

УДК 621.373

МАЗЕРЫ НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

*А. Л. Гольденберг, Г. Г. Денисов, В. Е. Запевалов,
А. Г. Литвак, В. А. Флягин*

Мазеры на циклотронном резонансе – гиротроны и гироклистроны – как источники излучения большой энергии полностью доминируют в диапазоне миллиметровых волн и всё ещё имеют значительные резервы дальнейшего повышения мощности и КПД. Современные задачи создания непрерывных мегаваттных гиротронов сопряжены с решением ряда проблем, среди которых ключевой является проблема выходного окна. Приведены новые результаты исследования гиротронов и гироклистронов в России и параметры различных модификаций гиротронов для нагрева плазмы и технологических применений и гироклистронов для радаров диапазона миллиметровых волн.

1. ВВЕДЕНИЕ

Механизм неустойчивости, на котором основана работа мазеров на циклотронном резонансе (МЦР), был открыт почти 40 лет назад несколькими авторами в разных странах, независимо и почти одновременно, но лишь один из первооткрывателей – А. В. Гапонов-Грехов – занялся последовательным воплощением новой идеи в электронику больших мощностей. В настоящее время МЦР, прежде всего генераторы – гиротроны, намного превосходят все другие источники излучения диапазона миллиметровых волн по выходной мощности и эффективности. Благодаря современным задачам, таким как создание генераторов мегаваттного уровня мощности в непрерывном режиме, гиротроны до сих пор остаются объектом интенсивного исследования. Предлагаемый обзор основан, главным образом, на исследованиях и разработках МЦР, выполненных в Институте прикладной физики (Нижний Новгород) и Научно-производственном предприятии “ГИКОМ” (Нижний Новгород – Москва).

1.1. Принципы

Общее название мазеры на циклотронном резонансе используется для генераторов, основанных на индуцированном циклотронном излучении электронов, вращающихся в однородном статическом магнитном поле [1].

МЦР работают на частоте, близкой к циклотронной частоте (гиросчастоте)

$$\omega_B = \frac{e B}{m_0 \gamma} \quad (1)$$

или ее второй, третьей, ... гармонике. В (1) e и m_0 — заряд и масса покоя электрона, B — магнитное поле, γ — релятивистский фактор Лоренца ($(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, где v — скорость электрона и c — скорость света). Характерной особенностью МЦР является то, что в нем электронный пучок взаимодействует с быстрой (незамедленной) волной, фазовая скорость которой $v_{ph} > c$. Высокочастотное излучение возбуждается или усиливается благодаря группировке электронов в такой фазе их вращения в магнитном поле, в которой это вращение тормозится высокочастотным полем, отбирающим часть энергии вращения электронов. Фазовая группировка электронов в однородном магнитном поле происходит благодаря релятивистской зависимости массы электрона от его скорости, приводящей к ускорению вращения электрона, теряющего свою энергию, и, напротив, к замедлению вращения электрона, приобретающего энергию, как это иллюстрируется рис. 1.

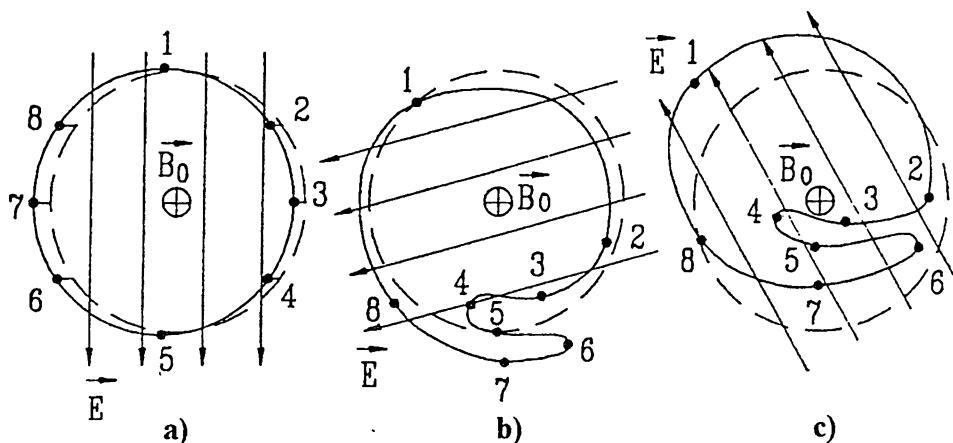


Рис. 1. Стадии взаимодействия электронов с вращающимся ВЧ полем в условиях циклотронного резонанса, когда частота излучения $\omega \approx \omega_B$. Для наглядности электроны представлены вращающимися вокруг одного центра. Вначале все электроны имеют одинаковую вращательную энергию (одинаковый радиус вращения) и равномерно распределены по фазе вращения, находясь на штриховой окружности. Изменение направления ВЧ поля от стадии к стадии означает, что ω немного меньше, чем ω_B . а) Начальная модуляция по энергии вращения; б) Образование фазового сгустка; в) Торможение фазового сгустка.

Такое взаимодействие может быть осуществлено в ВЧ поле практически произвольной структуры, например, в поле объёмного резонатора или

волновода, поэтому МЦР способны генерировать на коротких волнах значительно большие мощности, чем приборы с электродинамическими системами, имеющими характерные размеры, меньшие чем рабочая длина волны, т.е. работающие на поверхностных волнах или колебаниях в малых зазорах. Разумный диапазон частот мощных непрерывных МЦР — от нескольких гигагерц до примерно 300 ГГц (на основной гирочастоте), с верхней границей, определяемой доступностью сверхпроводящих магнитов с магнитным полем более 10 Т. Для пояснения способности МЦР генерировать большие мощности рассмотрим работу генератора-гиротрона, схема которого показана на рис. 2.

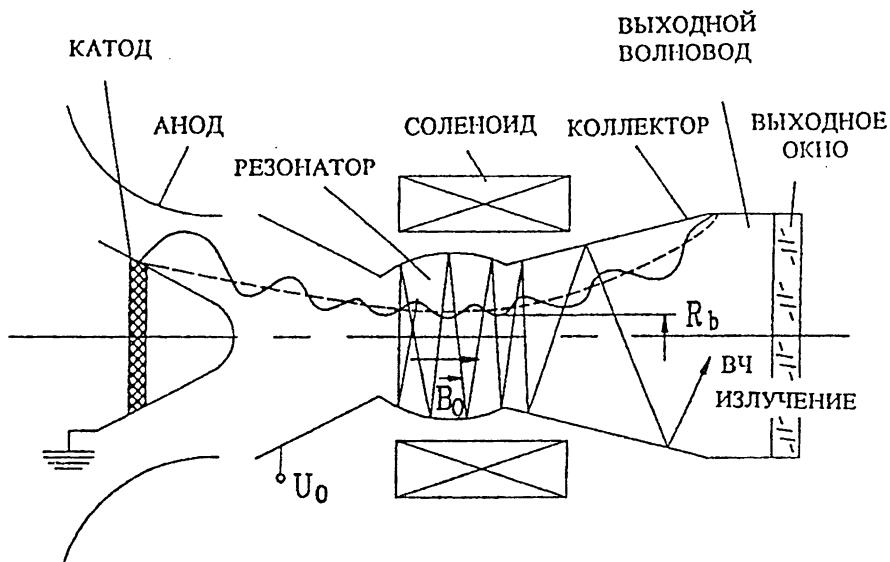


Рис. 2. Простейшая схема гиротрона (без преобразования рабочей моды). Штриховая линия — линия магнитного поля; R_b — средний радиус трубчатого электронного пучка; U_0 — напряжение пучка. Траектория электрона показана волнистой линией (исключая азимутальный дрейф), а ломаной линией — один из лучей, формирующих рабочую моду резонатора и волну выходного волновода.

В нём взаимодействие электронного пучка с ВЧ полем происходит в резонаторе, находящемся в области однородного участка магнитного поля соленоида. Электронный пучок формируется электронной пушкой магнетронного типа, находящейся в относительно слабом поле соленоида. Начальная вращательная скорость выходящих из прикатодной области электронов

$$v_{\perp c} = \frac{|\vec{E}_c \vec{B}_c|}{B_c^2} \quad (2)$$

увеличивается адиабатически

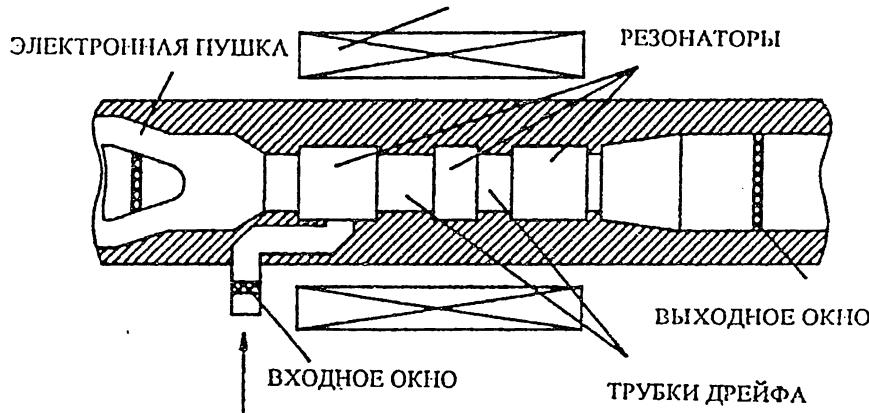
$$v_{\perp} = v_{\perp c} \sqrt{B/B_c} \quad (3)$$

по мере их движения к резонатору. Резонатор возбуждается на частоте на какой-либо TE_{mpq} его моде, удовлетворяющей условию синхронизма

$$1 - \frac{n\omega_B}{\omega} \pm \frac{v}{v_{ph}} \ll 1 \quad (4)$$

($n = 1, 2, \dots$ — номер гармоники гирочастоты). В принципе рабочая мода может быть очень высокой с обоими индексами, m и p , много большими единицы. (Причины, позволяющие селективно возбудить определённую высокую моду TE_{mpq} среди десятков и сотен других мод резонатора, будут пояснены позже). Этим ослабляются обычные для других приборов ограничения на размеры электронного пучка и резонатора гиротрона, чем обеспечивается его большое преимущество по выходной мощности на коротких волнах. Из резонатора излучение выводится в виде волны TE_{mp} , сохраняющей поперечную структуру рабочей моды. Электроны, отдавшие часть своей энергии, оседают на охлаждаемом коллекторе, в котором распределение магнитного поля и профиль поверхности подобраны с учётом допустимой тепловой нагрузки. По своему устройству каждому прибору типа МЦР может быть поставлен в соответствие один из приборов с прямолинейным электронным пучком.

СОЛЕНОИД



ВХОДНОЙ СИГНАЛ

Рис. 3. Схема трёхрезонаторного гироклистрона. Все резонаторы работают на моде с одинаковой поперечной структурой поля. В первом резонаторе происходит модуляция электронного пучка, второй обеспечивает его эффективную группировку, в третьем — генерируется усиленное ВЧ излучение.

Таким образом, аналогом гиротрона является монотрон, но также существуют гироклистрон (рис. 3), гиро-ЛБВ и пр. Среди них гиротрон и гироклистрон выделяются тем, что полнее исследованы и разработаны для промышленного производства. Хотя гиротрон и гироклистрон основаны

на релятивистском эффекте, их естественный диапазон энергии электронов — слаборелятивистский, поскольку при электронных скоростях v , близких к c , сравнительно небольшие изменения энергии электронов в процессе их взаимодействия с ВЧ полем приводят к нарушению условия синхронизма (4) и, следовательно, к низкому КПД. Специфические проблемы МЦР, работающих в условиях сильного релятивистского эффекта при $\gamma \geq 2$, в данном обзоре не рассматриваются.

1.2. Краткая история

Механизм циклотронной мазерной неустойчивости был открыт независимо и почти одновременно в 1958–1959 гг. Твиссом, Шнейдером и Гапоновым [2] и вскоре подтверждён в электронных экспериментах, проведённых группой Гапонова [3]. Этот начальный период исследования МЦР описан в обзора [1, 4]. В последующие годы Гапонов и его сотрудники выполнили обширные теоретические и экспериментальные исследования МЦР, особенно гиротронов и гироклистронов (см. обзоры [5, 6]). После первых экспериментов при переходе от самых низких рабочих мод резонатора TE_{11} или TE_{01} к более высоким модам мощных приборов требовалось обеспечить их устойчивое селективное возбуждение. Это заставило обратиться к новым электродинамическим решениям в виде квазиоптических систем, свободно излучающих любую распространяющуюся моду. Практически каждый элемент мощного МЦР принципиально отличается или работает в режиме отличном от элементов других мощных электронных приборов, поэтому на стадии перехода от исследований к разработкам особое внимание было уделено методам расчёта и экспериментальной оптимизации электронной пушки, резонатора, магнитной системы, внутренней и внешней электродинамической системы, включая выходное окно, и коллектора. Вскоре основные принципы создания мощных гиротронов были разработаны. В начале 70-х годов в Нижнем Новгороде были изготовлены первые промышленные гиротроны для экспериментов по нагреву плазмы на электронно-циклотронном резонансе в термоядерных установках в Москве и Санкт-Петербурге. Это способствовало оживлению интереса к гироприборам в США и Европе. В 70-х годах стал образовываться мировой рынок гиротронов, прежде всего, предназначенных для термоядерных экспериментов. Первыми на него вышли американские фирмы Varian и Hughes Aircraft. В начале 90-х российская фирма “ГИКОМ” начала предлагать гиротроны, превосходившие по своим параметрам американские. В настоящее время российские промышленные гиротроны используются в 15 лабораториях в Германии, Японии, Италии, Швейцарии, США и других странах. Продолжающиеся исследования и разработка мощных МЦР в США, Японии, Франции и других странах стимулируются целым рядом новых перспективных приложений.

1.3. Приложения

По уже сложившейся традиции гиротроны используются в диапазоне миллиметровых волн, когда необходима средняя ВЧ мощность порядка или выше 1–10 кВт. Их применяют благодаря специфическим свойствам излучения этого диапазона, а именно:

- возможности распространения в относительно плотной плазме с концентрацией электронов $n_e \geq 10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и взаимодействия с ней;
- возможности концентрации и дистанционного управления посредством зеркал подобно световому излучению;
- значительному поглощению практически во всех конденсированных средах, в том числе и в чистых кристаллических материалах.

Благодаря этому мощные непрерывные или квазинепрерывные гироприборы могут быть использованы для нагрева термоядерной плазмы, плазмохимии, дальней (космической) радиолокации, высокотемпературной обработки ряда материалов, спектроскопии сверхвысокого разрешения и ряда других применений [7]. Электронно-циклотронный нагрев (ЭЦН) плазмы в термоядерных установках, практически невозможный без гиротронов, является главной областью их применения. Он устанавливает наиболее высокие требования в отношении мощности и эффективности на частотах примерно от 100 ГГц до 170 ГГц. Например, по программе “Международный термоядерный экспериментальный реактор” (ITER) для системы ЭЦН плазмы с непрерывной выходной мощностью около 100 МВт требуется разработать непрерывный гиротрон на частоте 170 ГГц с выходной мощностью 1 МВт и КПД около 40%. Новыми областями применения мощных гиротронов и гироклистронов может явиться локация космического мусора (частей спутников) и крупномасштабный, вплоть до глобального, мониторинг атмосферной активности [7].

2. ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЦР

Основные проблемы гироприборов, прежде всего гиротронов, связаны с получением большой выходной мощности. Эти проблемы наиболее важны для гиротронов систем ЭЦН при уровне мощности около 1 МВт в непрерывном или квазинепрерывном режиме, в которых почти каждый узел (катод, резонатор, выходное окно и коллектор) должен работать при тепловых нагрузках, близких к предельным. Более того, высокий уровень мощности заставляет уделять большое внимание и эффективности всей

системы как при преобразовании энергии электронов в ВЧ излучение, так и при транспортировке и использовании излучения.

2.1. Электронная пушка

Электронная пушка (см. рис. 2 и 3) формирует трубчатый моноэнергетический пучок вращающихся электронов [8].

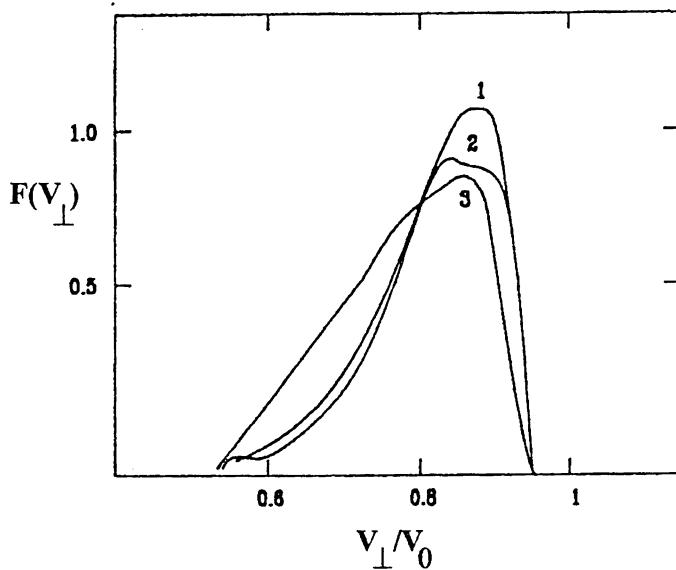


Рис. 4. Функции распределения электронов $F(v_{\perp})$ в гиротроне при различных токах пучка: 1 — 4,4 А, 2 — 20 А, 3 — 49 А. Увеличение разброса скоростей Δv_{\perp} , ведущее к снижению КПД, является результатом трудно контролируемых процессов при большой плотности пространственного заряда, вероятно включающих неустойчивости, обусловленные провисанием потенциала пучка, отражением электронов от магнитной пробки и захватом их в ловушку, диокотронным эффектом и эффектом отрицательной массы [10].

Поскольку в МЦР именно энергия, связанная с вращательным (осцилляторным) движением электронов, преобразуется в ВЧ излучение, вращательные скорости электронов v_{\perp} должны значительно превышать их поступательные скорости v_{\parallel} . Это обеспечивается адиабатической накачкой осцилляторной энергии электронов согласно (2) на их пути к максимальному магнитному полю в резонаторе. Но величина v_{\perp}/v_{\parallel} ограничена сверху, прежде всего, из-за разброса вращательных скоростей в интервале $\left[\bar{v}_{\perp} - \frac{\Delta v_{\perp}}{2}, \bar{v}_{\perp} + \frac{\Delta v_{\perp}}{2}\right]$, являющегося неотъемлемым свойством пушек такого типа. Разброс скоростей Δv_{\perp} обусловлен рядом причин, среди

которых наиболее важны неоднородности электрических и магнитных полей на катоде, шероховатость его поверхности (существенна даже неоднородность порядка 1 мкм) и эффекты, связанные с пространственным зарядом электронного пучка. Типичная функция распределения $F(v_{\perp})$ и её эволюция при увеличении тока пучка показаны на рис. 4. Из-за разброса скоростей Δv_{\perp} электроны попадают в область максимального поля в резонаторе с большим разбросом поступательных скоростей v_{\parallel} . Электроны, имеющие максимальные начальные скорости $v_{\perp c}$, могут даже отразиться от магнитной пробки. При отсутствии отражённых частиц соотношение

$$t_{\perp} = \frac{\bar{v}_{\perp}^2}{v_0^2} \leq \frac{1}{1 + \Delta v_{\perp}/\bar{v}_{\perp}}, \quad (5)$$

($v_0 = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2}$ — полная скорость электронов) определяет эффективность электронной пушки. Поскольку гиротроны обычно работают в режимах, когда соотношение (5) близко к равенству, небольшая часть электронов всё же отражается от магнитной пробки и оказывается запертой в ловушке между пробкой и катодом. В этой области они могут накапливаться и вызвать некоторые виды неустойчивостей электронного пучка, приводящие к ухудшению, а иногда и к нарушению нормальной работы. Для того, чтобы избежать этих нежелательных явлений или минимизировать их, приходится уменьшать эффективность пушки t_{\perp} . Некоторые другие отрицательные эффекты разброса скоростей рассматриваются в подразделах 2.3 и 2.6. Разброс скоростей является основной причиной, по которой КПД гиротронов обычно не превышает 40% вместо 50–60% теоретически возможных при моноскоростном ($\Delta v_{\perp} = 0$) пучке [10]. Возможности оптимизации электронной пушки гиротрона ограничены тем, что катод работает в режиме температурного ограничения тока эмиссии (не ограничения тока пространственным зарядом пучка как в традиционных электронных приборах), вследствие чего локальная плотность тока эмиссии зависит от состояния поверхности эмиттера и, в принципе, от времени. При заданном диаметре катода максимальный ток электронной пушки практически слабо зависит от рабочей частоты гиротрона. Разработаны надёжные катоды, обеспечивающие получение пучков с мощностью более 3 МВт в непрерывном режиме, для мегаваттных гиротронов на частотах до 170 ГГц.

2.2. Резонатор

В резонаторе электронный пучок возбуждает одну из его мод TE_{mpq} и отдаёт ей часть своей осцилляторной энергии. В простейшем случае излучение из цилиндрического или слабонерегулярного резонатора [11] гиротрона, изображённого на рис. 2, обладает структурой волноводной

моды TE_{mp} . Обычно в таких цилиндрических резонаторах возбуждается наиболее высокодобротная мода с одной продольной вариацией поля TE_{mp1} . Кроме более высокой добротности, чем моды с $q \geq 2$, моды с $q = 1$ менее чувствительны к разбросу скоростей электронов, как это следует из (4), поскольку при их большей фазовой скорости $v_{ph} = \pi/qL$ (где L — длина резонатора) доплеровское уширение циклотронного резонанса практически несущественно. Высокая эффективность взаимодействия электронного пучка с ВЧ полем может быть обеспечена только при достаточно большой длине резонатора L , обычно от 4 до 10 длин волн [12]. Выбор рабочей моды и длины резонатора определяется условием, связывающим заданные частоту ω , выходную мощность P_{out} и максимальную допустимую плотность омических потерь в резонаторе

$$p_{ohm} \leq \frac{5\chi dL}{\lambda^2 R_{cav}^2 [1 - (m/kR)^2]} P_{out}, \quad (6)$$

где эмпирический коэффициент $\chi \approx 1,5$, λ — длина волны, α — глубина скин-слоя, R_{cav} — радиус резонатора, $k = \omega/c$ — волновое число. В резонаторе могут возбуждаться либо симметричные TE_{op1} , либо несимметричные TE_{mp1} моды (см. рис. 5).

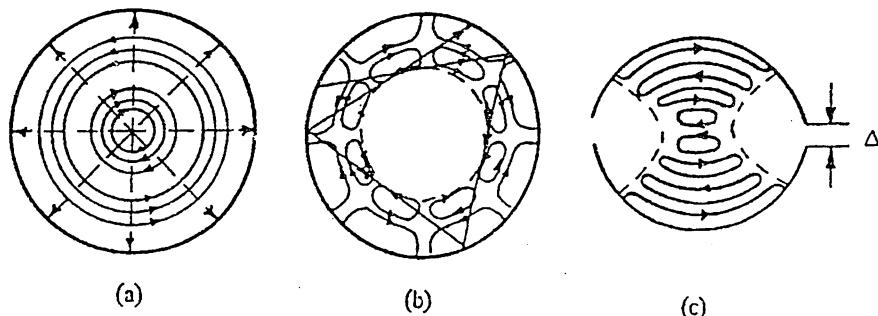


Рис. 5. Поперечные сечения резонаторов и структуры ВЧ электрического поля различных мод: а) симметричная мода (здесь TE_{02}) образуется лучами, проходящими через центр резонатора. б) Несимметричная мода (здесь TE_{42}) формируется лучами касательными к внутренней каустике. Трубчатый пучок наилучшим образом связан с такой модой, когда его радиус R_b близок к радиусу каустики $R_{caus} = m\lambda/2\pi$. в) Мода TE_{14} в щелевом резонаторе. Гиротрон с таким резонатором плавно перестраивается по частоте при изменении ширины щели Δ .

Симметричные моды имеют минимальные ВЧ омические потери и преимущественно используются в гиротронах умеренной мощности на сравнительно низких частотах. В мощных высокочастотных лампах, в которых радиус электронного пучка $R_b \gg \lambda$, коэффициент его связи

$$G_{mp} = \frac{J_{m\pm 1}^2(kR_b)}{(k^2 R_{cav}^2 - m^2) J_m^2(kR_{cav})} \quad (7)$$

с любой симметричной модой много меньше, чем с несимметричной модой, имеющей радиус каустики $R_{caus} = m/k$, близкий к R_b . Знаки “-” и “+” в уравнении (5) означают, что возбуждённая несимметричная мода вращается либо в направлении вращения электронов, либо в обратном направлении, соответственно. Несимметричные моды с индексами $m \gg 1$ и $p > 1$ используются в гиротронах мегаваттного уровня мощности. Изменяя магнитное поле резонатора соленоида и напряжение пучка, можно возбудить несколько соседних мод одну за другой со скачком рабочей частоты. Излучение резонатора, имеющее сложную структуру поля, для дальнейшей его транспортировки должно быть преобразовано в волновой пучок. Это осуществляется внутри гиротрона посредством встроенного квазиоптического преобразователя мод. В резонаторе с продольными щелями наивысшей добротностью (рис. 5c) обладают моды TE_{1p1} . Щелевой резонатор превращается в квазиоптический (типа Фабри-Перо) при ширине щелей в несколько длини волны. В гиротронах с такими резонаторами возможна плавная регулировка частоты путём изменения расстояния между половинами резонатора.

2.2.1. ВЧ мощность и КПД. Как уже отмечалось ранее, в МЦР электронный КПД η_e определяется эффективностью преобразования вращательной энергии электронного пучка в ВЧ излучение η_\perp и КПД электронной пушки t_\perp так, что

$$\eta_e = \eta_\perp t_\perp. \quad (8)$$

Общий КПД η включает, кроме того, коэффициент, определяющий омические ВЧ потери, потери на преобразование мод и их транспортировку. Рассмотрим условия высокоэффективного возбуждения в резонаторе рабочей моды TF_{mp1} , предполагая отсутствие взаимодействия с любой другой модой. Это означает, что электронный пучок достаточно хорошо связан с рабочей модой (см. (7)), отстройка циклотронной частоты ω_B от её резонансной частоты ω оптимальна (несколько процентов), и хотя бы одно из этих условий, совмещение которых обеспечивает самовозбуждение, не выполняется для любой другой моды резонатора. Зоны самовозбуждения и высокоэффективной работы гиротрона показаны на рис. 6 на плоскости “напряжение пучка V – ток пучка I ”. После включения точка пучка движется из начала координат $[V = 0, I = 0]$ к рабочей точке, соответствующей высокоэффективному режиму. Типичные экспериментальные зависимости выходной мощности и КПД мощного гиротрона показаны на рис. 7. Выходная мощность лампы ограничена тепловой перегрузкой либо резонатора (нарушающей неравенство (6)), либо другого узла, либо ухудшением качества электронного пучка при большом токе.

I, произвольные единицы

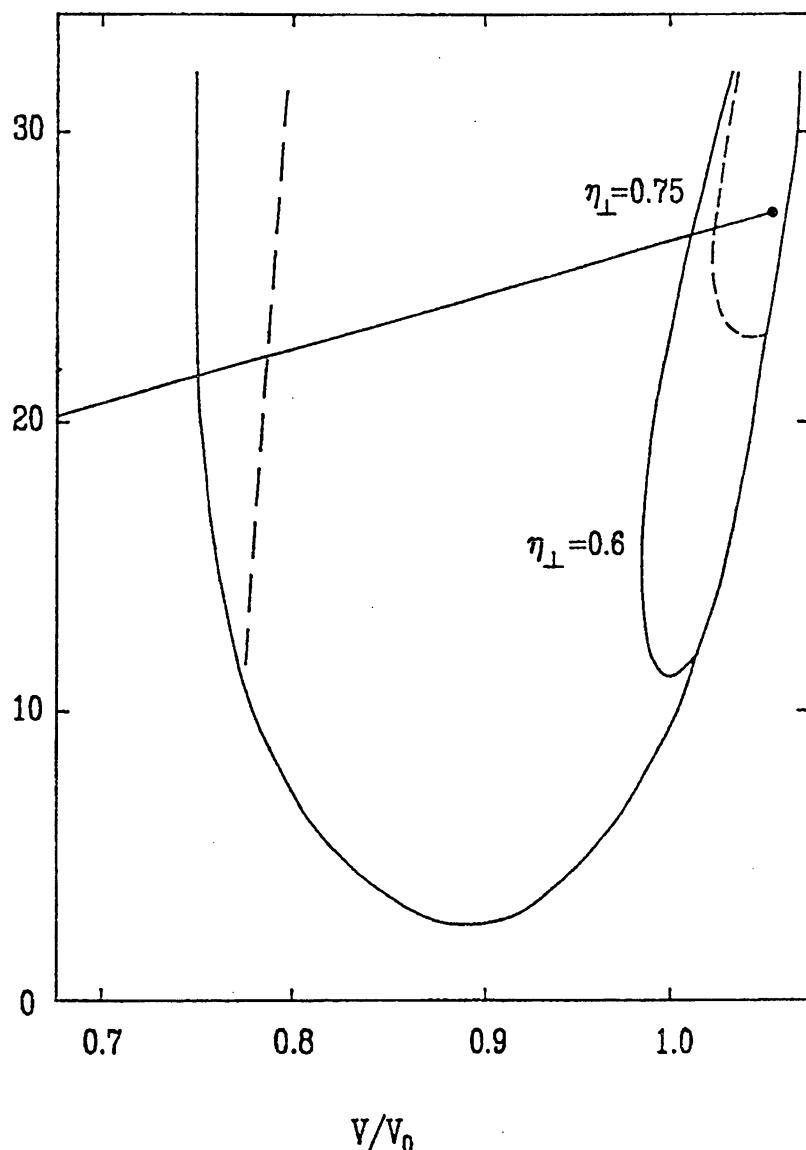


Рис. 6. Расчёчная зона возбуждения рабочей моды на частоте ω_0 , изображённая на плоскости “напряжение пучка V – ток пучка I ”. Внутри её сплошной линией выделена область высокоеффективной генерации с поперечным КПД $\eta_{\perp} \geq 60\%$ (соответствует электронному КПД $\eta \approx 45\%$) и точка максимального КПД $\eta_{\perp\max} = 75\%$. Наклонная линия изображает изменение параметров пучка при включении гиротрона. Штрихованными линиями показаны те области, из которых рабочая мода вытесняется паразитными модами, близкими по структуре поля к рабочей и отличающимися от неё резонансными частотами $\omega_{p1} = 0,985\omega_0$ и $\omega_{p2} = 1,015\omega_0$.

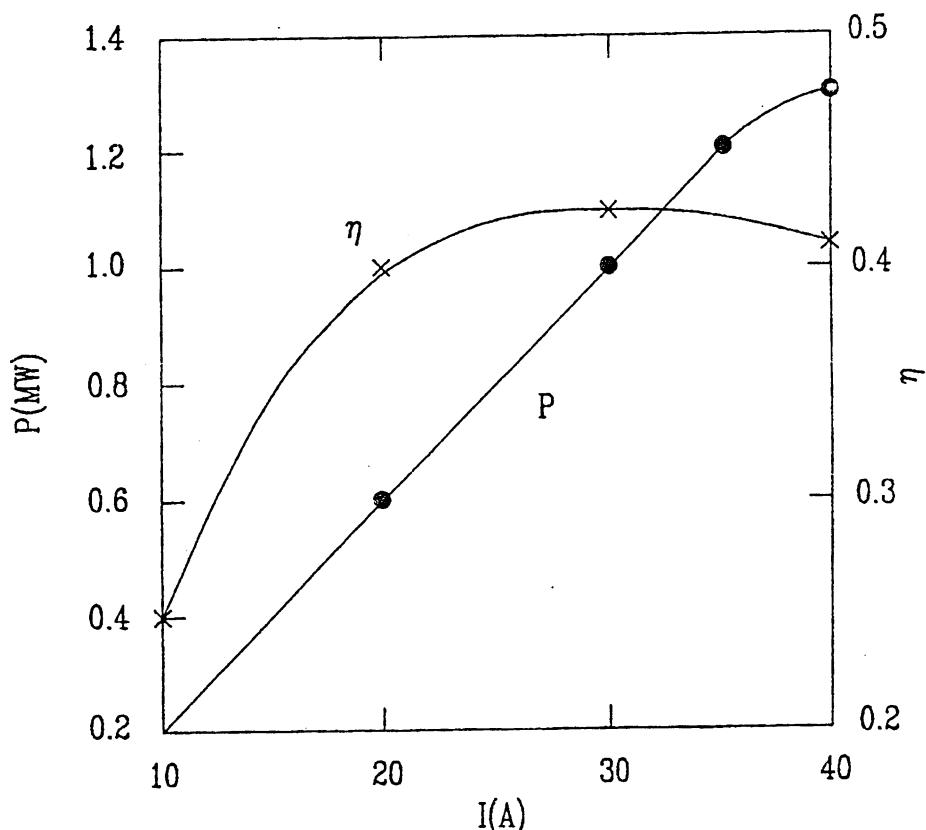


Рис. 7. Зависимость выходной мощности КПД от тока пучка в гиротроне с встроенным преобразователем мод, полученная при испытаниях гиротрона на частоте 110 ГГц при длительности ВЧ импульса 2 с.

Другой причиной, которая может ограничить КПД и выходную мощность лампы, является возбуждение паразитной моды, если селективность резонатора недостаточна.

2.2.2. Селекция мод. Общее число мод TF_{mp} , распространяющихся в волноводе с радиусом R_{cav} , составляет

$$N \cong \left(\frac{kR_{cav}}{2} \right)^2. \quad (9)$$

В мощных высокочастотных гиротронах N достигает сотен мод. Однако существует ряд факторов, обеспечивающих эффективную селекцию мод в обычном гиротроне, а именно:

- электронно-циклотронные мазерные колебания возбуждаются только в полосе частот $\Delta\omega_B$, определяемой временем пролёта электронов через резонатор, обычно $\Delta\omega_B/\omega_B \leq 5\%$;

- возбуждаться могут только моды TE_{mp} , критические (резонансные) частоты которых находятся в пределах полосы $\Delta\omega_B$;
- условие эффективной связи моды с электронным пучком в соответствии с уравнением (7) практически определяет азимутальный индекс m рабочей моды.

Чем выше частота и ВЧ мощность гиротрона, тем больше должно быть отношение радиуса резонатора к длине волны R_{cav}/λ и, соответственно, гуще спектр его собственных мод, так что зоны генерации соседних мод могут перекрываться, как показано на рис. 6. Тогда зона рабочей моды сужается с обеих сторон: и с низко-, и с высокоеффективной. Результаты измерения выходной мощности гиротрона на высокой моде резонатора, в котором было возможно одновременное самовозбуждение двух или более резонаторных мод, показывают, что КПД колебаний в рабочей моде весьма низок (ср. кривую 1 на рис. 8 с другими).

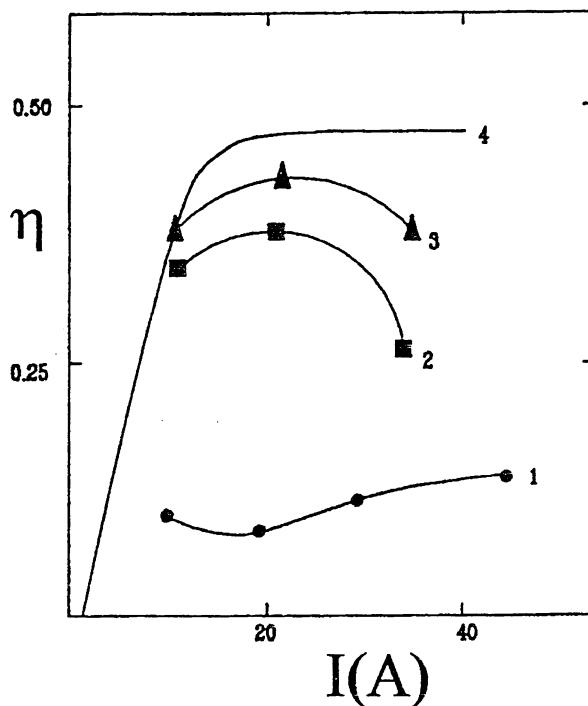


Рис. 8. Зависимость КПД от тока пучка в гиротроне с коаксиальным резонатором на моде $TE_{20,13}$. Кривая 1, снятая без центрального стержня, показывает низкую эффективность генерации из-за конкуренции между рабочей и паразитными модами.

Для обеспечения одномодовой генерации в гиротронах могут использоваться дополнительные методы электродинамической и электронной селекции мод. Электродинамическая селекция направлена на снижение до-

бротности паразитных мод, а электронная — на ослабление их связи с электронным пучком. Взаимодействие мод в гиротроне при токе пучка меньше или порядка оптимального, как правило, имеет характер конкуренции и даже при небольшом преимуществе в инкременте рабочей моды над паразитными, последние эффективно подавляются. Известны несколько методов дополнительной селекции, обеспечивающих повышенную добротность единственной рабочей моды из числа прочих с близкими частотами. Одним из наиболее эффективных из них является использование коаксиального резонатора. Специально подобранная форма центрального стержня позволяет значительно снизить добротность нежелательных мод, в то время как добротность рабочей моды остается практически такой же, как в полом цилиндрическом резонаторе. Рис. 8 иллюстрирует такую селекцию мод в режиме работы на больших мощностях. В экспериментах с короткими импульсами в коаксиальных гиротронах был достигнут максимальный уровень выходной мощности 2,1 МВт [14]. В настоящее время коаксиальные гиротроны считаются потенциальными источниками излучения выходной мощностью около 2 МВт на частотах близких к 150 ГГц и более 1 МВт на частотах около или более 200 ГГц.

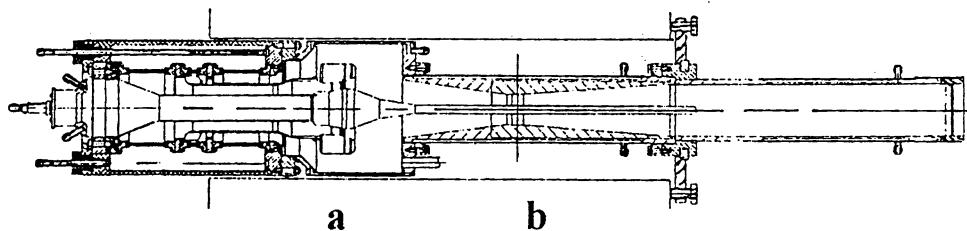


Рис. 9. Экспериментальный короткоимпульсный гиротрон с коаксиальным резонатором и обращённой электронной пушкой. а) Электронная пушка с анодом внутри катода. б) Центр резонатора.

Рис. 9 представляет новый вариант гиротрона, который рассматривается как прототип промышленного коаксиального гиротрона с выходной мощностью более 1 МВт на частоте 140 ГГц. В первых короткоимпульсных экспериментах с такими гиротронами в ИПФ и Центре исследований Карлсруэ (Германия) были получены выходные мощности до 1,5 МВт. В других вариантах гиротронов с дополнительной селекцией мод применяется секционирование электронных пучков (в многолучевых гиротронах [15]) или области взаимодействия с ВЧ полем (в гиротронах со связанными резонаторами [16]), синхронизация внешним сигналом [17] и пр.

2.3. Квазиоптические системы

ВЧ излучение низкочастотных гиротронов умеренной мощности, работающих на сравнительно низких модах TE_{mp1} , где m равно 0 или 1, обычно выводится в виде волноводной моды TE_{mp} . В гиротронах, работающих с более высокими модами, предпочтительно преобразовывать рабочую моду гиротрона в узконаправленный волновой пучок непосредственно внутри лампы, как показано на рис. 10, иллюстрирующем идею квазиоптического встроенного преобразователя. Оснащение коротковолновых гиротронов квазиоптическим преобразователем мод [18] было принципиальным шагом в их разработке. Квазиоптический преобразователь дает возможность:

- использовать очень высокие рабочие моды, необходимые для получения мощного коротковолнового излучения;
- трансформировать рабочую моду в параксиальный волновой пучок, удобный для использования;
- развести в пространстве электронный и волновой пучки и таким образом решать проблемы коллектора и выходного окна практически независимо.

Практически все институты и фирмы, имеющие дело с разработкой мощных гиротронов, используют сейчас весьма похожие схемы их электродинамических систем, включающие резонатор, волноводный переход–излучатель со специальным срезом, квазипараболическое зеркало, формирующее узконаправленный волновой пучок с линейной поляризацией и несколько зеркал для дополнительной коррекции волнового пучка и вывода его через выходное окно. Однако, вместе с квазиоптической (КО) схемой пришли и некоторые проблемы. Во-первых, схема является открытой линией передачи с присущими ей дифракционными потерями. Встроенный квазиоптический преобразователь подразумевает некоторую часть излучения, оставленную внутри лампы из-за дифракции на рефлекторах конечной апертуры и окне. Это излучение может, в принципе, вызывать пробои внутри лампы и перегрев отдельных элементов. При использовании простейших вариантов КО излучателя и последующих квадратичных зеркал эти потери были относительно высоки $10 \div 20\%$. В современных длинноимпульсных (непрерывных) мощных гиротронах эти потери не должны превышать $3 \div 5\%$. Во-вторых, в большинстве практических случаев выходной волновой пучок гиротрона должен либо иметь высокое содержание выбранной моды внешней линии передачи (гауссов волновой пучок, волна HE_{11}) или легко трансформироваться в такую волну. Отметим что для простейших вариантов КО преобразователей в нужной моде содержится приблизительно 80% излучаемой мощности.

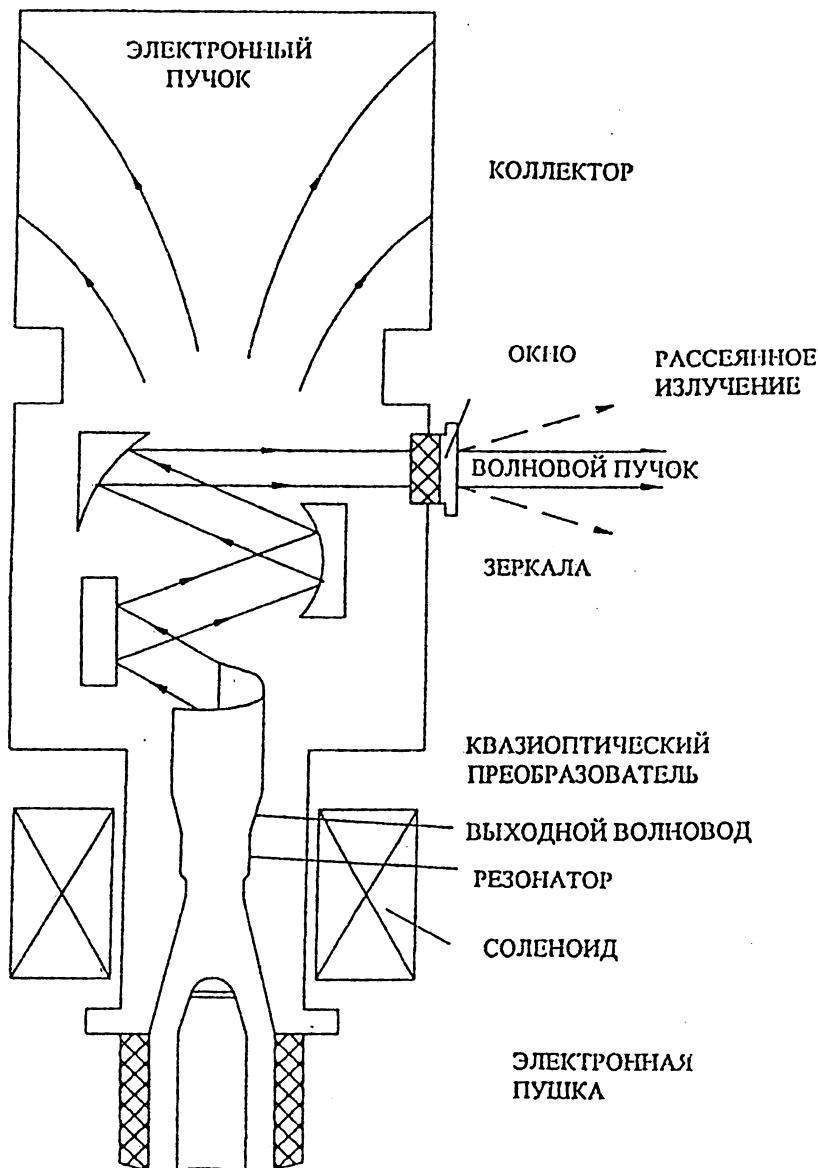


Рис. 10. Схема мощного гиротрона с встроенным преобразователем рабочей моды в волновой пучок.

Современные фазовые корректоры позволяют не только снизить дифракционные потери, но и повысить этот коэффициент примерно до 95%. В третьих, одним из самых критичных узлов гиротрона является выходное окно. Структуры ВЧ поля с равномерным распределением по поверхности окна или сконцентрированным у его края наиболее выгодны для охлаждения окна в длинноимпульсном или непрерывном режиме. Оба последних распределения весьма существенно отличаются от пространственных распределений поля на срезе излучателя и полей собственных волн линий передачи. Поэтому необходимо оптимизировать распределение интенсивности излучения по окну с учётом тепловых и механических характеристик окна и его режима работы. В-четвёртых, волновой пучок большого попечного размера очень чувствителен к возмущению его фазового фронта. Волновой пучок внутри гиротрона отражается от нескольких зеркал и проходит через окно. Все эти элементы неидеальны из-за неточностей изготовления, небольших смещений при сборке и отжиге лампы, неоднородности материала окна и пр. Волновой пучок, распространяясь по электродинамической системе, "аккумулирует" все эти незапланированные коррекции фазового фронта. Плавные возмущения фазового фронта "проявляются" на значительном расстоянии (несколько метров) от выходного окна гиротрона, где модуляция фазового фронта превращается в амплитудную. По этой причине структура волнового пучка может существенно отличаться от расчётной, и её необходимо определять экспериментально для того, чтобы при необходимости обеспечить дополнительную коррекцию волнового пучка. В последние годы разработаны эффективные методы преобразования высших волноводных мод в параксиальные пучки с оптимизированными распределениями полей [19] и адекватные методы измерения их параметров [20].

2.3.1. Высокоэффективные преобразовали волн. Синтез зеркальных корректоров. Известны два основных принципа повышения эффективности КО преобразователей. Первый принцип использует предварительное "приготовление" — коррекцию профиля излучения ("прешэйлинг") внутри волноводного перехода перед его излучением со среза волновода [19]. Для этой цели на конечную часть волноводного перехода наносится неглубокая спиральная деформация, постепенно трансформирующая высшую волноводную волну в локализованный пучок, отражающийся от стенок волновода (см. рис. 11). Приготовленное таким образом излучение выводится через срез волновода практически без рассеяния на кромках среза, что резко снижает (в два–три раза) дифракционные потери внутри прибора. Второй принцип базируется на использовании зеркальных корректоров сложной формы для оптимизации пространственной структуры волнового пучка как внутри гиротрона, так и после прохождения им вакуумного окна. Сформулированная в [21] идея синтеза

квазиоптических фазовых корректоров по заданной структуре поля была выполнена на основе адекватного программного обеспечения и сейчас используется при разработке квазиоптических систем [22].

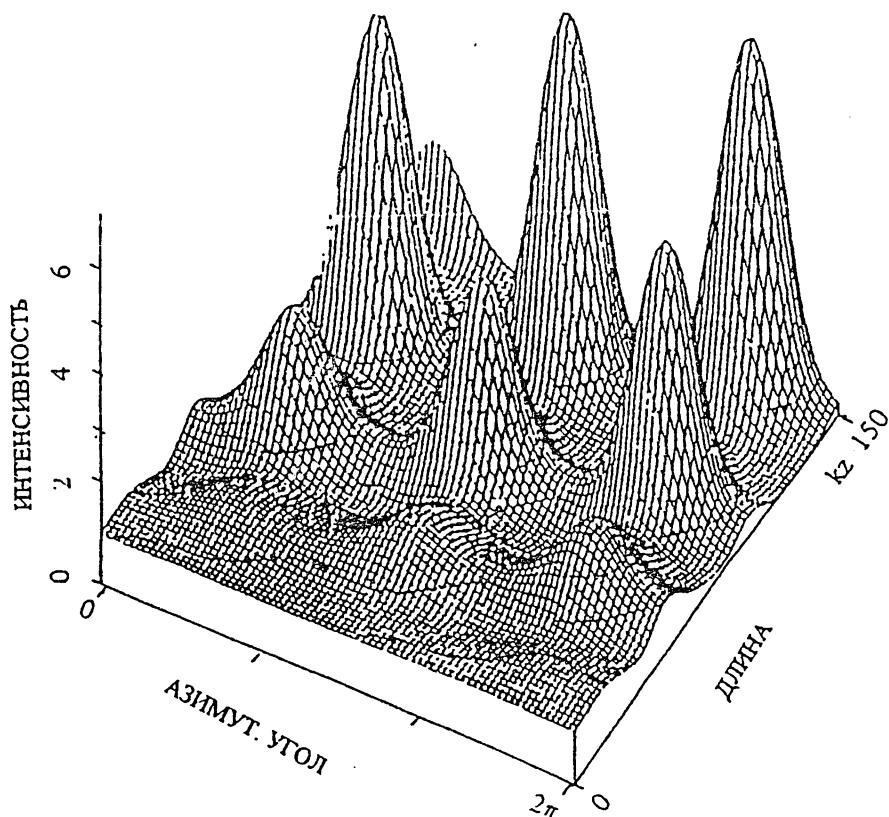
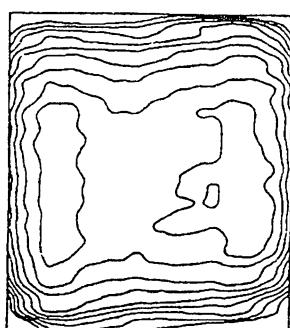
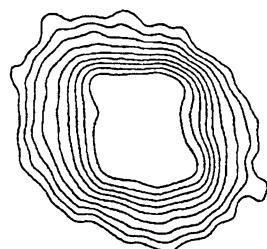
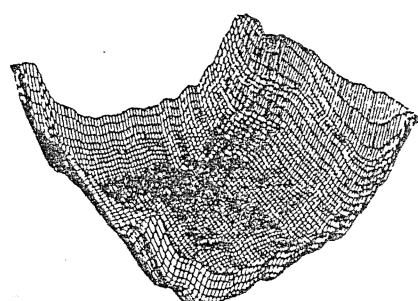


Рис. 11. Интенсивность ВЧ излучения на моде $TE_{15,4}$ в выходном гофрированном волноводе после резонатора. Поверхность волновода развернута с воображаемой линией разреза при $\varphi = 0$, совпадающей с $\varphi = 2\pi$. Первоначально однородное поле при $kz = 0$ и $\varphi = 0$, ВЧ поле постепенно трансформируется в волновой пучок. Чтобы выпустить этот пучок в свободное пространство с минимальными дифракционными потерями, продолжение волновода следует отрезать по линиям, вдоль которых расчётная интенсивность ВЧ поля наиболее близка к нулю.

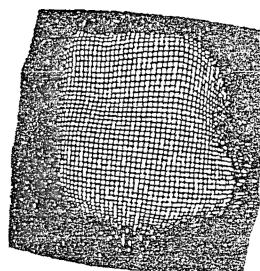
Рис. 12 показывает профили корректирующих зеркал и структуры полей одного из гиротронов.



a)



b)



c)

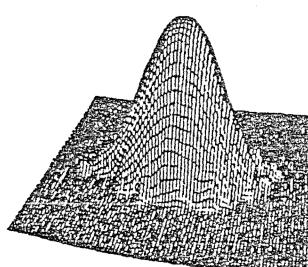
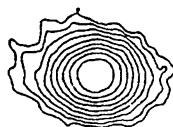


Рис. 12. Синтез заданных структур полей в квазиоптическом гиротронном преобразователе. а) Профиль поворотного зеркала, повышающего содержание гауссовой компоненты поля при одновременном уменьшении интенсивности поля на окне и дифракционных потерь внутри гиротрона. б) Измеренное распределение интенсивности поля на окне гиротрона. с) Измеренное распределение интенсивности поля на дистанции 1040 мм от окна.

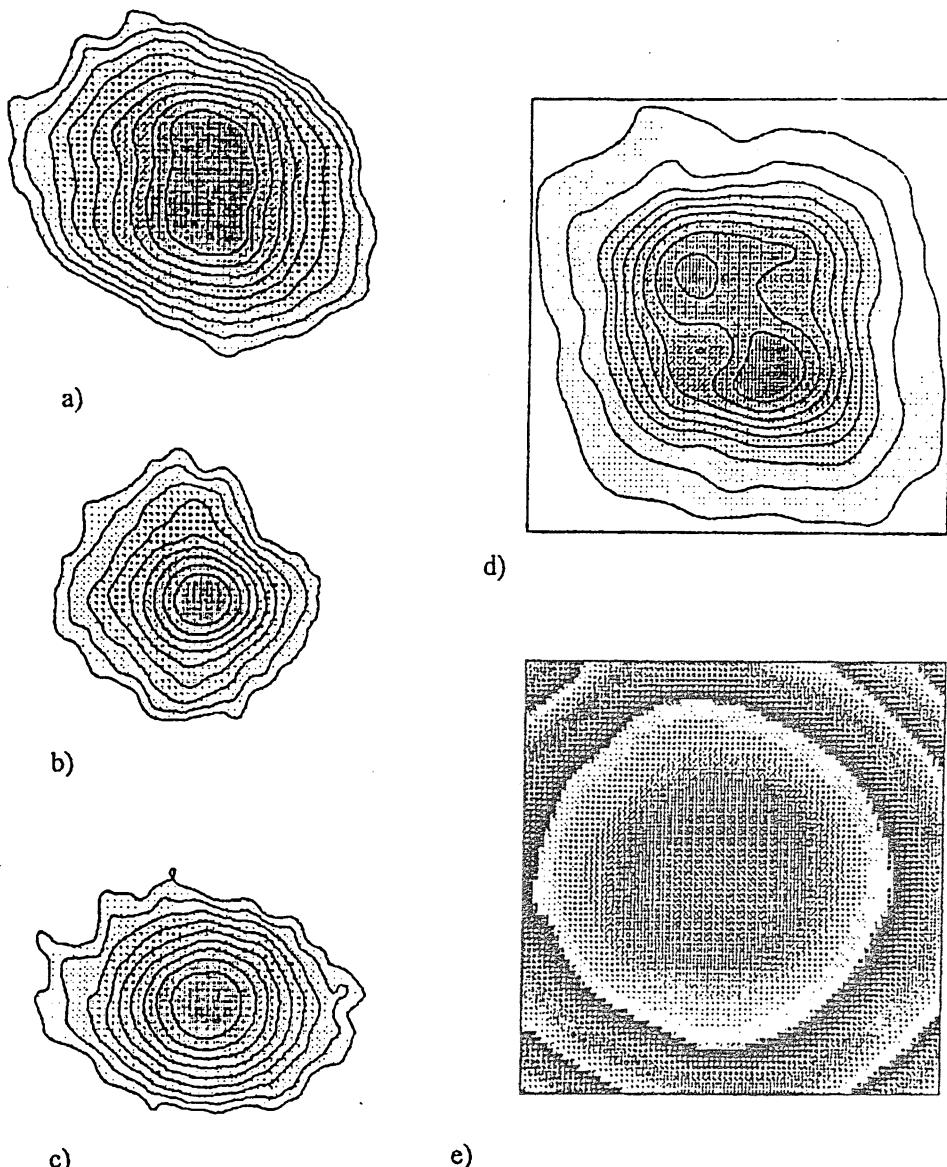


Рис. 13. Реконструкция волнового пучка гиротрона 140 ГГц по тепловизионным измерениям интенсивности в нескольких поперечных сечениях. а), б), с) Амплитудные распределения, измеренные на дистанциях 380 мм, 640 мм и 1040 мм от окна гиротрона. д) Амплитудное распределение на выходе гиротрона, реконструированное по трём сечениям. е) Реконструированное фазовое распределение на выходе гиротрона.

2.3.2. Измерение амплитудных и фазовых распределений волновых пучков. 3D-реконструкция поля. Волновой пучок на выходе гиротрона имеет очень высокую плотность мощности (от 10 до 100 кВт/см²), что делает весьма сложным измерение детальных характеристик амплитудного и фазового пространственных распределений. Наиболее часто используются измерения в режиме относительно коротких импульсов 0,1 ÷ 1 мсек или в ответвлённом с помощью металлической дифракционной решётки луче малой мощности, составляющей 10⁻² ÷ 10⁻⁵ полной мощности излучения. Распределение интенсивности можно измерить путём регистрации термоизображений инфракрасной камерой [20] или детектором в ответвлённом канале. Реконструкция фазового фронта волнового пучка возможна также двумя методами. Первый базируется на использовании канала с опорным волновым пучком с хорошо известным распределением амплитуды и фазы [23] и предполагает относительно большую мощность в нём (например, часть излучения того же гиротрона). Этот метод требует тщательной юстировки компонентов и значительного места для их размещения. Очень перспективным представляется другой метод, не требующий опорного канала и основанный на измерении распределений интенсивности пучка в трёх поперечных сечениях его и последующем численном синтезе фазового фронта [24]. Пример применения последнего метода показан на рис. 13.

2.4. Выходное окно

Проблемы, связанные с выходным окном, являются главным препятствием при создании мегаваттного непрерывного гиротрона. ВЧ потери в согласованном (резонансном) окне P_W растут вместе с рабочей частотой, согласно

$$P_W = \frac{(\epsilon^2 + 1)}{2} \operatorname{tg}\delta \cdot kd_W P_{\text{out}}, \quad (10)$$

вследствие как большей оптической толщины диска окна $\frac{\sqrt{\epsilon} d_W}{\lambda}$, так и более высокого параметра потерь, $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{Im} \epsilon / \operatorname{Re} \epsilon$. Наряду с низким уровнем потерь на высоких частотах диэлектрические материалы, используемые для производства окна, должны иметь высокие прочность и теплопроводность, а также быть приспособленными для пайки. В настоящее время для окон мощных гиротронов используются только диски из сапфира и нитрида бора. Два варианта выходных окон современных гиротронов для ЭЦН показаны на рис. 14. В двухдисковых окнах используется сапфир. На частоте 140 ГГц оценки максимальной непрерывной мощности передачи для таких окон дают величину 300 кВт, ограниченную закипанием жидкого хладоагента (обычно применяется FC-75). Нитрид бора

(BN) используется для однодисковых окон. По сравнению с сапфировыми окнами они менее чувствительны к термическим напряжениям и могут выдерживать более высокие температуры. BN диск диаметра 100 мм способен поглотить без перегрева более 50 кДж энергии. На частоте 140 ГГц это обеспечивает передачу импульсной энергии 1,5 МДж.

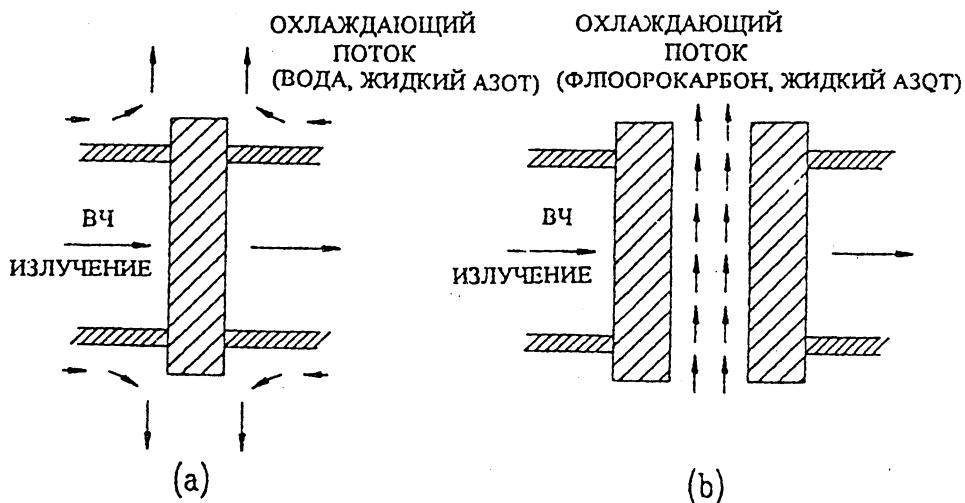


Рис. 14. Два типа выходных окон мощных гиротронов. а) Однодисковое окно; б) Двухдисковое окно (LN_2 — сжиженный азот).

Ни одно из существующих окон не применимо для 0,5–1 мегаваттных гиротронов непрерывного действия, предназначенных для ЭЦН. Такое положение является предпосылкой для новых подходов к проблеме окна, включая поиск новых материалов, рабочих режимов и вариантов конструкции, направленных на снижение потерь, улучшение теплоотвода и оптимизацию структуры ВЧ поля (см. 2.3). В частности, несколько лет назад было предложено использовать сапфировое окно, охлаждённое до температуры жидкого азота или ещё более низкой. Это предложение основано на сильной температурной зависимости параметров сапфира – уменьшении $\operatorname{tg}\delta$ и повышении теплопроводности при глубоком охлаждении. В экспериментах, проведённых совместно ИПФ и Курчатовским институтом, исследовались такие криогенные окна при начальной температуре 80 К, облучаемые волновым пучком с частотой 140 ГГц в трёхсекундных импульсах с интенсивностью ВЧ поля, подобной интенсивности в мегаваттном волновом пучке. Эти эксперименты подтвердили ожидания. Расчёт температурного режима однодискового окна с охлаждением по краю показывает возможность реализации рабочих режимов с непрерывной мощностью около 1 МВт на частоте 140 ГГц.

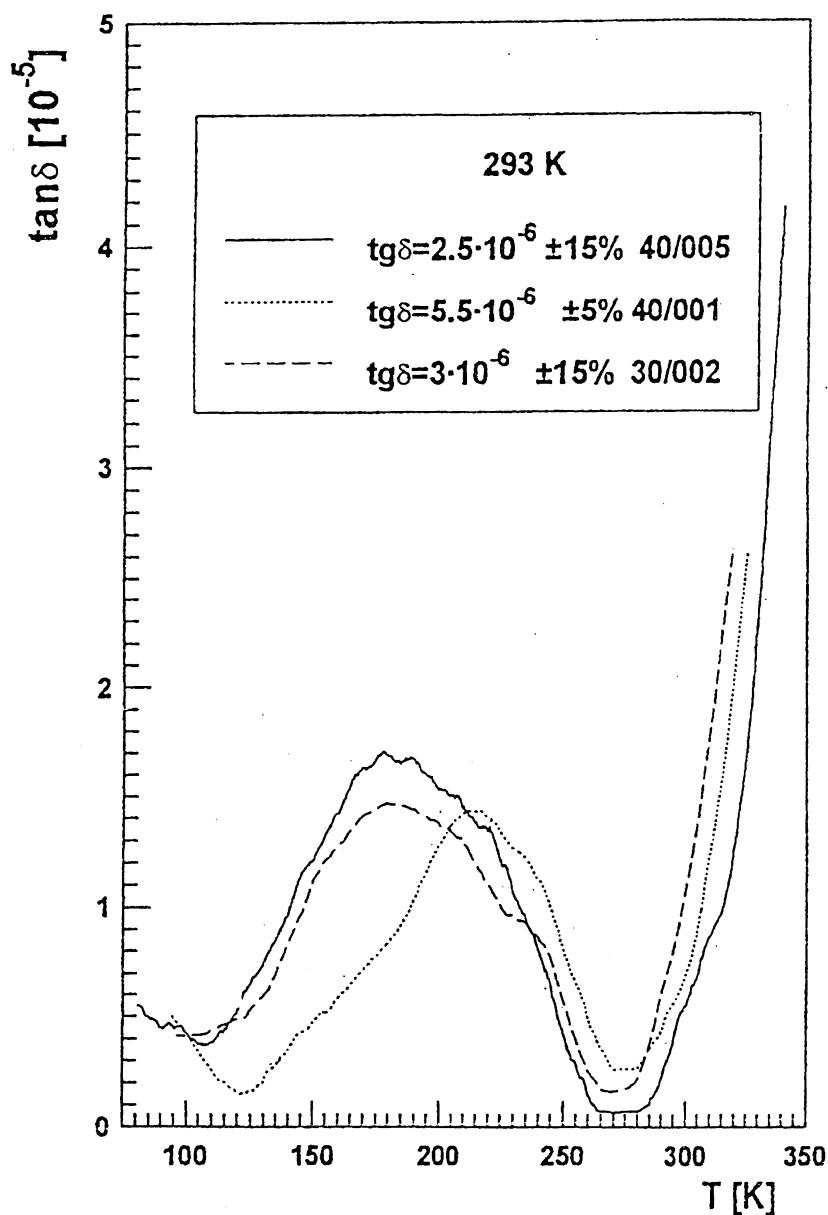


Рис. 15. Температурные зависимости $\tan\delta$ трёх легированных кремниевых дисков на частоте 170 ГГц.

Недавно появилось сообщение об испытаниях фирмой Thompson гиротрона на частоте 118 ГГц с криогенным окном, выходная мощность которого в импульсах длительностью до 2 с превышала 400 кВт [25]. Однако криогенные окна весьма сложны по конструкции и в эксплуатации. Кремний с компенсированной электрической проводимостью и, соответственно, крайне низким $\tg\delta$, рассматривается в качестве альтернативы. Температурные зависимости $\tg\delta$ образцов кремния на рис. 15 показывают, что в лучших из них $\tg\delta$ близок к 10^{-6} . Недостатком кремния является быстрое возрастание ВЧ потерь при умеренном нагреве до 350 К; тем не менее, этот недостаток может быть компенсирован неглубоким охлаждением окна на $30 \div 50^\circ\text{C}$ ниже комнатной температуры. Оценки максимальной выводимой ВЧ мощности до 1 МВт при непрерывной работе для кремниевого окна весьма благоприятны даже для частоты 170 ГГц, как видно из рис. 16.

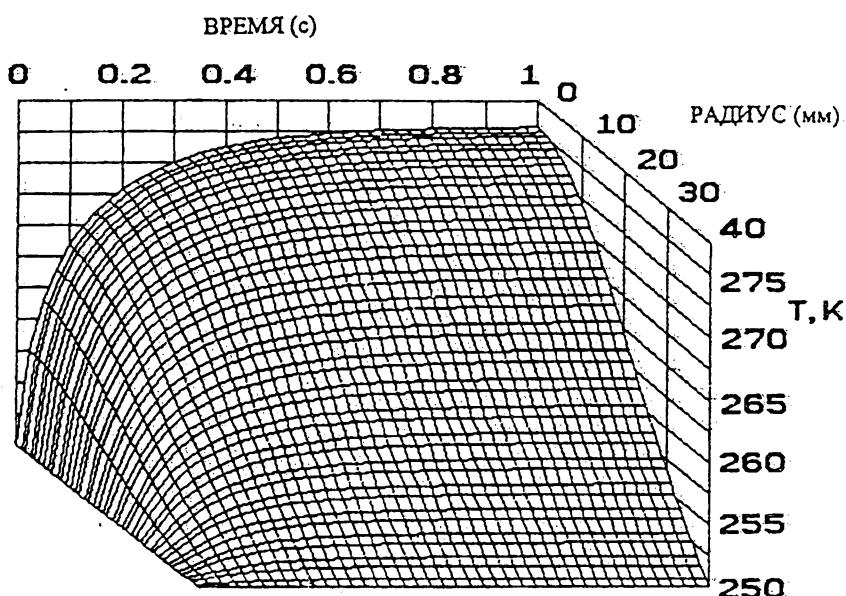


Рис. 16. Выходной узел двухоконного гиротрона. Лучи, формирующиеся волновые пучки, показаны ломанными линиями. а) Расщепитель волнового пучка на основе дифракционной решётки; при оптимальных размерах зеркально отражённая мощность $P_0 = 0$. б) Поперечное сечение квазиоптической системы.

Вероятно вскоре модели кремниевых окон могут быть испытаны при большой мощности излучения. Лучшим материалом для окна является алмаз, который характеризуется минимальным уровнем ВЧ потерь и наивысшей теплопроводностью при комнатной температуре. Большие поликристаллические алмазные пластины могут быть получены путём осажде-

ния из газовой фазы. Лучшие современные образцы алмазных дисков имеют $\text{tg}\delta$ в несколько раз меньше, чем сапфир, и дальнейшее развитие технологии алмазных окон может привести к радикальному решению проблемы окна гиротрона. Если выходная мощность разделяется на n пучков, выводимых через отдельные окна, то при ограничении мощности пропускной способностью выходного окна это позволяет повысить ВЧ мощность лампы (или энергию излучения в одном импульсе) соответственно в n раз. Электродинамическая система такого двухоконного гиротрона изображена на рис. 17. На протяжении нескольких лет другой вариант подхода к конструкции многооконной лампы разрабатывается в фирме General Atomics (США). Он представляет собой так называемое "распределённое окно", составленное из перемежающихся пластинок сапфира и металлических трубок специальной формы [27]. Недавно экспериментальное распределённое окно было испытано при плотности ВЧ излучения, соответствующей 1 МВт выходу энергии гиротрона на частоте 110 ГГц. Однако, потери ВЧ мощности в таком распределённом окне должны быстро увеличиваться с ростом частоты излучения.

2.5. Коллектор

В гиротронах значительная часть энергии электронного пучка должна рассеиваться в коллекторе. В длинноимпульсных гиротронах или гиротронах непрерывного действия коллектор представляет собой наиболее массивную часть лампы, но в его работе нет принципиальных проблем. Интерес к коллекторным системам оживлён недавним успехом экспериментов с коллектором с рекуперацией электронного пучка в Японии [28]. На изолированный коллектор было подано напряжение примерно на 30% ниже напряжения пучка, что позволило получить КПД гиротрона в некоторых случаях более 50%. Позже этот эксперимент был повторен в других лабораториях с похожими результатами. В ИПФ совместно с НПП "ГИКОМ" в гиротроне на частоте 110 ГГц с коллектором, имевшим пониженный потенциал, в режиме коротких импульсов при выходной мощности около 1 МВт был достигнут КПД 65%. Расчётные функции распределения энергии отработанных электронов (после их взаимодействия с ВЧ полем в резонаторе), показанные на рис. 18, подтверждают, что в некоторых случаях в отработанном пучке на самом деле нет электронов с энергиями ниже 30% их начальной энергии, и, таким образом, эта часть энергии электронов может быть возвращена в источник питания путём соответствующего снижения потенциала коллектора. Гиротроны с такими коллекторами могут оказаться весьма полезными в больших системах ЭЦН непрерывного действия с мощностью в несколько мегаватт, поскольку предоставляют возможность использования источников питания с пониженным напряжением.

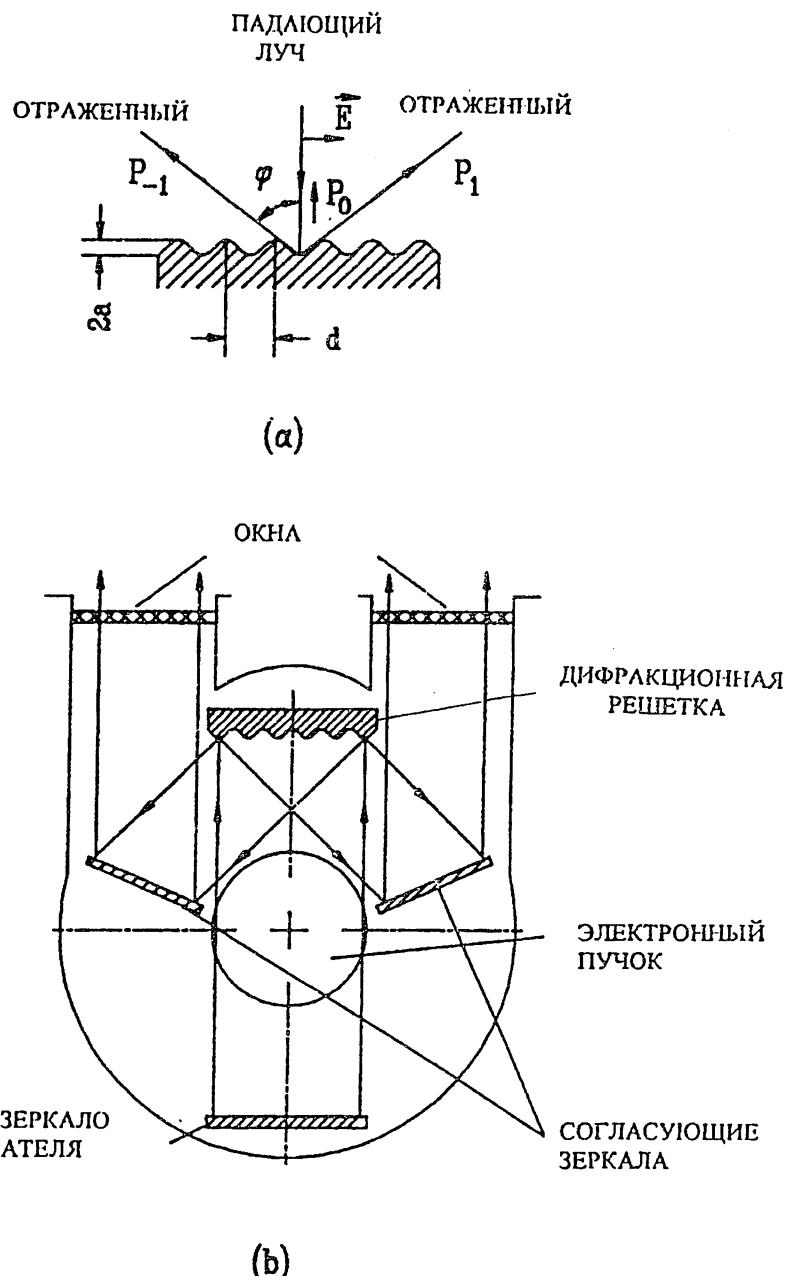


Рис. 17. Выходной узел двухоконного гиротрона. Лучи, формирующиеся волновые пучки, показаны ломанными линиями. а) Расщепитель волнового пучка на основе дифракционной решётки; при оптимальных размерах зеркально отражённая мощность $P_0 = 0$. б) Поперечное сечение квазиоптической системы.

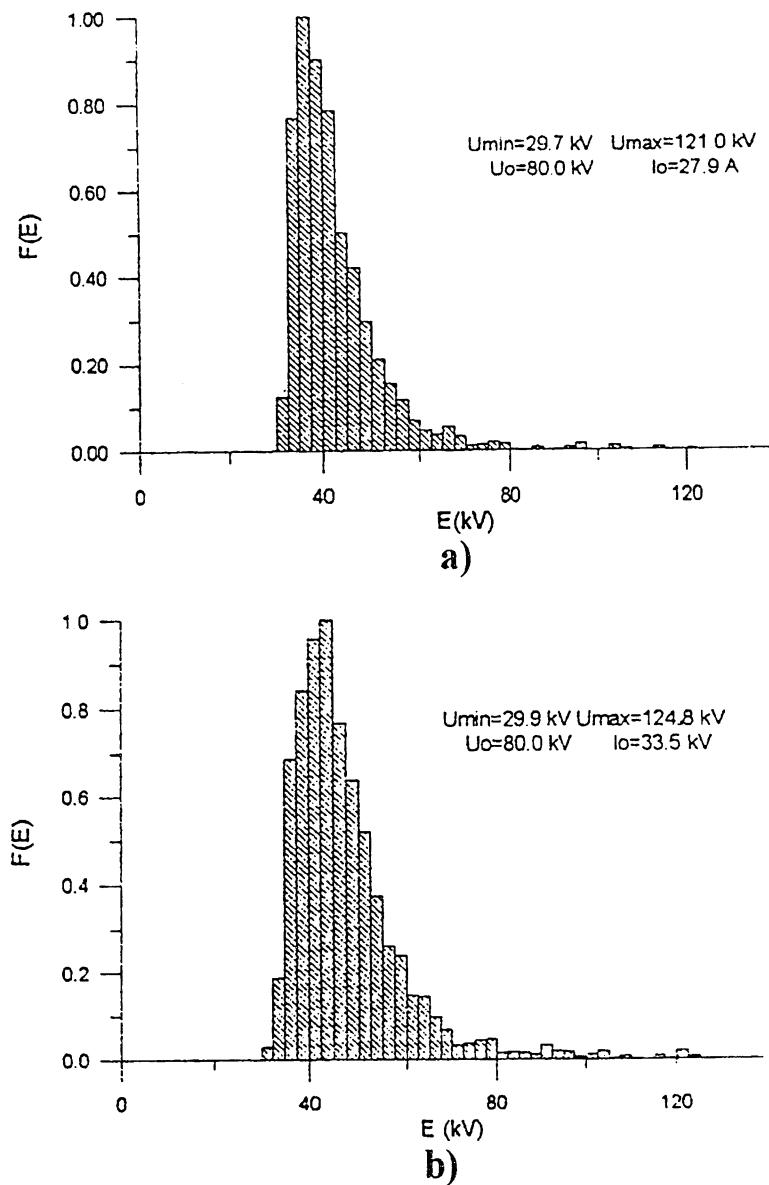


Рис. 18. Расчёты энергетические распределения отработанных электронов $F(\varepsilon)$ при различных начальных разбросах скоростей электронов в гиротроне, длина резонатора которого оптимизирована для получения максимального КПД при выходной мощности 1 МВт. а) Оптимистическая оценка: $\Delta v_{\perp}/v_{\perp} = 20\%$, эффективность взаимодействия электронов с ВЧ полем в резонаторе $\eta_e = 45\%$, в одноступенчатом коллекторе с пониженным потенциалом можно повысить эффективность до $\eta_{CPD} = 73\%$. б) Осторожная оценка: $\Delta v_{\perp}/v_{\perp} = 30\%$. Соответствующие результаты: $\eta_e = 39\%$ и $\eta_{CPD} = 62\%$.

3. ГИРОТРОНЫ ДЛЯ ЭЦН

С начала 70-х годов гиротроны использовались для ЭЦН плазмы в экспериментах по ядерному синтезу. Все российские гиротроны для ЭЦН производятся с встроенными преобразователями типов волн, как показано на рис. 10. Состояние дел в разработке и производстве гиротронов для ЭЦН иллюстрируется табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные и промышленные гиротроны для ЭЦН плазмы

Частота, ГГц	Выходная мощность	КПД %	Длительность импульса с	Мода резонатора / выходная мода	Институт или фирма
8	1.0	45	1	TE ₃₁ /TE ₅₁	Thompson
8	0.5	33	1	TE ₂₁ /TE ₁₀	VARIAN
28	0.34	37	CW	TE ₀₂ /TE ₀₂	VARIAN
28	0.5	40	0.1	TE ₄₂ /ГП	ГИКОМ
35	0.2	35	CW	TE ₀₂ /TE ₀₂	VARIAN
53	0.5	40	0.2	TE ₈₃ /ГП	ГИКОМ
83	0.5	35	2	TE _{10.4} /ГП	ГИКОМ
	0.9	32	0.3		
84	0.4		10	/ГП	VARIAN-NIFS ^{**}
100	2.1	30	3·10 ⁻³	TE _{25.13} /TE _{25.13} (коакс [†])	Институт прикладной физики РАН
110	0.5 0.35	27	10 ²	TE _{22.6} /ГП	VARIAN
110	1.3 1.0	40 65(CPD)	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴	TE _{19.5} /ГП	ГИКОМ
110	0.9	40	2	TE _{19.5} /ГП	ГИКОМ
110	0.35	48(CPD [‡])	5	TE _{10.4} /ГП	TOSHIBA
118	0.4	25	2	TE _{22.6} /ГП	Thompson-FZK [§]
140	0.55	42	3.0	TE _{22.6} /ГП	ГИКОМ
140	0.9	39	1	TE _{22.6} /ГП	ГИКОМ
168	0.5	30	0.7	TE _{19.5} /ГП	ГИКОМ
170	1	28	10 ⁻³	TE _{31.8} /TE _{31.8}	TOSHIBA- JAERI ^{***}

^{*} Гауссов пучок

[†] Коаксиальный резонатор

[‡] Коллектор с пониженным потенциалом

[§] Исследовательский центр в Карлсруэ

^{**} Национальный центр термоядерных исследований (Нагоя)

^{***} Японский институт исследований по атомной энергии

Из неё видно, что сейчас уровень выходной мощности 0,5 МВт обычен для таких гиротронов, а некоторые лампы обеспечивают выходную мощность около 1 МВт. Все российские лампы оснащены выходными окнами из нитрида бора, перегрев которых налагает ограничения на энергию в импульсе. Такие гиротроны, работающие на частотах от 28 до 168 ГГц, используются или готовятся для использования на 15 установках ядерного синтеза во всём мире. В США, Японии, Франции и Германии разрабатываются гиротроны для ЭЦН по той же схеме [29, 30]. Одна из задач этой деятельности поставлена программой ITER, для которой необходим гиротрон непрерывного действия на частоте 170 ГГц с выходной мощностью 1 МВт. Успешная разработка такого гиротрона может придать ЭЦН статус неизбежного и важного компонента в сценариях включения и поддержания реакторов ядерного синтеза. Ещё более важное значение придаётся ЭЦН в программе стелларатора. Новые большие стеллараторы LHD в Японии и W7-X в Германии разрабатываются вместе с системами ЭЦН, ВЧ мощности которых составляют несколько мегаватт в импульсах длительностью порядка и более 10 с.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ГИРОТРОНЫ

В числе многих возможных технологических применений гиротронов одним из наиболее активно разрабатываемых сейчас является спекание керамики. Исследования в этой области основаны на физической концепции объёмного нагрева в любом чистом материале, который не может быть осуществлён никаким другим источником энергии. Экспериментальное и теоретическое исследование особенностей воздействия миллиметрового излучения на диэлектрические материалы продемонстрировало возможности разработки новых эффективных технологических процессов для спекания высококачественной керамики (см. [7], стр. 319). В таких экспериментах используются гиротроны, работающие на частоте более 20 ГГц со средней выходной мощностью до 30 кВт. В отличие от гиротронов для ЭЦН, унифицированных по своей конструкции, технологические гиротроны производятся и разрабатываются в нескольких модификациях в зависимости от типа их магнитной системы. Их выходные параметры приведены в табл. 2. Технологические гиротроны со сверхпроводящими магнитными системами весьма похожи на гиротроны для ЭЦН. Они работают на основной частоте и имеют на выходе гауссов волновой пучок. Максимальная выходная мощность таких российских гиротронов при работе в непрерывном режиме — более 20 кВт при КПД более 30%. Гиротроны с нормальными соленоидами и выходной мощностью порядка 10 кВт преимущественно работают на второй циклотронной гармонике. Рабочей модой одного из таких гиротронов, работающего на частоте 30 ГГц, является мода TE_{021} . Его излучение в виде волноводной моды

TE_{02} затем может быть преобразовано в моду TE_{11} . Другим вариантом технологических гиротронов является гиротрон с постоянным ферромагнитом, в котором может быть получено максимальное соленоидоподобное магнитное поле несколько ниже 1 Т. На практике максимальная частота таких ламп ограничена 15 ГГц на основной гирочастоте и 30 ГГц на её второй гармонике.

Таблица 2

Технологические гиротроны, выпускаемые в России

Частота, ГГц	Выходная мощность кВт	КПД %	Напряжение кВ	Выходная мода	Магнитное поле, Т	Магнитная система
37.5	20	35	30	ГП ⁴	1.45	СПМ ⁵
83	20	30	30	ГП	3.2	СПМ
30	10	23	20	TE ₀₂	0.55	НС ⁶
35	10	50	25	TE ₀₂	1.3	СПМ

Гауссов пучок

Сверхпроводящий магнит

Нормальный соленоид

5. ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ГИРОТРОНЫ

Все гиротроны с круглыми резонаторами, описанные выше, представляют собой узкополосные генераторы, частота которых ω может плавно изменяться лишь в пределах их резонансной кривой в полосе порядка $10^{-4}\omega$. Изменением магнитного поля резонатора их частота может быть перестроена скачками от одной моды к другой. Значительная плавная перестройка возможна при использовании резонатора, показанного на рис. 5с, путём изменения расстояния между половинами резонатора. Чтобы изменить частоту более чем на 1%, приходится также подстраивать магнитное поле в резонаторе. Гиротрон непрерывного действия с таким резонатором был построен специально, чтобы проверить возможности спектрометрии со сверхвысоким разрешением на миллиметровых длинах волн [31]. Перестраиваемые гиротроны имели следующие основные параметры: частота с плавной перестройкой от 32 до 34,5 ГГц, выходная мощность в непрерывном режиме около 1 кВт, КПД от 30% до 50%. Наряду со спектрометрией, перестраиваемые гиротроны других типов могут использоваться в качестве задающих генераторов мощных усилителей миллиметрового диапазона длин волн – гироклистронов.

6. ГИРОКЛИСТРОНЫ

6.1. Особые свойства

Исследование гироклистронов началось вскоре после начала исследования гиротронов [5]. В первых экспериментах с гироклистроном непрерывного действия на частоте 10 ГГц была достигнута выходная мощность 2 кВт при усилении 20 дБ и КПД 70%. Результаты дальнейшего исследования и разработки гироклистронов в России не публиковались, за исключением нескольких теоретических работ. Последние работы по гироклистронам на частотах 35 и 94 ГГц [32] представляют результаты долгого периода разработок. Проблемы, описанные в разделе 2, имеют отношение и к гироклистронам; более того, у гироклистронов есть свои специфические проблемы, вызванные тем, что их рабочие режимы и электродинамические системы характеризуются большей сложностью. В результате таких отличий от гиротронов гироклистроны более требовательны к качеству электронного пучка, то есть в них КПД сильнее зависит от разброса скоростей, вызванного статическими или динамическими эффектами (неустойчивостью). В частности, эта чувствительность гироклистронов является следствием таких причин, как начальная модуляция электронного пучка в менее мощных ВЧ полях, чистая инерционная группировка в достаточно длинных трубках дрейфа (в отличие от группировки в интенсивных полях резонатора в гиротронах), и более выраженным эффектом Допплера вследствие меньшей длины резонаторов. В дополнение к основным параметрам гиротрона (рабочая частота, выходная мощность, КПД и длительность импульса) гироклистрон должен обеспечивать заданное усиление и достаточно большую моментальную полосу частот. Последнее свойство может быть достигнуто ценой снижения КПД и выходной мощности. Значительным препятствием для повышения выходной мощности любого усилителя является самовозбуждение в какой-либо части его достаточно сложной электродинамической системы на рабочей mode или на любой паразитной. Чтобы обеспечить достаточную перестройку частоты, резонаторы должны обладать низкой добротностью, то есть быть короче, чем в гиротронах. Количество резонаторов, их форма и распределение магнитного поля в области резонаторов гироклистрона оптимизируются для удовлетворения частично противоречивых требований к более высокой выходной мощности, КПД, усилению и полосе частот и повышению устойчивости к самовозбуждениям.

6.2. Гироклистроны для радаров

В последнее время были разработаны гироклистроны на частотах 35 и 94 ГГц, большей частью предназначенные для возможного примене-

ния в различных радарных системах. Разнообразные требования к этим лампам потребовали разработки нескольких модификаций, отличающихся по конструкции и основным выходным характеристикам. Их параметры представлены в табл. 3.

Таблица 3

Российские гироклистроны для радиолокационных систем

Параметры	Лампы				
	1	2	3	4	5
Центральная частота, ГГц	35.2	35.0	35.12	93.2	91.6
Гармоника гирочастоты	!	!	2	!	!
Мощность насыщения, кВт	750	230	205	65	2.5
Усиление в режиме насыщения, дБ	20	31	16	35	31
Мгновенная ширина полосы, ГГц	0.210	0.500	0.035	0.28	0.33
КПД, %	24	33	15	26	25
Выходная мода	TE ₀₂	TE ₀₁	TE ₀₂	TE ₀₁	TE ₀₁
Число резонаторов	2	3	2	4	4
Напряжение пучка, кВ	74	50	65	55	22
Длительность импульса, мкс	100	100	100	100	CW
Частота повторения, Гц	5	100	5	5	-

Наиболее мощные гироклистроны на частоте 35 ГГц со сверхпроводящими магнитами были разработаны для крупномасштабных стационарных радаров. Одним из возможных применений является обнаружение космического мусора [7]. Лампа 3 разработана на основе обычной магнитной системы. Гироклистроны на частоте 94 ГГц разрабатывались для систем воздушного и космического базирования. Их несущая частота сильно поглощается в земной атмосфере, что, вместе с узкой направленностью их излучения, обеспечивает защиту от противодействия и помех. Гироклистроны такого типа пригодны также и для систем крупномасштабного мониторинга состояния атмосферы [7]. Оценки показывают, что гироклистроны перспективны для низнегибридного нагрева плазмы в экспериментах по ядерному синтезу как источники излучения на частотах от 5 до 10 ГГц с выходной мощностью порядка 1 МВт в непрерывном режиме, высоким КПД и управляемой фазой.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из предпосылок разработок мощных МЦР послужило то, что тогда, в 60-е годы, средние мощности наиболее мощных источников излучения быстро уменьшались с увеличением частоты от десятков и сотен киловатт на частотах ниже 10 ГГц до нескольких ватт на частотах около 100 ГГц. Это позволило говорить о "провале", простиравшемся до дальнего ИК диапазона. Создание МЦР позволило ликвидировать часть этого провала примерно до 200 ГГц, где либо уже существуют, либо несомненно могут быть созданы непрерывные источники излучения мегаваттного уровня мощности. Освоение более высоких частот, в принципе, возможное с помощью МЦР со средней мощностью десятки и сотни киловатт, сдерживается высокой стоимостью сверхпроводящих магнитных систем с полями выше 10 Т и отсутствием таковых выше 18 Т, а также в какой-то мере и тем, что излучение субмиллиметрового диапазона длины волн пока не находит достаточно важных применений. Будущее МЦР в значительной мере зависит от развития новых технологий, например, термоядерной энергетики. Гиротроны используются в экспериментальных термоядерных установках и продемонстрированная ими надёжность и управляемость стимулировали растущий интерес к их применению для высокотемпературной обработки материалов, прежде всего для спекания высококачественной керамики. Уже разработаны гиротроны и гироклистроны, охватывающие широкий спектр рабочих частот и выходных мощностей, которые могут быть использованы для различных приложений. Разработка мощных МЦР в России основывается на хорошо развитой теоретической базе и обширном арсенале расчётных и экспериментальных методов, необходимых для их детального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов А. В., Петелин М. И., Юллатов В. К. // Изв. вузов. Радиофизика, 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414.
2. R.O.Twiss R. O. // Aust. J. Phys., 1958. V. 4. P. 567; Scheinder J. // Phys. Rev. Letts., 1959. V. 12. P. 504; Гапонов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика, 1959. Т. 5. С. 836.
3. Антаков И. И., Боков В. М., Васильев Р. П., Гапонов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика, 1960. Т. 6. С. 1033.
4. Hirshfield J. L. and Granatstein V. L. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1977. V. MTT-25. P. 522.
5. Andronov A. A., Flyagin V. A., Gaponov A. V., Goldenberg A. L., Petelin M. I., Usov V. G., and Yulpatov V. K. // Infrared Phys., 1978. V. 6. P. 385.

6. Flyagin V. A. and Nusinovich G. S. // Proc. IEEE, 1988. V. 6. P. 76.
7. Applications of High Power Microwaves /Eds. A. V. Gaponov-Grekhov and V. L. Granatstein. — Artech House, 1994.
8. Гольденберг А. Л., Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Петелин М. И., Цимлинг III. Е. // В сб.: Гиротрон /Под ред. В. А. Флягина. — Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981. С. 86.
9. Tsimring Sh. E. — In: Abstracts of 16-th Int. Conf. on IR & MM Waves /Ed. M. Q. Tran. — Bellingham: SPIE, 1991;
Bonderson A. and Antonsen T. M. // Int. J. Electron., 1968. V. 61. P. 1623.
10. Ергаков В. С. и Моисеев М. А. // В сб.: Гиротрон /Под ред. В. А. Флягина. — Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981. С. 53.
11. Власов С. Н., Жислин Г. М., Орлова И. М., Петелин М. И., Рогачева Г. Г. // Изв. вузов. Радиофизика, 1969. Т. 12. № 8. С. 1236.
12. Нусинович Г. С. и Эрм Р. Э. // Электроинженерная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1972. № 8. С. 55.
13. Петелин М. И. // В сб.: Гиротрон /Под ред. В. А. Флягина. — Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981. С. 77.
14. Гольденберг А. Л., Павельев А. Б., Хижняк В. И. // В сб.: Гиротрон /Под ред. В. А. Флягина. — Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1989. С. 98.
15. А. с. 786677 СССР. /Запевалов В. Е. и др. Заявл. 25.07.79. Опубл. в 1989. Бюл. № 7;
Запевалов В. Е., Цимлинг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990. Т. 33. № 11. С. 1288;
Запевалов В. Е., Малыгин С. А., Мануилов В. Н., Цимлинг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика, 1994. Т. 37. № 3. С. 384.
16. Запевалов В. Е., Малыгин С. А., Павельев В. Г., Цимлинг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика, 1984. Т. 27. № 12. С. 1194.
17. Нусинович Г. С. // Изв. вузов. Радиофизика, 1975. Т. 18. № 11. С. 1689;
Ергаков В. С., Моисеев М. А., Эрм Р. Э. // Изв. вузов. Радиофизика, 1976. Т. 19. № 3. С. 453.
18. Власов С. Н., Орлова И. М. // Изв. вузов. Радиофизика, 1974. Т. 17. № 1. С. 148.
19. Denisov G. G., Petelin M. I., Vinogradov D. V. // WO 90/0780 h01p1/16, PCT Gazette, 1990. V. 16. P. 47.
20. Denisov G. G., Kuftin A. N., Malygin V. I., Venediktov N. P., Vinogradov D. V., Zapevalov V. E. // Int. J. Electronics, 1992. V. 72. № 5–6. P. 1079.
21. Каценеленбаум Б. З., Семенов В. В. // Радиотехника и электроника, 1967. С. 244.

22. Bogdashov A. A., Chirkov A. V., Denisov G. G., Vinogradov D. V., Kuftin A. N., Malygin V. I., Zapevalov V. E. // Int. J. IR&MM Waves, 1995. V. 16. P. 735.
23. Alexandrov N. L., Chirkov A. V., Denisov G. G., Vinogradov D. V., Kasperek W., Pretereibner J., Wagner D. // Int. J. IR&MM Waves, 1992. V. 13. № 9. P. 1369.
24. Chirkov A. V., Denisov G. G., Alexandrov N. L. // Optics Communications, 1995. V. 115. P. 449.
25. Garin P., Bon Mardion G., Pain M. et al. — In: Abstracts of 20-th Int. Conf. on IR & MM Waves, Orlando, USA, 1995. — P. 271.
26. Heidinger R., Molla J., and Parshin V. — In: Abstracts of 21-th Int. Conf. on IR & MM Waves, Berlin, 1996.
27. Moeller C. P., Doane J. L., and DiMartino M. — In: Abstracts of 20-th Int. Conf. on IR & MM Waves, Sendai, 1994. — P. 279.
28. Sakamoto K., Tsuneoka M., Ksugai A. et. al. — In: Abstracts of 20-th Int. Conf. on IR & MM Waves, Sendai, 1994. — P. 63.
29. Felch L., Huey H., and Jory H. // J. Fusion Energy, 1990. V. 9. P. 59.
30. Thumm M. State of the Art of High Power Gyro-devices and Free Electron Masers // Preprint FZKA 5728. — Forschungszentrum Karlsruhe, March 1996.
31. Антаков И. И., Власов С. Н., Гинцбург В. А., Загрядская Л. И., Николаев Л. В. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1975. № 8;
Антаков И. И., Белов С. П., Герштейн Л. И., Гинцбург В. А., Крупнов А. Ф., Паршин Г. С. // Письма в ЖЭТФ, 1974. Т. 19. № 10.
32. Antakov I. I., Zasyupkin E. V., Sokolov E. V., Moiseev M. A. — In: Abstracts of 18-th Int. Conf. on IR & MM Waves, Colchester, England, 1993. — P. 336;
Antakov I. I., Gel'vich E. A., Spektor Kh. I., Sokolov E. V. — In: Abstracts of 18-th Int. Conf. on IR & MM Waves, Colchester, England, 1993. — P. 446.

Институт прикладной физики
РАН, г. Н. Новгород

Поступила в редакцию
30 мая 1996 г.