

УДК 621.385.69

ЭВОЛЮЦИЯ ГИРОТРОНОВ

В. Е. Заневалов

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

На основе ретроспективного анализа выполненных за последние десятилетия отечественных и зарубежных работ по гиротронам для различных применений показаны основные тенденции развития гиротронов различных частотных диапазонов и разного уровня выходной мощности. Описаны основные области применения современных гиротронов и специфические требования в каждой области. Приведён обзор последних достижений, а также основных проблем, затрудняющих дальнейшее продвижение гироприборов в область более высоких частот и мощностей. Рассмотрены методы решения указанных проблем ведущими мировыми исследовательскими организациями и производственными компаниями.

История развития гиротронов как современных электронных приборов насчитывает несколько десятилетий. Этого срока достаточно, чтобы проследить основные моменты и тенденции эволюции этих приборов. На основе ретроспективного анализа отечественных и зарубежных работ по гиротронам для различных применений, выполненных за последние десятилетия [1–12], далее выяснены основные тенденции развития и приложений гиротронов различных частотных диапазонов и разного уровня выходной мощности. Приведённый анализ, естественно не свободен от элементов субъективизма. За рамками рассмотрения остаются многочисленные экспериментальные лабораторные макеты, которые сами по себе весьма любопытны, но, тем не менее, не определяют главные направления развития гироприборов.

Гиротроны представляют собой разновидность мазеров на циклотронном резонансе, в которых используется резонансное взаимодействие электронов, движущихся по винтовым траекториям в магнитоэлектростатическом поле, с волнами, распространяющимися почти поперёк направления магнитного поля [1, 2]. Механизм излучения, на котором основаны мазеры на циклотронном резонансе, описан во многих работах (см., например, [1–7]). По непрерывной и средней мощности, а также по энергии излучения в длинных импульсах гиротроны значительно, на несколько порядков, превосходят другие источники излучения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн. Благодаря гироприборам впервые стали возможны электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), создание мощных радиолокационных систем миллиметрового диапазона длин волн, высокотемпературная обработка материалов миллиметровым излучением и другие приложения [5–10].

Уже начальные испытания первых образцов гиротронов и применения их излучения в экспериментах продемонстрировали рекордные результаты, что стимулировало начало разработки и изготовления опытно-промышленных образцов гиротронов на предприятиях электронной промышленности Советского Союза (Государственный институт «Салют» и НПП «Торий»), США («Вариан» («Varian») и «Хьюз Эйркрафт» («Hughes Aircraft»)), Японии («Мицубиси» («Mitsubishi») и «Тошиба» («Toshiba»)), а также наиболее развитых европейских стран («Асеа-Браун-Бовери» (ABB), «Томсон» («Thomson»), «Филипс» («Philips»)) [5–9]. Первоначально все эти лампы предназначались для работы в диапазоне $28 \div 70$ ГГц, а затем и до 140 ГГц, имели осевой вывод энергии, а длина некоторых экземпляров превышала 3 м. На рис. 1 показана фотография экспозиции разнообразных гиротронов 1980–1999 годов выпуска в Институте физики плазмы им. М. Планка (Грайфсвальд, ФРГ) и их магнитных систем. Слева направо расположены:

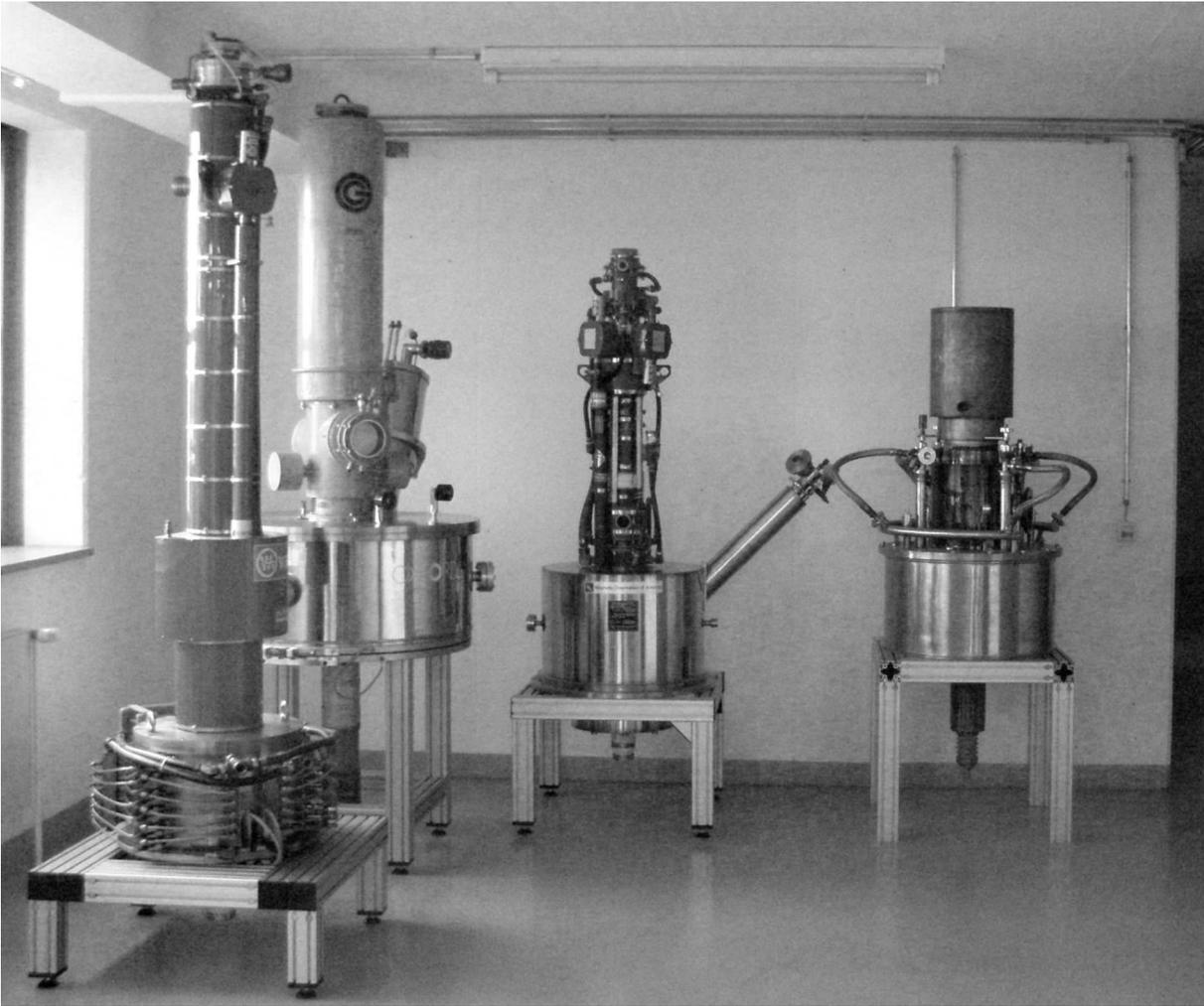


Рис. 1. Гиротроны в ИФП им. М. Планка (Грайфсвальд, ФРГ) 1980–1999 годов выпуска

непрерывный гиротрон фирмы «Вариан» (рабочая частота 28 ГГц, мощность выходного излучения 200 кВт), гиротрон НПП «ГИКОМ», Россия (рабочая частота 140 ГГц, мощность выходного излучения 700 кВт, длительность импульса 3 с), гиротрон фирмы «Вариан» (60 ГГц/200 кВт), гиротрон НПП «ГИКОМ» (140 ГГц/500 кВт/0,5 с). Отметим, что гиротрон с рабочей частотой 28 ГГц оснащён магнитной системой с водяным охлаждением, остальные гиротроны — криомагнитами.

Развитие гиротронов как мощных промышленных электронных приборов предполагает выполнение некоторых специфических условий, а именно:

- 1) наличие специальных магнитных систем, соответствующих частотному диапазону гиротрона;
- 2) существование развитой теории, подкреплённой экспериментом (дизайн гиротронов, лабораторные прототипы);
- 3) достаточное развитие технологической базы (существующие технологии в электронной промышленности и разработки уникальных технологий);
- 4) наличие экспериментально-испытательной базы (измерительная аппаратура, мощные системы высоковольтного электропитания с быстрой защитой прибора от повреждения, системы водяного охлаждения, особенно для мощных гиротронов для УТС).

Важно отметить, что мощный гиротрон — дорогостоящий, большой и тяжёлый прибор с длиной порядка 3 м и массой до 1000 кг, каждая новая разработка гиротрона весьма затратна. Вследствие этого важнейшую роль играет состоятельный стратегический заказчик, определяющий запросы к разработчикам, подкреплённые финансированием. В качестве такого заказчика в нашей стране выступало Министерство атомной энергии (и его преемники) и НИЦ «Курчатовский институт», в США — Департамент энергии и фирма «Дженерал Атомикс» («General Atomics»), в Евросоюзе — «Евроатом» («Euratom»), в Японии — Японское агентство по атомной энергии (ЯАЭА).

Постепенно сформировались основные приложения гиротронов и их специализированные разновидности с требуемым набором параметров [5–10]. Прежде всего, это гиротроны для управления параметрами плазмы в установках УТС. Развитие этих гиротронов происходило по линии повышения мощности, коэффициента полезного действия (КПД), длительности импульса (вплоть до непрерывного режима) и рабочей частоты. Гиротроны (см. схемы на рис. 2) состоят из адиабатической пушки магнетронного типа, открытого резонатора с дифракционным выводом энергии СВЧ излучения и выходного узла, включающего в себя коллектор электронов и, обычно, преобразователь СВЧ излучения в волновой пучок с линейной поляризацией (см. рис. 2б). Сильные магнитные поля, необходимые для работы гиротронов миллиметрового диапазона длин волн, создаются сверхпроводящими соленоидами. Не будет преувеличением сказать, что развитие магнитных систем — ключ к развитию гиротронов и их приложений. Величина индукции магнитного поля B определяется условием синхронизма:

$$B[\text{Тл}] \approx 10,7/(n\lambda[\text{мм}]), \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, n — номер синхронной гармоники гирочастоты. Гиротроны для УТС работают в условиях основного гирорезонанса ($n = 1$).

Главные проблемы, которые необходимо решить при разработке гиротронов для УТС, таковы [9–20]:

- 1) формирование интенсивных винтовых электронных пучков с достаточно большой энергией осцилляторного движения электронов и приемлемым разбросом скоростей;
- 2) обеспечение стабильной и высокоэффективной генерации рабочей моды в сверхразмерных резонаторах с приемлемым уровнем тепловой нагрузки;
- 3) обеспечение эффективного вывода излучения из гиротрона, как правило, с преобразованием сложной рабочей моды в волновой пучок с оптимизацией его пространственного распределения;
- 4) разработка надёжного коллектора электронного пучка;
- 5) создание выходного окна, способного пропустить мощное высокочастотное излучение из гиротрона.

Достижение в гиротронах мегаваттного уровня мощности подразумевает работу основных подсистем гиротрона — электронной пушки, резонатора, узла вывода излучения, коллектора — в режиме экстремальных тепловых нагрузок.

Полный КПД гиротрона и его предельная мощность определяются эффективностью и предельными возможностями его подсистем: электронно-оптической системы, резонатора, системы преобразования и вывода излучения, коллектора (в т. ч. с рекуперацией).

Мощность P и КПД η гиротрона определяются следующими выражениями:

$$P = \eta IU, \quad (2a)$$

$$\eta = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_c \eta_w Q_{\text{ohm}} / (Q_{\text{ohm}} + Q_d), \quad (2b)$$

где I и U — ток пучка и ускоряющее напряжение, η_{\perp} и η_c — поперечный КПД [2, 5, 6] и коэффициент преобразования встроенного преобразователя, t_{\perp} — отношение энергии вращения электронов

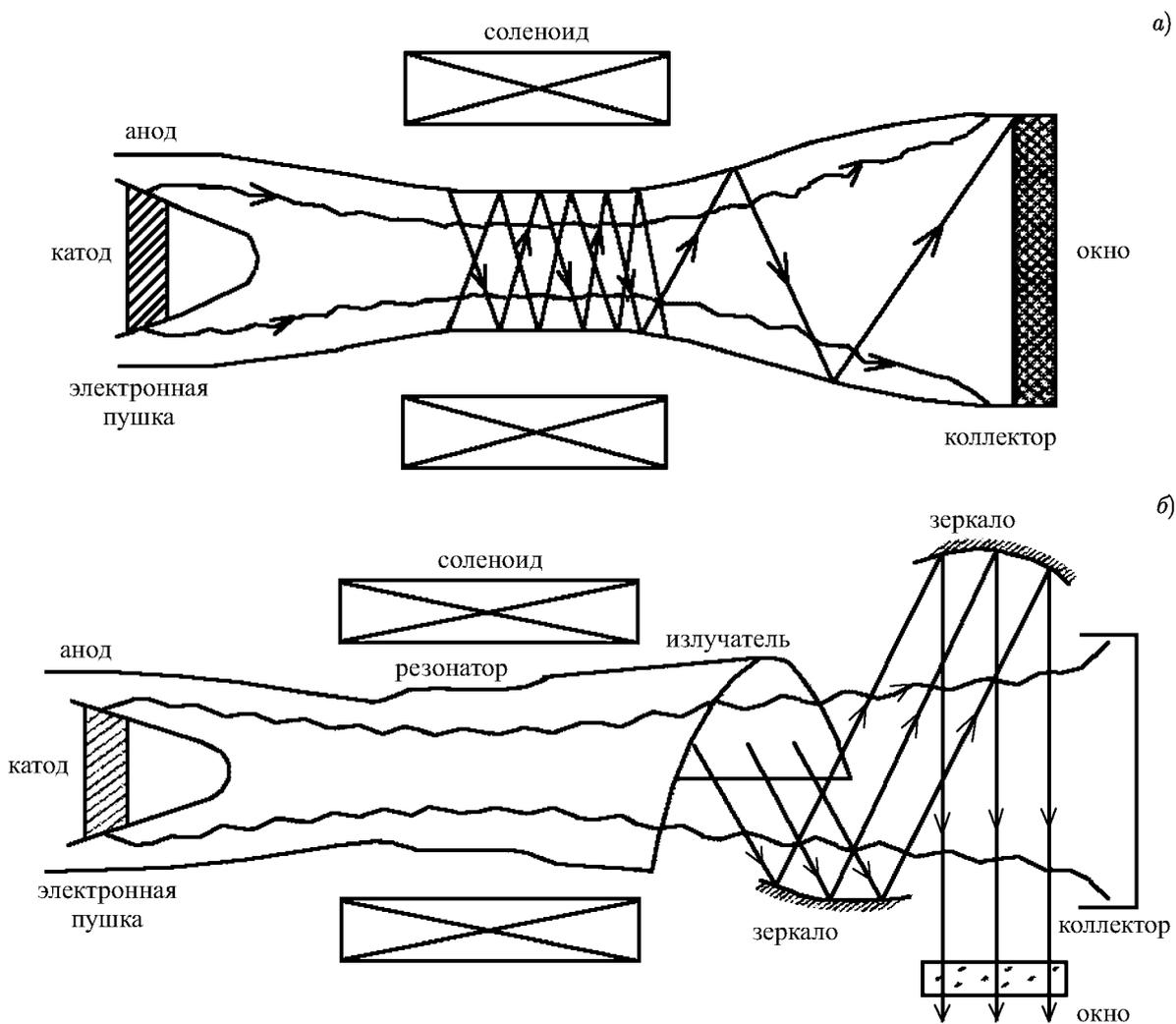


Рис. 2. Общие схемы гиротронов (а) с прямым (аксиальным) выводом мощности и (б) с преобразователем (с радиальным выводом мощности)

к их полной энергии, Q_{ohm} и Q_d — дифракционная и омическая добротности, η_w — коэффициент пропускания выходного окна. Величины I и t_{\perp} определяются системами формирования и транспортировки винтового электронного пучка. За последние два десятилетия энергия в импульсе гиротрона (произведение мощности излучения на длительность импульса) выросла более чем на три порядка. По мере повышения мощности и рабочей частоты гиротрона происходило повышение типа рабочих мод, что позволило удержать плотность омических потерь на приемлемом уровне и повышать ток пучка. В табл. 1 приведены типичные рабочие моды гиротронов разных лет разработки, отношение диаметра резонатора $2R_c$ к длине волны излучения λ , отношение радиуса резонатора к радиусу пучка R_0 и параметр сверхразмерности S , определяемый отношением площади поперечного сечения резонатора к квадрату длины волны. Отметим, что для классических электронных приборов величина S существенно меньше. Для резонаторов гиротронов с длительностью импульса до 1 секунды в НПП «ГИКОМ» используются сравнительно простые и экономичные конструкции, в которых реализуется нестационарный тепловой режим массивного блока резонатора: охлаждение во время импульса не играет значительной роли, резонатор сильно разогревается, а его охлаждение происходит между импульсами сравнительно слабым по-

Таблица 1

год	мода	$2R_c/\lambda$	R_c/R_0	S
1970	TE ₀₂	2	0,30	4
1989	TE _{15,4}	10	0,53	80
1994	TE _{22,6}	15	0,50	180
1999	TE _{25,10} , TE _{31,8}	20	0,40	300
2006	TE _{28,12} , TE _{31,12}	25	0,40	500

током воды. По существу, в этом случае ограничение налагается на энергию импульса (часто это называют режимом с использованием интегральной теплоёмкости). Для длинноимпульсных и непрерывных гиротронов разработаны эффективные системы интенсивного охлаждения резонатора, позволяющие снимать тепловую нагрузку до 2,5 кВт/см². В случае ограничения плотности омических потерь в резонаторе существует оценочная формула для КПД гиротрона [12, 21]:

$$\eta \approx \frac{0,26g^{3/2}\nu_s^{5/4}((\lambda[\text{мм}])^{5/2}P_{\text{ohm}}[\text{кВт/см}^2])^{3/4}}{(1+g^2)^{1/2}m^{1/4}(U[\text{кВ}]P[\text{кВт}])^{1/2}}, \quad (3)$$

где λ — длина волны в свободном пространстве, g — питч-фактор (отношение скорости осциляторного движения электронов к их продольной скорости), ν_s — корень уравнения $J'_m(\nu_s) = 0$, соответствующий моде TE _{m p} с азимутальным и радиальным индексами m и p соответственно, и $J'_m(\nu)$ — производная функции Бесселя m -го порядка $J_m(\nu)$ по аргументу, P_{ohm} — удельная плотность омических потерь в резонаторе, P — выходная мощность. Соответствующая величина тока пучка определяется из уравнения (2а). При выводе формулы (3) использовалась упрощённая модель гиротрона и пренебрегалось отличием величин η_c , η_w , $Q_{\text{ohm}}/(Q_{\text{ohm}} + Q_d)$ от 1, (т. е. $\eta = t_{\perp} \perp \eta_{\perp}$). Результаты численного моделирования для детализированной самосогласованной модели гиротрона находятся в хорошем соответствии с оценкой (3).

Выражение (3) ясно показывает, что предотвратить резкое падение КПД с увеличением рабочей частоты и выходной мощности гиротронов можно только путём увеличения ν_s , т. е. используя всё более высокие рабочие моды. Именно эта тенденция прослеживается в развитии гиротронов и иллюстрируется данными табл. 1. Приемлемые величины ν_s (m и p) и, соответственно, радиусы резонатора R_c и электронного пучка R_0 в конкретных ситуациях ограничиваются процессами взаимодействия мод в сверхразмерных резонаторах (увеличивается число мод, попадающих в полосу циклотронного резонанса и одновременно взаимодействующих с электронным пучком) [5], а также эффектом «провисания» потенциала [6] или техническими условиями.

Электронно-оптическая система гиротрона состоит из нескольких подсистем: формирования винтового электронного пучка (электронная пушка), его транспортировки (участок дрейфа, где происходит компрессия электронного пучка в нарастающем магнитном поле, участок пролёта через резонатор и участок декомпрессии) и осаждения отработанного пучка (коллектор). Электронная магнетронно-инжекторная пушка должна обеспечить формирование устойчивого винтового электронного пучка с долей энергии осциляторного движения частиц 60÷70% от полной энергии при рабочем токе до 40÷50 А, а разброс скоростей не должен превышать 30% [6, 11–14]. Разброс скоростей δv_{\perp} обусловлен рядом причин, среди которых наиболее важны неоднородности электрических и магнитных полей на катоде, шероховатость его поверхности (существенны даже неоднородности с масштабом порядка 1 мкм) и эффекты, связанные с пространственным зарядом пучка. Из-за разброса скоростей δv_{\perp} электроны попадают в область максимального поля в резонаторе с большим разбросом поступательных скоростей δv_{\parallel} . Электроны, имеющие максимальные начальные скорости, могут даже отразиться от магнитной пробки. При отсутствии отражённых

частиц соотношение

$$t_{\perp} \leq \frac{1}{1 + \delta v_{\perp}} \quad (4)$$

(или $g^2 \leq 1/\delta v_{\perp}$), по существу, определяет эффективность электронной пушки [6]. Кроме того, разброс поперечных скоростей непосредственно влияет на эффективность взаимодействия. Согласно исследованиям самосогласованных моделей гиротронов мегаваттного уровня мощности [21] влияние разбросов скоростей δv_{\perp} и энергий $\delta\gamma$, где γ — лоренц-фактор, на КПД гиротрона может быть аппроксимировано формулой

$$\eta = \eta_{\max}[1 - K_{\gamma}(\delta\gamma)^2 - K_{v_{\perp}}(\delta v_{\perp})^2]. \quad (5)$$

В мощных гиротронах обычно $K_{\gamma} = 425$, $K_{v_{\perp}} = 0,4$, реальный разброс начальных энергий электронов $\delta\gamma$ не превышает 1%, разброс скоростей $\delta v_{\perp} \approx 30 \div 40\%$ [5, 6, 21].

Форма электродов пушки оптимизируется при помощи современных компьютерных кодов. Полученные из экспериментов характеристики пучка сравниваются с результатами численного моделирования, и, если наблюдается хорошее соответствие, магнетронно-инжекторная пушка устанавливается в гиротрон. В отличие от других электронных приборов магнетронно-инжекторные пушки гиротронов работают в режиме температурного ограничения эмиссии, что предъявляет повышенные требования к однородности эмиттера. Эмиттеры большинства зарубежных гиротронов являются импрегнированными и построены на основе соединений бария. В российских гиротронах используются и бариевые эмиттеры, и высокотемпературные эмиттеры на основе гексаборида лантана. Средний диаметр эмиттеров катодов для мощных гиротронов достигает 100 мм. Для изготовления и контроля эмиттеров гиротронов разработаны надёжная технология и оборудование [14].

Другой важной проблемой является транспортировка винтового электронного пучка от катода через резонатор гиротрона до коллектора без потери устойчивости. При этом существенную роль играют эффекты, обусловленные собственным пространственным зарядом пучка, которые выражены гораздо сильнее, чем в случае прямолинейных электронных пучков [6]. Пространство дрейфа долгое время не привлекало внимание разработчиков гиротронов, пока паразитные явления на этом участке не стали серьёзным препятствием для увеличения мощности и длительности импульса гиротрона. Эти паразитные колебания не только ухудшают характеристики гиротронов, но и могут приводить к интенсивным помехам на частотах порядка 100 МГц [6]. В настоящее время «трубка дрейфа» — это, как правило, достаточно сложная конструкция из металла и керамики с поглотителями [17, 18].

Ток и ускоряющее напряжение электронного пучка гиротрона определяются возможностями электронно-оптической системы, причём ток может быть увеличен с ростом среднего радиуса пучка в резонаторе и радиуса катода, т. е. при использовании достаточно высоких рабочих мод ($m \gg 1$) [6]. Долгое время основной рабочей модой была TE_{02} , что хорошо сопрягалось с осевым выводом энергии на рабочей моде, когда выходной волновод является и коллектором электронного пучка (см. рис. 2а). С ростом выходной мощности эта схема стала демонстрировать очевидные недостатки. Коллектор получает чрезмерные удельные тепловые нагрузки, и его площадь желательно увеличивать. Однако поскольку он совмещён с выходным волноводом, примыкающим к выходному окну, то возможности изменения его конфигурации весьма ограничены. Профилирование, статическое и динамическое «размазывание» электронного пучка по длине с помощью дополнительных магнитных полей дали ограниченный эффект. Попытки локально, только в области оседания пучка, увеличить радиус волновода-коллектора в ряде случаев приводят к появлению паразитных резонансов, негативно влияющих на работу гиро-

трона. Одновременное увеличение поперечного сечения волновода-коллектора и выходного окна существенно усложняет конструкцию лампы, растёт её длина, обостряются технологические проблемы. Радикальным решением является разделение функций системы вывода излучения и коллектора электронного пучка. Одним из вариантов такого решения является разрыв в волноведущем тракте (возможно, с дополнительными электродинамическими элементами), через который электронный пучок выводится на коллектор большего диаметра, а вывод энергии по-прежнему осуществляется вдоль оси гиротрона [22]. Другим вариантом является использование встроенного квазиоптического преобразователя (см. рис. 2б) с выводом излучения под углом к оси гиротрона или перпендикулярно ей [22] (в литературе такой способ часто называется радиальным выводом). Последний вариант оказался наиболее перспективным, однако поначалу воспринимался как временное решение. Причинами такого отношения было нарушение аксиальной симметрии прибора, обусловленное этим усложнение технологии изготовления и низкая эффективность преобразования в ранних экземплярах квазиоптических преобразователей (потери достигали 20%). Однако уже первые отечественные опытно-промышленные гиротроны со встроенным преобразователем существенно (типичные примеры таких гиротронов НПП «ГИКОМ» показаны на рис. 3) превзошли приборы с осевым выводом по уровню выходной мощности и заняли лидирующие позиции в мире (см. рис. 1). Ведущие зарубежные производители гиротронов — СРІ (ранее «Вариан»), «Тошиба», «Талес» («Thales», ранее «Томсон») — также стали успешно использовать встроенный преобразователь в мощных гиротронах [17–19]. На рис. 4 показаны гиротроны фирмы СРІ: гиротрон (110 ГГц/1 МВт) для плазменных исследований со встроенным квазиоптическим преобразователем (на заднем плане) и с аксиальным выводом для технологических приложений (в руках). Квазиоптический преобразователь отделяет высокочастотное излучение от отработанного электронного пучка, преобразует сложную моду резонатора TE_{mp} в линейно поляризованный параксиальный волновой пучок с оптимизированной структурой, позволяет минимизировать вредное воздействие возможных отражений высокочастотного излучения.

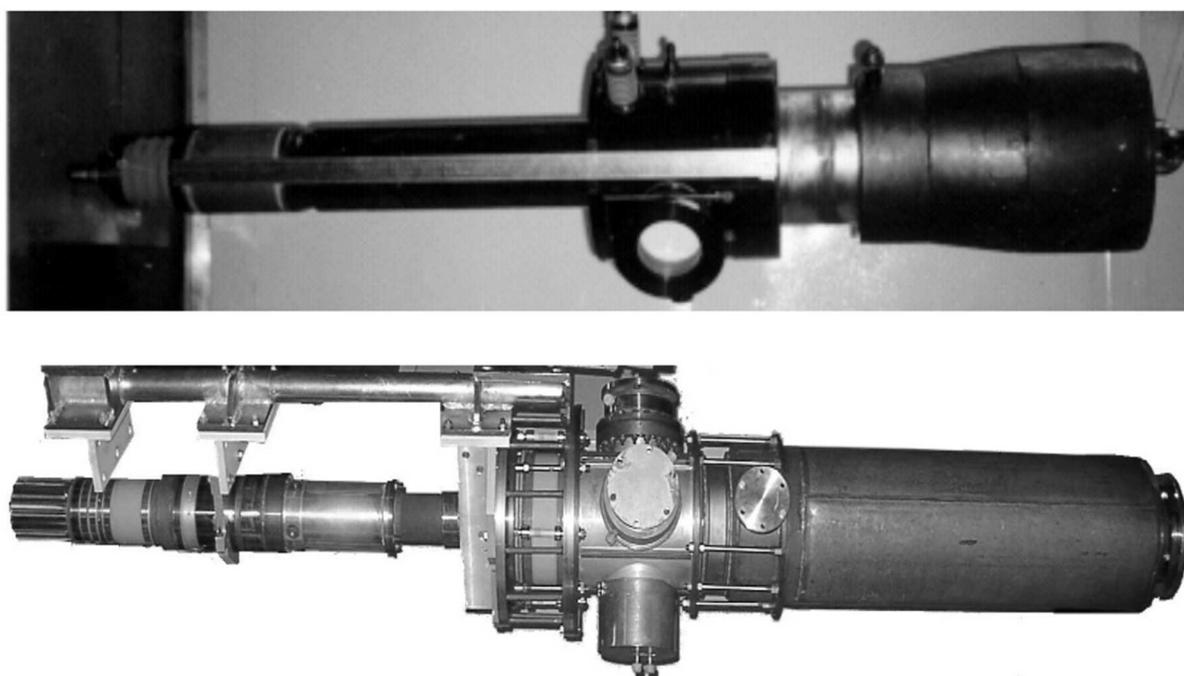


Рис. 3. Гиротроны со встроенным преобразователем (НПП «ГИКОМ»)

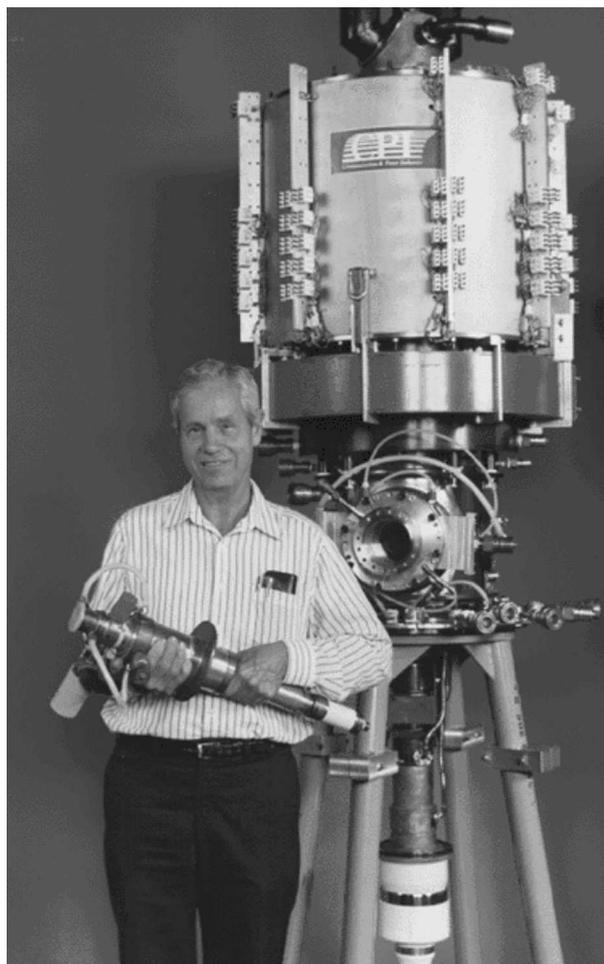


Рис. 4. Гиротроны СРІ (ранее «Вариан», США)

ация имеет место для окон из нитрида бора (BN) и ряда других материалов. При длительности импульса много больше 2 с, практически вплоть до непрерывного режима, во время СВЧ импульса имеет место интенсивное охлаждение окна в стационарном режиме либо по поверхности (двухдисковое окно), либо по периметру диэлектрического диска.

Для непрерывного гиротрона с мощностью выходного излучения 1 МВт или более в настоящее время рассматривается единственный возможный тип окна — на основе искусственных алмазных дисков (CVD-технология) [9, 16], отличающихся высокой теплопроводностью и малыми потерями СВЧ излучения. В последнее время практически всеми основными разработчиками гиротронов, как у нас в стране, так и за рубежом, разработаны варианты конструкции и выполнены эксперименты с такими окнами. Основным недостатком алмазного окна является его чрезвычайно высокая стоимость. В силу этого обстоятельства интенсивно исследуются другие перспективные материалы. Ограничение пропускной способности применяемых в настоящее время в гиротронах окон на основе дисков из CVD-алмаза оценивается на уровне в несколько мегаватт. При ограничении пропускной способности единичного окна выходное излучение может быть разделено на несколько волновых пучков внутри гиротрона и выведено через несколько окон.

Коллектор гиротрона должен обеспечить осаждение отработанного электронного пучка с приемлемым уровнем плотности мощности. Для гиротронов с длительностью импульса до двух се-

стотного излучения на гиротрон. Развитие методики расчёта и технологии изготовления зеркал привели в последние годы к существенному повышению эффективности преобразователей: от $80 \div 85\%$ до $95 \div 98\%$ [14–16]. При этом основную опасность представляют потери внутри гиротрона, провоцирующие неконтролируемый перегрев элементов гиротрона и высокочастотные пробой. При повышении эффективности преобразователей от 85% до 95% потери снижаются втрое, что создаёт предпосылки для существенного повышения мощности гиротрона. Для уменьшения негативного влияния рассеянного излучения приходится дополнительно экранировать керамические элементы конструкции или использовать керамику с малым уровнем высокочастотных потерь, также используются дополнительные балластные окна или внутренние охлаждаемые поглотители [14–20].

Проблема выходного окна для гиротронов с мощностью $0,5 \div 1$ МВт в настоящее время решается разными методами в зависимости от длительности импульса излучения. При длительности импульса до $2 \div 3$ с реализуется нестационарный тепловой режим окна, охлаждение во время импульса не играет значительной роли, окно сильно разогревается, а его охлаждение происходит между импульсами. По существу, ограничение налагается на энергию импульса. Такая ситуация

кунд в НПП «ГИКОМ» используются относительно простые коллекторные системы с нагревом массивного коллектора во время импульса и охлаждением коллектора между импульсами сравнительно слабым потоком воды. Увеличение размеров и оптимизация коллектора при использовании квазиоптического преобразователя, сканирование электронного пучка по поверхности с помощью наложения переменного во времени поперечного и/или продольного магнитного поля снижают тепловую нагрузку на коллектор, но для мощных непрерывных гиротронов проблема остаётся весьма серьёзной. Рекуперация части энергии отработанного электронного пучка при использовании изолированного коллектора с тормозящим потенциалом (CPD-коллектор) [5, 6, 11] позволяет значительно повысить КПД гиротрона (т. е. снизить требуемую мощность источников высокого напряжения для достижения того же уровня выходной мощности), уменьшить тепловую нагрузку на коллектор и упростить систему его охлаждения. Наибольшее количество охлаждающей воды для гиротрона тратится именно на охлаждение коллектора, что особенно важно для непрерывных гиротронов с мощностью выходного излучения порядка 1 МВт и более [16–20]. Простые оценки показывают, что тот же тип коллектора может быть использован и в высокоэффективном гиротроне существенно большей выходной мощности. КПД гиротрона с рекуперацией определяется как начальным КПД гиротрона и функцией распределения электронов в отработанном пучке, так и расположением тормозящей электростатической линзы. Расчёты идеализированных моделей гиротронов с одноступенчатой рекуперацией показывают возможность достижения КПД 70 % и выше [14]. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований прототипов короткоимпульсных гиротронов с рабочей частотой 110÷170 ГГц и мощностью выходного излучения 1 МВт, для которых КПД с рекуперацией достигал 65÷70 % [12]. Дальнейшее увеличение эффективности систем с рекуперацией энергии возможно за счёт применения многоступенчатых коллекторов [6].

Быстрое развитие гиротронов для УТС продвинуло методы электронно-циклотронного нагрева и управления параметрами плазмы на лидирующие позиции среди других методов нагрева [17, 20]. Это иллюстрирует табл. 2, которая показывает рейтинг различных методов нагрева в различные годы. Современные гиротроны для УТС с частотой 80÷170 ГГц, выпускаемые российскими и зарубежными предприятиями, достигли мегаваттного уровня мощности в непрерывном режиме. В этих гиротронах используются близкие технические решения и сходные технологии производства, даже внешне они становятся всё более похожими, демонстрируя явление конвергенции в технике. Отечественными и зарубежными разработчиками гиротронов продолжают работы по наращиванию мощности гиротронов до 1,5÷2 МВт и повышению их КПД. Проводится также разработка многочастотных приборов и методов быстрого управления параметрами выходного излучения [16–20].

Развитие почти любого технического устройства проходит ряд этапов. На первом проверяются максимальные достижимые параметры, а экономичность и удобство эксплуатации стоят на втором плане. Когда устройства получают широкое распространение, их технологические, экономические и эксплуатационные характеристики становятся более важными. На втором этапе более значимыми становятся надёжность, дешевизна, удобство эксплуатации и экологичность приборов. Влияние основных факторов на характеристики гиротрона рассмотрено в [21], где показано, что возможности дальнейшего повышения эффективности гиротронов лежат в совместной комплексной оптимизации всех их подсистем. На современном этапе широкое применение нахо-

Таблица 2

год	1993	1997	2006	2007
1	NB	NB	NB	EC
2	IC	IC	EC	NB
3	LH	EC	IC	IC
4	EC	LH	LH	LH

EC — электронно-циклотронный нагрев, IC — ионно-циклотронный нагрев, LH — ниже-гибридный нагрев, NB — нейтральная инжекция

дят «сухие» криомагнитные системы, не требующие использования жидких хладагентов (азота и гелия). Разрабатываются современные высокоэффективные источники питания гиротронов с быстрой защитой и компьютерным управлением, замкнутые системы интенсивного охлаждения, линии передачи с малыми потерями.

Другим важным направлением развития является разработка гиротронов для технологических применений [8–10]. Некоторые из них представляют собой упрощённую версию гиротронов для УТС с рабочей частотой $50 \div 90$ ГГц (первая гармоника гирочастоты) и непрерывной выходной мощностью порядка десяти киловатт. Однако эти системы с криомагнитами дороги и сложны в эксплуатации, поэтому разрабатываются также специализированные гиротронные технологические комплексы с магнитами, имеющими масляное или водяное охлаждение, и с постоянными магнитами. Первый такой комплекс был разработан в ГИ «Салют» (предшественник НПП «ГИКОМ») ещё в 1975 году. В основе этого комплекса был гиротрон на второй гирогармонике с рабочей частотой $33 \div 47$ ГГц, непрерывной выходной мощностью $3 \div 5$ кВт, аксиальным выводом мощности [23] и соленоидом с масляным охлаждением. Комплекс был изготовлен в нескольких экземплярах для разных заказчиков и содержал все основные элементы современных технологических гиротронных систем за исключением компьютерного управления. К сожалению, комплекс опередил своё время, и по причине отсутствия заказов его производство было прекращено. В начале 90-х годов прошлого века в ИПФ РАН совместно с НПП «ГИКОМ» был создан технологический гиротронный комплекс на основе гиротрона на второй гирогармонике с мощностью 10 кВт и рабочей частотой 30 ГГц и магнита с масляным охлаждением [24]. В конструкцию лампы была заложена возможность изменения её рабочей частоты с 24 до 37 ГГц и повышения мощности до $15 \div 20$ кВт. Один из первых экземпляров такого комплекса был поставлен в Исследовательский центр Карлсруэ (ФРГ), где он по сей день используется для разработки новых технологий керамических и композитных материалов. Несколько позже на основе комплекса с рабочей частотой 30 ГГц были разработаны версии с частотами 24 и 28 ГГц для поставки в США, Японию и страны Европы. Различия в частотах объясняются тем, что в европейских странах действует стандарт разрешённых для промышленности, науки и медицины частот (ISM, Industry, Science, Medicine): 0,915; 2,45; 5,8; 24,125; 61,25 ГГц и др., а в США и Японии широко распространённой является частота 28 ГГц. Отметим, что частоты ISM соответствуют максимумам поглощения в атмосфере (в линиях O_2 и H_2O), а 28 ГГц соответствует циклотронной частоте электрона в магнитном поле с индукцией 1 Тл. Также были разработаны предварительные проекты гиротронных комплексов с мощностью 30 и 100 кВт для промышленных приложений, однако востребованными оказались компактные лабораторные комплексы с мощностью 3 кВт [25, 26]. В настоящее время российские гиротронные комплексы используются во многих лабораториях разных стран для исследований в области технологии перспективных материалов, плазмохимии, создания многозарядных ионов и др.

В США фирмой CPI был разработан технологический комплекс на основе гиротрона на второй гармонике гирочастоты с мощностью 10 кВт и рабочей частотой 28 ГГц (см. рис. 4) и магнита с водяным охлаждением [9], а в Японии фирмой «Мицубиси» разработан технологический комплекс на основе гиротрона на второй гармонике гирочастоты с мощностью 10 кВт, рабочей частотой 28 ГГц и постоянным магнитом [27]. Применение постоянных магнитов снижает энергопотребление и эксплуатационные расходы, но стоимость комплекса несколько повышается. В ИПФ РАН совместно с НПП «ГИКОМ» были разработаны гиротроны с постоянным магнитом, работающие на частоте 28 ГГц с выходной мощностью 10 кВт [25] и на частоте 24 ГГц с выходной мощностью 3 кВт [28]. Последний в составе комплекса был поставлен в Университет г. Осака (Япония), где успешно работает по сей день.

В ИПФ РАН совместно с НПП «ГИКОМ» для Центра исследований дальнего инфракрасного

диапазона Университета г. Фукуи (Япония) был разработан непрерывный гиротрон с мощностью 3 кВт и рабочей частотой 300 ГГц, использующий «сухой» криомагнит фирмы «Джастек» (JASTEC, Япония) [29]. Уникальный комплекс на основе этого гиротрона (см. рис. 5) успешно используется с 2005 года для технологических, биологических и медицинских исследований.



Рис. 5. Гиротрон с рабочей частотой 300 ГГц с «сухим» криомагнитом

тивны для приложений спектрометров в химии, биологии, медицине и смежных областях. Для этих приложений требуются высокостабильные источники с мощностью несколько десятков ватт на частотах электронно-спинового резонанса (263; 395 ГГц и т. д.), соответствующих частотам ионно-спинового резонанса H_1 в ЯМР-спектрометрах (400; 600 МГц и т. д.). Первые гиротроны для динамической ядерной поляризации были разработаны в Массачусетском технологическом институте (MIT, США) и Центре исследований дальнего инфракрасного диапазона Университета г. Фукуи (Япония), и уже первые эксперименты показали высокую эффективность ДЯП [30, 31]. Вскоре после этого в США для использования в ЯМР-спектрометрах с рабочей частотой 400 МГц производства компании «Брукер» («Bruker») фирмой SPI был разработан ДЯП-комплекс на базе гиротрона с мощностью 25 Вт и рабочей частотой 263 ГГц на основном гирорезонансе с криомагнитом, обеспечивающим магнитное поле 9,7 Тл. В настоящее время эти комплексы поставляются в комплекте со спектрометрами.

В ИПФ РАН совместно с НПП «ГИКОМ» для Института биофизической химии Университета г. Франкфурта-на-Майне (ФРГ) был разработан гиротронный ДЯП-комплекс на основе гиротрона на второй гирогармонике с мощностью 100 Вт, рабочей частотой 258,6 ГГц (частота выбрана заказчиком) и криомагнитом, обеспечивающим магнитное поле 4,7 Тл [32]. Долговременная отно-

В США фирмой SPI был разработан гиротрон с мощностью 100 кВт и рабочей частотой 95 ГГц с сухим криомагнитом. Гиротрон разработан в качестве основы системы «нелетального оружия» («Non-lethal Weapons»), но доступен и другим заказчикам и вполне пригоден для технологических применений.

Современное развитие науки и техники сопровождается появлением новых материалов и технологических процессов в химии полимеров и композитов, биохимии, медицине, производстве лекарств и керамических материалов и т. д. Для проведения необходимых исследований и контроля производства требуется разработка новых методов диагностики и спектроскопии. Одним из новых и быстро развивающихся приложений гиротронов является спектроскопия на основе электронного парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Использование излучения гиротронов для динамической ядерной поляризации (ДЯП, в англоязычной литературе — DNP, Dynamic Nuclear Polarization) в ЯМР-спектрометрах даёт возможность повысить их чувствительность в десятки раз. Такое повышение чувствительности за счёт динамической ядерной поляризации раскрывает широкие перспек-



Рис. 6. Гиротронный комплекс для ДЯП

сительная нестабильность выходной мощности гиротрона не превышает 1% (контрактное значение 10%), а нестабильность частоты составляет $3 \cdot 10^{-6}$ (контрактное значение 10^{-5}). Изменением температуры резонатора можно выполнять подстройку частоты на уровне 4 МГц/К. Комплекс (см. рис. 6) успешно используется с 2009 года для химических и биологических исследований; продемонстрировано повышение чувствительности ЯМР вследствие применения динамической ядерной поляризации в 80 раз [33].

Надо отметить, что источники излучения для ДЯП ещё далеки от совершенства, поскольку находятся на начальном этапе развития и содержат ряд атавизмов. В настоящее время проводятся разработки гиротронных ДЯП-комплексов с улучшенными потребительскими свойствами, предназначенных для работы на более высоких частотах, рассматривается возможность использования гиро-ЛОВ и гироклистронов для управления характеристиками излучения. Источники с близкими характеристиками востребованы и для диагностики плазмы.

Суммируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

- 1) Гиротроны для УТС выдвинули методы электронно-циклотронного нагрева и управления параметрами плазмы на лидирующие позиции среди других методов нагрева;
- 2) Технологические гиротронные комплексы стали надёжным инструментом разработки новых материалов и методов обработки;
- 3) Гиротроны для диагностики плазмы и спектроскопии находятся на начальной стадии развития и имеют большие перспективы;
- 4) Использование новых магнитных систем создаёт предпосылки для дальнейшего развития гироприборов и их приложений.

Среди тенденций развития гиротронов надо отметить следующие:

- 1) увеличение мощности гиротронов на основном циклотронном резонансе при сохранении омической нагрузки в резонаторе (УТС);
- 2) создание мощных многочастотных гиротронов (УТС);
- 3) продвижение в субтерагерцовый диапазон на высоком уровне выходной мощности (диагностика, технологии);
- 4) продвижение в терагерцовый диапазон на среднем уровне выходной мощности при работе на гармониках гирочастоты (диагностика, спектроскопия).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-02-97107-р_поволжье_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 223931 СССР. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн / Гапонов А. В., Гольденберг А. Л., Петелин М. И., Юлпатов В. К. Заявл. 24.03.1967, опубл. 25.03.1976.
2. Гапонов-Грехов А. В., Петелин М. И. // Наука и человечество. М.: Знание, 1980. С. 283.
3. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003.
4. Gyrotron oscillators — their principles and practice / Ed. by C. J. Edgcombe. London: Taylor and Francis, 1993.
5. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. London: The Johns Hopkins University Press, 2004.
6. Tsimring Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2007.
7. Kartikeyan M. V., Borie E., Thumm M. K. A. Gyrotrons — high power microwave and millimeter wave technology. Springer: Berlin, 2004.
8. Gaponov-Grekhov A. V., Granatstein V. L. Applications of high-power microwaves. Norwood: Artech House, 1994.
9. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Karlsruhe: KIT, 2009.
10. Thumm M. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2005. V. 26. P. 483.
11. Fix A. Sh., Flyagin V. A., Goldenberg A. L., et al. // Int. J. Electron. 1984. V. 57, No. 6. P. 821.
12. Zapevalov V. E., Flyagin V. A., Denisov G. G., et al. // Plasma Devices and Operation. 1998. V. 6. P. 111.
13. Zapevalov V. E., Denisov G. G., Flyagin V. A., et al. // Plasma Engineering and Design. 2001. V. 53. P. 377.
14. Денисов Г. Г., Запевалов В. Е., Литвак А. Г., Мясников В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 845.
15. Denisov G. G., Litvak A. G., Myasnikov V. E., et al. // Nuclear Fusion. 2008. V. 48, No. 5. P. 5.
16. Litvak A. G., Denisov G. G., Zapevalov V. E., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 13.
17. Sakamoto K., Kajiwara K., Oda Y., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 35.
18. Blank M., Borchard P., Cahalan P., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 9.
19. Thumm M., Braune H., Dammertz G., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 45.
20. Henderson M., Denisov G., Litvak A., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 21.
21. Запевалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 864.
22. Агапов Л. Н., Богданов С. Д., Власов С. Н. и др. // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 221.
23. Малыгин О. В., Орлов В. Б., Рубинштейн Л. Ш., Щупак В. И. // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 226.
24. Bykov Yu., Eremeev A., Flyagin V., et al. // Ceramic Transaction. 1995. V. 59. P. 133.
25. Kuftin A. N., Flyagin V. A., Lygin V. K., et al. // Proc. Int. Workshop “Strong Microwaves in Plasmas”. Nizhny Novgorod, 2000. P. 671.

26. Soluyanov E. A., Bykov Yu. V., Denisov G. G., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, 2011. P. 133.
27. Kikunaga T., Asano H., Yasojima et al. // Int. J. Electronics. 1995. V. 79. P. 655.
28. Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A., et al. // 29th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. Terahertz Electronics, University of Karlsruhe, Germany, Conference Digest, 2004. P. M12.3-191.
29. Запевалов В. Е., Малыгин О. В., Моисеев М. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 6. С. 461.
30. Bajaj V., Farrar C., Hornstein M., et al. // J. Magnetic. Res. 2002. V. 160. P. 85.
31. Idehara T., Ogawa I., Agusu La, et al. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2007. V. 28. P. 433.
32. Венедиктов Н. П., Дубров В. В., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
33. Denysenkov V., Prandolini M. J., Gafurov M., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12, No. 22. P. 5786.

Поступила в редакцию 19 сентября 2011 г.; принята в печать 28 октября 2011 г.

EVOLUTION OF THE GYROTRONS

V. E. Zapevalov

Based on a retrospective analysis of the domestic and foreign works dealing with a variety of gyrotron applications and performed in the past decades, we show the main trends in the development of gyrotrons of different frequency ranges and different levels of output power. The main areas of application of modern gyrotrons and the specific requirements of each field are described. An overview of recent achievements, as well as major problems that hinder the further progress in gyroscopic devices toward higher frequencies and capacities is given. The methods of solution of these problems by the world's leading research organizations and manufacturing companies are considered.