использование отражения с запаздыванием для получения автомодационных и стохастических режимов генерации в гиротронах миллиметрового диапазона // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, вып. 11. С. 53-59.

20. Grudiev A., Jelonnek J., Schünemann K. Time-domain analysis of reflections influence on gyrotron operation // Phys. Plasmas. 2001. V.8, № 6. P. 2963-2973.

21. Airila M. I., Kall P. Effect of Reflections on Nonstationary Gyrotron Oscillations // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2004. V. 52, № 2. P. 522-528.

22. Глявин М. Ю., Запезалов В. Е., Куфтин А. Н., Лучинин А. Г. Экспериментальное исследование спектрального состава выходного излучения гиротрона с отражением части выходного сигнала // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 5. С. 440-444.

23. Кузнецов С. П. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью (обзор) // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 12. С. 1410-1427.

24. Кислов В. Я., Дмитриев А. С. Нелинейная стохастизация колебаний в радиотехнических и электронных системах // Проблемы современной радиотехники и электроники. М. : Наука, 1987. С. 154-169.

25. Кислов В. Я., Залогин Н. Н., Мясин Е. А. Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24, № 6. С. 1118-1130.

26. Кац В. А. Возникновение хаоса и его эволюция в распределенном генераторе с запаздыванием // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 2. С. 161-176.

27. Yinxing C., Xianping W. Chaos in TWT // Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, August 18-20, 1998, Beijing, China, p. 791-794.

28. Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Садовников С. А., Скороходов В. Н. Генерация хаотических широкополосных импульсов микроволнового диапазона на основе ЛБВ-автогенератора // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23, № 3. С. 106-112.

29. Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Рыскин Н. М., Шигаев А. М. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 5. С. 604-610.

30. Гришин С. В., Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Скороходов В. Н., Шараевский Ю. П. Генерация хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой системе на основе клистронного усилителя мощности и нелинейной линии задержки на магнитостатических волнах // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 2. С. 62-69.

31. Ергаков В. С., Моисеев М. А. Двухрезонаторный генератор с запаздывающей обратной связью // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, вып. 5. С. 962-967.

32. Афанасьева В. В., Лазерсон А. Г. Динамический хаос в двухрезонаторных клистронных автогенераторах с запаздывающей обратной связью // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. № 3. С. 88-99.

33. Denisov G. G., Bratman V. L., Phelps A. D. R., Samsonov S. V. Gyro-TWT with a Helical Operating Waveguide: New Possibilities to Enhance Efficiency and Frequency Bandwidth // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, № 3. P. 508-518.

34. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Самсонов С. В., Кросс А. У., Фелс А. Д. Р., Хе В. Высокоэффективные широкополосные gyro-ЛБВ и gyro-ЛЮВ со спирально-гофрированными волноводами // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 104-117.

35. Денисов Г. Г., Богдашов А. А., Гачев И. Г., Мишакин С. В., Самсонов С. В., Соколов Е. В., Солянова Е. А., Тай Е. М. Мощные широкополосные усилители на основе gyro-ЛБВ // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20, № 5. С. 28-33.

36. Анисимова Ю. В., Воронцов Г. М., Залогин Н. Н., Кислов В. Я., Мясин Е. А. Шумотрон // Радиотехника. 2000. № 2. С. 19-25.

37. Залогин Н. Н., Кислов В. Я., Кислов В. В. Возбуждение широкополосных шумов в ЛБВ, охваченной обратной связью // Радиотехника. 2005. № 12. С. 46-50.

38. Bell D. C., Narayanan R. M. Theoretical aspects of radar imaging using stochastic waveforms // IEEE Trans. Signal Process. 2001. V. 49, No. 2. P. 394-400.

39. Kulpa K. Signal Processing in Noise Waveform Radar. Boston, London : Artech House, 2013.

40. Anza S., Vicente C., Gil J., Mattes M., Wolk D., Wochner U., Boria V.E., Gimeno B., Raboso D. Prediction of multipactor breakdown for multicarrier applications: The quasi-stationary method // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 2012. V. 60, № 7. P. 2093-2105.

41. Qian C., Ding D., Bi J., Chen R. Numerical Analysis of Multi-Carrier Microwave Breakdown in Waveguide Components // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016. V. 26, No. 2. P. 77-79.

42. Wang X., Shen J., Wang J., Song Q., Wang Z., Li Y., Wang R., Hu T., Xia Y., Sun Q., Yin X., Cui W., Zhang H., Zhang X., Liu C., Li C., Ran L. Monte Carlo Analysis of Occurrence Thresholds of Multicarrier Multipactors // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 2017. V. 65, № 8. P. 2734 - 2748.

43. Jordan U., Semenov V. E., Anderson D., Lisak M., Olsso T. Microwave breakdown in air for multi-carrier, modulated or stochastically time varying RF fields // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 861-867.

44. Converse M., Bond E. J., Veen B. D., Hagness C. A computational study of ultra-wideband versus narrowband microwave hyperthermia for breast cancer treatment // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2006. V. 54, № 5. P. 2169-2180.

45. Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, № 3. Art.no. 033101.

46. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashov A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. 24-84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, № 1. P. 67-72.

47. Зайцев Н. И., Завольский Н. А., Запелалов В. Е., Иляков Е. В., Кулагин И. С., Лыгин В. К., Моисеев М. А., Нечаев В. Е., Петелин М. И., Розенталь Р. М. Десятимегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 914-918.

48. Zaitsev N. I., Ginzburg N. S., Ilyakov E. V., Kulagin I. S., Lygin V. K., Manuilov V. N., Moiseev M. A., Rosenthal R. M., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. X-Band High-Efficiency Relativistic Gyrotron // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30, № 3. P. 840-845.

49. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Gol'denberg A., Luchinin A., Lygin V., Zavolsky N., Denisov G., Bogdashov A., Rodin Yu., Holooptsev V., Pavlov N., Plotnikov I. Gyrotron compact system for materials processing // Proc. 26th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, Toulouse, France, 2001, p. 5.156.

50. Bratman V. L., Idehara T., Kalynov Yu. K., Manuilov V. N., Samsonov S. V., Zavolsky N. A. Design of a Powerful and Compact THz Oscillator // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2006. V. 27, № 8. P. 1063-1071.

51. Extreme Ocean Waves, edited by E. Pelinovsky and C. Kharif. – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, 2008.

52. Onorato M., Residori S., Bortolozzo U., Montina A., Arecchi F.T. Rogue waves and their generating mechanisms in different physical contexts // Phys. Reports. 2013. V. 528, № 2. P. 47-89.

53. Akhmediev N., Kibler B., Baronio F. et al. Roadmap on optical rogue waves and extreme events // J. Opt. 2016. V. 18, № 6. Art. no. 063001.

54. Solli D.R., Ropers C., Koonath P., Jalali B. Optical rogue waves // Nature. 2007. V. 450. P. 1054-1058.

55. Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V., Zhelezov I. V. Time-domain theory of gyrotron traveling wave amplifiers operating at grazing incidence // Physics of Plasmas. 2015. V. 22, № 1. Art.no. 013112.

56. Засыпкин Е. В., Гачев И. Г., Антаков И. И. Экспериментальное исследование гироклистрона с высшим типом колебаний TE_{021} в резонаторах в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 341-350.

57. 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.5680-5683.

58. 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 // Physics of Plasmas. 2015. V. 22, № 11. Art.no. 113111.

59. 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 Transactions on Electron Devices. 2014. V. 61, № 12. P. 4264-4267.

60. Кислов В. Я., Мясин Е. А., Залогин Н. Н. О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 10. С. 2160-2168.

61. Кальянов Э. В. Каскадные генераторы с управляемым спектром колебаний // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41, № 9. С.1120-1124.

Публикации автора по теме диссертации

1*. Гинзбург Н. С., Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кулагин И. С., Розенталь Р. М. Наблюдение автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне с запаздывающей обратной связью // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 9. С.85-91.

2*. Rozental R. M., Zaitsev N. I., Ilyakov E. V., Kulagin I. S., Ginzburg N. S. Nonstationary Processes in an X-Band Relativistic Gyrotron With Delayed Feedback // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. V. 32, № 2. P. 418-421.

3*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кулагин И. С. Управление спектром генерации гиротрона с внешними отражениями в режиме возбуждения нескольких продольных мод // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 1. С. 82-85.

4*. Rozental R. M., Ginzburg N. S., Glyavin M. Y., Sergeev A. S. Novel Source of the Chaotic Microwave Radiation Based on the Gyro-Backward-Wave Oscillator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. V. 54, № 6. P. 2741-2744.

5*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Сергеев А. С. Перестройка периода автомодуляции в релятивистской ЛОВ с сильными отражениями // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 12. С.1043-1047.

6*. Ginzburg N. S., Rozental R. M., Sergeev A. S., Zotova I. V. Time-domain model of gyroklystrons with diffraction power input and output // Physics of Plasmas. 2016. V.23, № 3. Art.no. 033108.

7*. Ginzburg N. S., Rozental R. M., Sergeev A. S., Zotova I. V., Tarakanov V. P. Chaotic Millimeter Wave Generation in a Helical-Waveguide Gyro-TWT With Delayed Feedback // Physics of Plasmas. 2016. V. 23, № 10. Art.no. 103106.

8*. Гинзбург Н. С., Розенталь Р. М., Сергеев А. С., Зотова И. В. Генерация хаотических сигналов миллиметрового диапазона на основе широкополосных гироусилите-

лей с винтовым гофрированным волноводом // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 3. С. 50-56.

9*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Сергеев А. С., Зотова И. В., Федотов А. Э., Тараканов В. П. Генерация широкополосного хаотического излучения в гиротронах в режиме перекрытия высокочастотного и низкочастотного резонансов // ЖТФ. 2017. Т. 87, № 10. С. 1555-1561.

10*. Ginzburg N. S., Rozental R. M., Sergeev A. S., Fedotov A. E., Zotova I. V., Tarakanov V. P. Generation of Rogue Waves in Gyrotrons Operating in the Regime of Developed Turbulence // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. Art.no. 034801.

11*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Исаева О. Б., Рожнев А. Г., Сергеев А. С. Режимы развитого хаоса в гиротронах и гироусилителях с запаздывающей обратной связью // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 6. С. 1760102.

12*. Rozental R. M., Isaeva O. B., Ginzburg N. S., Zotova I. V., Sergeev A. S., Rozhnev A. G. Characteristics of chaotic regimes in a space-distributed gyroklystron model with delayed feedback // Rus. J. Nonlin. Dyn. 2018. V. 14, № 2. P. 155-168.

13*. Rozental R. M., Zotova I. V., Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Tarakanov V. P. Chaotic Generation in a W-Band Gyrokystron With Delayed Feedback // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. V. 46, № 7. P.2470-2474.

14*. Ginzburg N. S., Denisov G. G., Vilkov M. N., Zotova I. V., Sergeev A. S., Rozental R. M., 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 Transactions on Electron Devices. 2018. V. 65, № 6. P. 2334 - 2339.

15*. Rozental R., Glyavin M., Luchinin A., Ginzburg N., Link G., Thumm M. Excitation of Several Axial Eigenmodes in Gyrotrons with Mismatched Window - Simulations and Experimental Studies // IEEE International Conference on Plasma Science, 20-23 June 2005, Monterey, CA, USA, p. 208.

16*. Ginzburg N. S., Zaitsev N. I., Ilyakov E. V., Kulagin I. S., Novozhilova Yu. V., Rozental R. M., Sergeev A. S. Experimental observation of chaotic dynamics in powerful relativistic oscillators // Proceedings of the 5th International Workshop «Strong Microwaves in Plasmas», 1-9 August, 2002, Nizhny Novgorod, Russia, v.1, p.144-150.

17*. Rozental R. M., Zaitsev N. I., Ginzburg N. S., Ilyakov E. V., Kulagin I. S. Experimental investigation of the non-stationary phenomena in the gyrotron with end reflections // Digest of 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, September 29 - October 3, 2003, Otsu, Japan, p.407-408.

18*. Ginzburg N. S., Ilyakov E. V., Kulagin I. S., Rozental R. M., Zaitsev N. I. Self-modulation spectrum variation in gyrotrons with Bragg type output reflector // Conference Digest of the Joint 29th International Conference Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics, 27 September - 1 October 2004, Karlsruhe, Germany, p.631-632.

19*. Rozental R., Glyavin M., Ginzburg N., Sergeev A. First observation of the chaotic oscillations in the K-band gyro-BWO // IEEE International Conference on Plasma Science, 20-23 June 2005, Monterey, California, p.113.

20*. Rozental R. M., Glyavin M. Yu., Ginzburg N. S., Sergeev A. S. Novel Source of the Chaotic Microwave Radiation Based on the Gyro Backward-Wave Oscillator // European Microwave Conference, 4-6 October 2005, Paris, France, V.2, p.1-3.

21*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. Нестационарная теория гироклистронов с дифракционным вводом и выводом излучения // Тезисы докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 29 февраля - 3 марта 2016 г., Н.Новгород, с.81.

22*. Розенталь Р. М., Сергеев А. С. Сверхширокополосная шумовая генерация в гиротронах с большой надкритичностью // Тезисы докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 29 февраля - 3 марта 2016 г., Н.Новгород, с.82.

23*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. Генерация широкополосного хаотического излучения миллиметрового диапазона в гиросилителях с запаздывающей обратной связью // Материалы XI международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС), 3-8 октября 2016 г., Саратов, с.49.

24*. Розенталь Р. М., Сергеев А. С. Генерация широкополосного шумоподобного излучения субтерагерцового диапазона в гиротроне с большой надкритичностью // Сборник статей V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 30 мая - 2 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Т.2, с.149-152.

25*. Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Розенталь Р. М., Сергеев А. С. Генерация хаотических сигналов на основе широкополосных гиросилителей миллиметрового диапазона с винтовым гофрированным волноводом // Сборник статей V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 30 мая - 2 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Т.1, с.125-128.

26*. Ginzburg N. S., Rozental R. M., Sergeev A. S., Fedotov A. E., Zotova I. V., Tarakanov V. P. Rogue waves and ultra broadband generation in gyrotrons. // 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 27 August - 1 September 2017, Cancun, Mexico, p.1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8067064.

27*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. Формирование гигантских импульсов в условиях развитой турбулентности в пространстве взаимодействия гиротронов // Труды XVI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова, 4-9 июня 2017 г., Москва, с.45-46.

28*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Исаева О. Б., Рожнев А. Г., Сергеев А. С. Режимы развитого хаоса в гиротронах и гиросилителях с запаздывающей обратной связью // Труды XVI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова, 4-9 июня 2017 г., Москва, с.42-44.

29*. Zotova I. V., Ginzburg N. S., Morozkin M. V., Rozental R. M., Sergeev A. S., Fedotov A. E., Tarakanov V. P. Generation of rogue waves in gyrotrons with high excess over the threshold // Proceedings of 10th International Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications», July 17–22, 2017, Nizhny Novgorod - Moscow, Russia, p. 196-197.

30*. Исаева О. Б., Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С., Рожнев А. Г. Динамика распределенной модели гироклистрона с запаздывающей обратной связью // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 5–10 февраля 2018, Саратов, с.27-28.

31*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. Хаотическая генерация со «сплошным» спектром на основе двух связанных винтовых гиросилителей // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 5–10 февраля 2018, Саратов, с.28-29.

32*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С., Морозкин М. В. Формирование «волн-убийц» в гиротронах и создание условий для их генерации в реальных системах // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 5–10 февраля 2018, Саратов, с.45-46.

33*. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С., Морозкин М. В. Источники шумоподобного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе гиротронов // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 5–10 февраля 2018, Саратов, с.46-47.

34*. Rozental R. M., Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V., Tarakanov V. P. Millimeter and THz range chaotic ultra-wideband generation in gyrotrons // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference, London, 2017, pp. 1-2, DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289536.

Розенталь Роман Маркович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
АВТОМОДУЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ В ПРИБОРАХ
ГИРОРЕЗОНАНСНОГО ТИПА**

Автореферат

Подписано к печати 11.07.2018. Формат $60 \times 90^{1/16}$.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 65(2014).

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