

УДК 621.385.69

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОДСИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ ГЕНЕРАЦИИ 0,26 ТГц НА ОСНОВНОМ ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

М. Ю. Глявин<sup>1,2</sup>, Г. Г. Денисов<sup>1,2</sup>, В. Е. Запевалов<sup>1</sup>, А. Н. Куфтин<sup>1</sup>, В. Н. Мануилов<sup>1,3</sup>,  
Е. А. Солуянова<sup>2</sup>, А. С. Седов<sup>1\*</sup>, В. В. Холопцев<sup>1</sup>, А. В. Чирков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

<sup>2</sup> ЗАО НПП «Гиком»;

<sup>3</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В статье представлены результаты разработки основных узлов работающего в непрерывном режиме гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц. С целью улучшения селективности рабочего типа колебаний в сверхразмерной электродинамической системе гиротрон работает на основной циклотронной гармонике, для чего предполагается использовать не требующий заливки жидким гелием криомагнит с максимальным магнитным полем 10 Тл. Приведены результаты оптимизации электронно-оптической системы, резонатора, квазиоптического преобразователя выходного излучения, а также описывается разработанная для комплекса система управления.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время миллиметровые и субмиллиметровые волны (диапазон частот 0,1÷10 ТГц) широко используются для многочисленных научных и технических приложений [1–3]. Наиболее интенсивно проводятся исследования в области спектроскопии высокого разрешения, например развиваются методы электронного парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса. Одним из наиболее перспективных источников терагерцевого излучения является гиротрон — устройство, основанное на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле [4, 5].

Разработка гиротронов для спектроскопических приложений ведётся в большинстве мировых научных центров, связанных с вакуумной электроникой. Так, в Массачусетском технологическом институте (США) создана серия относительно маломощных (десятки ватт) субтерагерцевых гиротронов, в том числе на гармониках гирочастоты [6, 7]. Опытно-промышленные разработки гиротронов в США ведутся также фирмой CPI совместно с компанией «Bruker Biospin». Этой компанией на базе гиротронов с рабочей частотой 0,263 ТГц (первая гармоника гирочастоты) с использованием криомагнитов с охлаждением жидким гелием, а также с частотами 0,263; 0,395 и 0,527 ТГц (вторая гармоника гирочастоты) [8] впервые в мире реализованы коммерчески доступные варианты спектрометра на ядерном магнитном резонансе (ЯМР-спектрометра) высокого разрешения с использованием динамической поляризации ядер для кардинального повышения чувствительности [9]. В Центре разработки приборов дальнего инфракрасного диапазона (г. Фукуи, Япония) создана серия работающих в непрерывном режиме гиротронов как с осевым выводом излучения на рабочей моде, так и с преобразованием рабочей моды в узконаправленный волновой пучок на частотах 0,2÷0,46 ТГц [10]. В Центре изучения физики плазмы (г. Лозанна, Швейцария) недавно был реализован непрерывно работающий гиротрон с частотой генерации 0,26 ТГц. Характерная мощность всех вышеперечисленных гиротронов составляет несколько сотен ватт, максимальная мощность не превышает 400 Вт [11].

\* anton-sedov@mail.ru

В России первые успешные эксперименты по генерации субмиллиметрового излучения гиротронами были выполнены в 70–80 годы прошлого века [12, 13]. После этих пионерских работ основное внимание исследователей было сосредоточено на создании мощных гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. Также необходимо отметить отсутствие современных отечественных криомагнитов с высоким уровнем индукции магнитного поля, достаточно большим проходным диаметром «тёплого» отверстия и приемлемым уровнем потребительских характеристик.

В 2007 году в ИПФ РАН и НПП «Гиком» для Центра исследований излучения дальнего инфракрасного диапазона Университета г. Фукуи [14] был создан непрерывно работающий гиротрон с частотой генерации 300 ГГц на первой гармонике гирочастоты. Он активно использовался для исследований новых материалов, биологических и медицинских приложений. В 2009 году в ИПФ РАН и НПП «Гиком» впервые в России был разработан гиротрон на второй гармонике гирочастоты с частотой генерации 0,258 ТГц и мощностью до 200 Вт при стабильности частоты и мощности генерации за 12 часов работы не хуже  $3 \cdot 10^{-6}$  и  $10^{-2}$  соответственно, предназначенный для ЯМР-спектрометра с использованием динамической поляризации ядер [15]. Эксперименты, проводившиеся с использованием этого генератора в Институте биофизической химии Университета им. И. В. Гете (г. Франкфурт-на-Майне, Германия), позволили в 80 раз повысить чувствительность и разрешающую способность ЯМР-спектрометра [16]. К недостаткам указанного комплекса следует отнести использование заливного криомагнита с периодичностью добавления жидкого гелия раз в несколько дней, недостаточную эффективность внешнего квазиоптического преобразователя и отсутствие автоматизированной системы управления, что существенно снижало его потребительскую привлекательность. Краткий обзор работ по терагерцовым гиротронам в ИПФ РАН приводится, в частности, в статьях [17, 18].

С целью устранения отмеченных недостатков и дальнейшего усовершенствования систем подобного рода был разработан новый гиротронный комплекс с использованием не требующего заливки жидким гелием криомагнита JMТD10T100 фирмы JASTEC (Япония) с максимальной индукцией магнитного поля 10 Тл [19]. Ниже описывается оптимизация узлов предназначенного для использования в указанном комплексе гиротрона с рабочей частотой 0,263 ТГц, генерирующего на первой гармонике гирочастоты.

## 1. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Основные параметры криомагнита JMТD10T100, под которые оптимизировался описываемый в статье гиротрон, и, в частности, электронно-оптическая система (ЭОС) лампы представлены в табл. 1.

По мере укорочения рабочей длины волны гиротрона (в рассматриваемом случае длина волны  $\lambda \approx 1,1$  мм) формирование винтового электронного пучка с низким уровнем разброса скоростей и высокой долей энергии вращения электронов становится всё более сложным. В частности, из адиабатической теории магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [20, 21] следует, что при прочих равных условиях величина компрессии магнитного поля  $\alpha = B_0/B_k$ , где  $B_0$  и  $B_k$  — поля в рабочем пространстве и на эмиттере соответственно, растёт как  $\alpha \propto \lambda^{-2/3}$ . В результате общая длина электронно-оптической системы увеличивается, а высота подъёма  $h$  электронных траекторий в пушке снижается по закону  $h \propto \lambda^{2/3}$ . Последний фактор приводит к резкому возрастанию влияния шероховатости эмиттера на распределение скоростей электронов по сравнению с МИП гиротронов сантиметрового диапазона длин волн или длинноволновой части миллиметрового диапазона [21, 22]. Согласно работе [23] вызванный этим фактором разброс скорости электронов можно оценить как  $\delta v_{\perp} \approx (r_0/h)^{1/2} \approx r_0^{1/2} \lambda^{-1/3}$ , где  $r_0$  — размер шероховатости эмиттера. Легко

Таблица 1. Основные параметры криомагнита

Максимальное магнитное поле	10 Тл
Диаметр «тёплого» отверстия	100 мм
Высота корпуса соленоида	475 мм
Длина участка, на котором магнитное поле изменяется на 0,2 %	18 мм
Длина участка, на котором магнитное поле изменяется на 0,5 %	28 мм

пучка и магнитного поля соленоидов зависят только от двух координат, оказывается недостаточной для оптимизации и поиска приемлемых режимов работы МИП. Кроме того, следует учитывать, что для МИП характерна пробочная конфигурация магнитного поля, что приводит к отражению части электронного пучка от магнитного зеркала при попытке превысить некоторое пороговое значение среднего питч-фактора пучка  $g_{\max}$ . Элементарные оценки показывают, что  $g_{\max} \approx (\delta v_{\perp})^{-1/2}$ . Из двух предыдущих формул следует зависимость  $g_{\max} \propto \lambda^{1/6}$ , из которой видно, что максимально допустимое значение питч-фактора плавно падает по мере уменьшения длины волны, что также многократно подтверждено экспериментальными данными. Приведённая оценка величины  $g_{\max}$  получена из условия, что электроны с максимальной осцилляторной скоростью находятся на грани отражения, т. е. имеют близкую к нулю продольную скорость в рабочем пространстве. На самом деле значение  $g_{\max}$  несколько выше указанной величины и определяется максимально допустимой величиной коэффициента отражения  $K_{\text{ref}}$  от магнитного зеркала. Согласно имеющимся теоретическим данным [24, 27], если коэффициент отражения от магнитного зеркала превышает 2÷3 %, в пучке развиваются ярко выраженные колебания пространственного заряда и процессы бомбардировки и разогрева катода отражёнными частицами. Поэтому для обеспечения устойчивости пучка желательно иметь такие питч-фактор и ширину функции распределения, чтобы величина  $K_{\text{ref}}$  оставалась, по крайней мере, меньше 1 %.

Таким образом, для корректного определения как итоговой величины разброса, так и оценки устойчивости пучка на базе расчёта коэффициента отражения электронов от магнитного зеркала (подробнее см. в работе [28]) типовая методика расчёта МИП [25, 26] должна быть дополнена учётом тепловых скоростей электронов и влияния шероховатости эмиттирующей поверхности. Все указанные особенности анализа, оптимизации и требований к численной модели МИП гиротронов субтерагерцового диапазона были учтены ниже при теоретическом расчёте электронно-оптической системы.

Электронно-оптическая система должна обеспечить следующие параметры пучка в резонаторе: рабочее магнитное поле  $B_0 = 9,5788$  Тл, ускоряющее напряжение  $U_0 = 15$  кВ, ток пучка  $I_b = 0,2$  А, радиус ведущего центра  $R_0 = 0,9643$  мм, питч-фактор  $g = 1,3$ .

Первоначальные оценки параметров МИП были рассчитаны по формулам адиабатической теории [20, 21] с учётом изложенных выше ограничений и приведены в табл. 2. Для снижения влияния поля пространственного заряда на параметры винтового электронного пучка (ВЭП) угол наклона эмиттера к оси был выбран равным  $\psi = 27^\circ$ . При этом МИП формирует квазиаминарный пучок [25].

Далее в рамках модели с нулевыми начальными скоростями электронов варьировалась форма катода и первого анода МИП с целью получения малой величины позиционного разброса скоростей, обеспечения электропрочности (напряжённость электрического поля в любой точке ЭОС не

оценить, что при переходе от сантиметрового к миллиметровому диапазону длин волн вклад шероховатостей в разброс скоростей увеличивается в 2÷3 раза и становится основным фактором, определяющим итоговую величину этого разброса при умеренных токах пучка. Указанная тенденция подтверждается многочисленными экспериментальными данными и теоретическим анализом [23, 24]. Поэтому обычно применяемая методика численного анализа [25, 26], в которой считается, что распределения электрического поля электродов, собственного кулоновского поля

Таблица 2. Основные параметры магнетронно-инжекторной пушки

Компрессия магнитного поля	26,6
Расстояние от центра эмиттера до центра магнитной системы	354 мм
Анодное напряжение	15 кВ
Напряжённость электрического поля на катоде	4 кВ/мм
Радиус катода	5 мм
Зазор между анодом и катодом	5 мм
Ширина эмиттера	0,8 мм
Плотность тока	0,8 А/см <sup>2</sup>

Таблица 3. Расчётные значения параметров пучка

$I_b, A$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20
$g_0$	1,366	1,358	1,350	1,341	1,339
$\delta v_{\perp 0}$	0,025	0,026	0,027	0,027	0,028
$g$	1,372	1,372	1,361	1,350	1,339
$\delta v_{\perp}$	0,177	0,174	0,178	0,181	0,184
$k_{ref}$	0,0023	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027

должна превышать 6 кВ/мм) и заданной величины пичч-фактора. Соответствующая методика более подробно описана в работах [23, 26]. В табл. 3 приведены расчётные значения параметров пучка в номинальном режиме  $U_a = U_0 = 15$  кВ, где  $U_a$  — анодное напряжение, вычисленные в модели с нулевыми начальными скоростями (пичч-фактор  $g_0$  и разброс скоростей  $\delta v_{\perp 0}$ ) и в модели, учитывающей совместное влияние тепловых скоростей и шероховатостей эмиттера (пичч-фактор  $g$  и разброс скоростей  $\delta v_{\perp}$ ). Согласно расчётным данным (см. табл. 3) разброс скоростей в оптимизированном варианте (рис. 1) остаётся малым (около 2,5÷2,8 %) и практически не зависит от тока при его изменении от 0 до 0,2 А.

Как уже указывалось выше, при переходе в субтерагерцовый диапазон частот влияние шероховатостей эмиттера становится определяющим фактором при оценке качества ВЭП. Поэтому завершающий этап численных расчётов МИП включал вычисление функции распределения электронов по осцилляторным скоростям с учётом совместного влияния шероховатостей эмиттера и начальных скоростей электронов и определение на этой основе коэффициента отражения электронов от магнитного зеркала для оценки степени устойчивости ВЭП. Указанные расчёты проводились в программе ЭПОС в модификации, подробно описанной в работах [23, 28]. Типичная функция распределения электронов  $f(v_{\perp})$  по осцилляторным скоростям показана на врезке на рис. 1. Функция  $f(v_{\perp})$  остаётся близкой к гауссовой во всём допустимом диапазоне токов, а коэффициент отражения не превышает 0,27 % и, таким образом, оказывается примерно на порядок меньше порогового значения, при котором наблюдается развитие неустойчивостей в ВЭП. Это позволяет рассчитывать на формирование в рабочих режимах гиротрона устойчивого ВЭП.

Последующее исследование МИП на критичность к сдвигу в магнитном поле и смещением вследствие тепловой деформации от расчётного положения катода и анода на  $\pm(0,5\div 1,0)$  мм показало, что разброс скоростей практически не зависит от указанных смещений, а пичч-фактор меняется не более чем на  $\pm 0,1$  от расчётного значения. Расчёты также показывают, что оптимизированная магнетронно-инжекторная пушка позволяет эффективно управлять мощностью и рабочей частотой гиротрона и сохранять параметры ВЭП в приемлемом диапазоне и при переходе в триодный режим при разнице потенциалов первого и второго анодов до нескольких киловольт или, при работе в диодном режиме, при отстройке полного ускоряющего напряжения

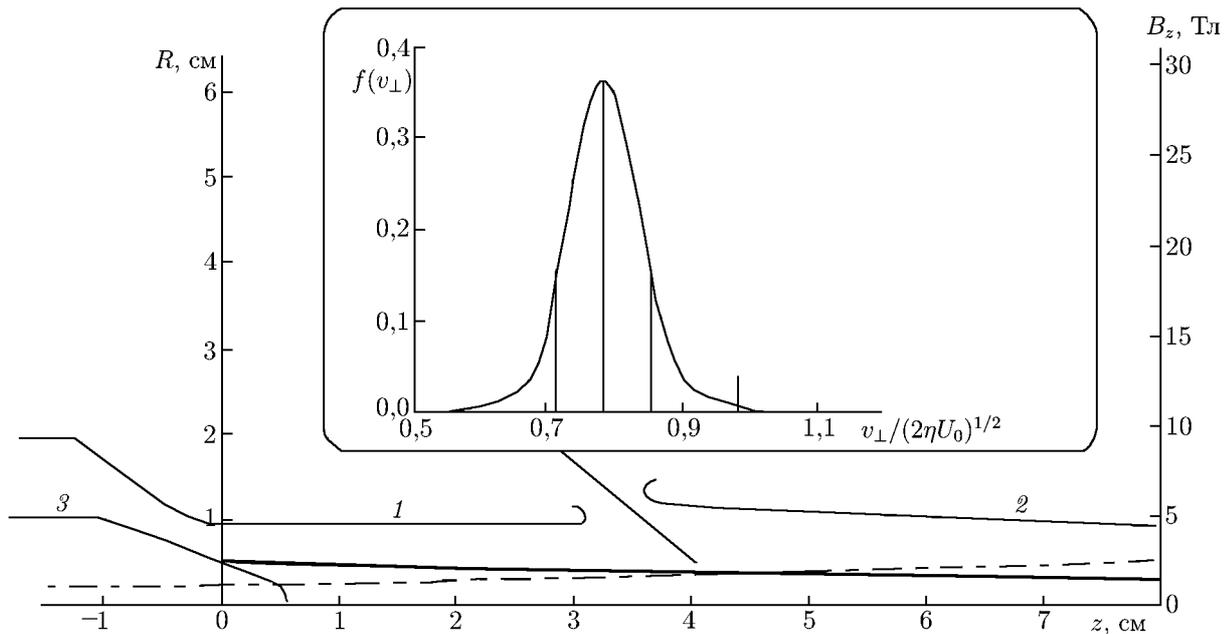


Рис. 1. Форма электродов (1 — первый анод, 2 — второй анод, 3 — катод) оптимизированной триодной магнетронно-инжекторной пушки, а также функция распределения электронов по осцилляторным скоростям для тока 0,2 А. Здесь  $B_z$  — продольная компонента магнитного поля,  $z$  — продольная координата,  $R$  — радиус,  $\eta$  — отношение заряда электрона к его массе. Сплошными тонкими линиями показан профиль электродов, толстой линией — электронный пучок, штрихпунктирной — продольное распределение величины  $B_z$

от номинального значения на  $\pm 2$  кВ.

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАТОРА

На выбор рабочей моды в гиротроне, работающем в условиях основного циклотронного резонанса, не налагаются такие серьёзные ограничения, как при использовании высших циклотронных гармоник. Тем не менее, с одной стороны, радиус пучка должен быть достаточно большим для того, чтобы его можно было сформировать в МИП, сохранив приемлемые значения выходных параметров. С другой стороны, диаметр «тёплого» отверстия криомагнита и применение мало-мощных источников питания не позволяют использовать моды с высокой сверхразмерностью, которые наиболее привлекательны из-за меньшей доли омических потерь в резонаторе.

В проведённых ранее экспериментах с гиротроном, генерировавшим на частоте 0,258 ТГц, излучение на выходе из окна имело структуру стоячей волны  $TE_{2,3}$  с четырьмя вариациями в азимутальном направлении [15]. Одна из возможных причин возникновения такого эффекта — отличия сечения резонатора и волноводного перехода от идеально круглой формы. Как известно, критичность к данному эффекту убывает с ростом азимутального индекса рабочей моды, т. к. для его значимости необходима большая амплитуда гармоники, соответствующей данному индексу, в разложении поперечного профиля резонатора в ряд Фурье [29].

С учётом вышеизложенных соображений и данных по оптимизации электронной пушки, в качестве рабочей была выбрана мода  $TE_{5,3}$  при радиусе пучка 0,93 мм. Спектр собственных мод резонатора в окрестности рабочей моды приведён на рис. 2. Высота линий на этом спектре пропорциональна структурному фактору, характеризующему связь моды  $TE_{mp}$  и электронного

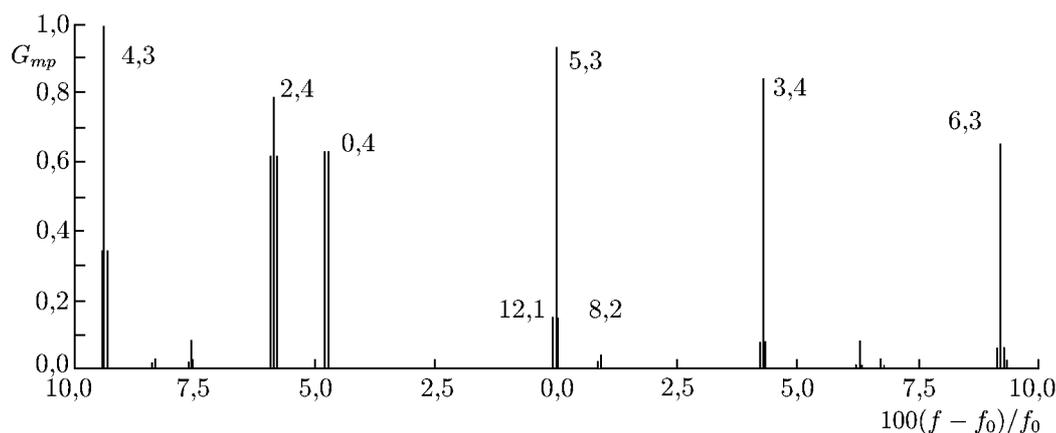


Рис. 2. Спектр собственных мод резонатора около рабочей моды. Здесь  $f$  — текущая частота,  $f_0$  — частота рабочей моды, числа у вершин линий — индексы мод

пучка. Указанный фактор определяется следующим выражением:

$$G_{mp} = \frac{J_{m-n}^2(\nu_{mp}R_0/R_r)}{J_m^2(\nu_{mp})(\nu_{mp}^2 - m^2)},$$

где  $J_m(x)$  — функция Бесселя первого рода,  $\nu_{mp}$  —  $p$ -й корень уравнения  $dJ_m(x)/dx = 0$ ,  $R_0$  — радиальная координата центров электронных орбит,  $R_r$  — радиус цилиндрической части резонатора,  $n$  — номер гармоники.

Расчёты выходных параметров гиротрона были проведены на основе самосогласованной системы уравнений электронно-волнового взаимодействия для модели с нефиксированной структурой высокочастотного поля [30, 31]. При расчётах также учитывались омические потери в резонаторе и разброс начальных скоростей электронов.

Омическая добротность  $Q_{ohm}$  в гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, как правило, в  $1,5 \div 2$  раза меньше добротности резонатора с идеально гладкими медными стенками главным образом вследствие их шероховатости. Поэтому значение  $Q_{ohm}$  вычислялось с учётом эмпирического множителя 0,5 по следующей приближённой формуле, которая получается из хорошо известного выражения для добротности резонатора [32]:

$$Q_{ohm} = 680\nu_{mp}(1 - m^2/\nu_{mp}^2) \sqrt{\lambda[\text{мм}]}.$$

Результаты оптимизации коэффициента полезного действия (КПД) гиротрона при изменении длины резонатора  $L_r$  для ускоряющего напряжения 15 кВ, тока пучка 0,1 А и пич-фактора 1,3 приведены на рис. 3. Как видно, при указанных параметрах пучка КПД достигает 20%, что соответствует генерируемой на выходе из резонатора мощности 300 Вт. При проектировании аналогичного прибора с повышенным уровнем мощности, рассчитанного на более высокие уровни токов, КПД можно существенно повысить, уменьшив длину резонатора. Например, при токе около 0,7 А волновой КПД достигает 35%, (соответствующие результаты расчётов приведены на рис. 3а). В этом случае в оптимальном режиме электронный КПД остаётся прежним (рис. 3б), но снижаются отношение дифракционной добротности к омической и, следовательно, величина потерь в стенках резонатора. Следует отметить, что, поскольку данный гиротрон планируется использовать в широком диапазоне выходных параметров, длина резонатора была выбрана несколько больше оптимальной для обоих рассмотренных выше проектных

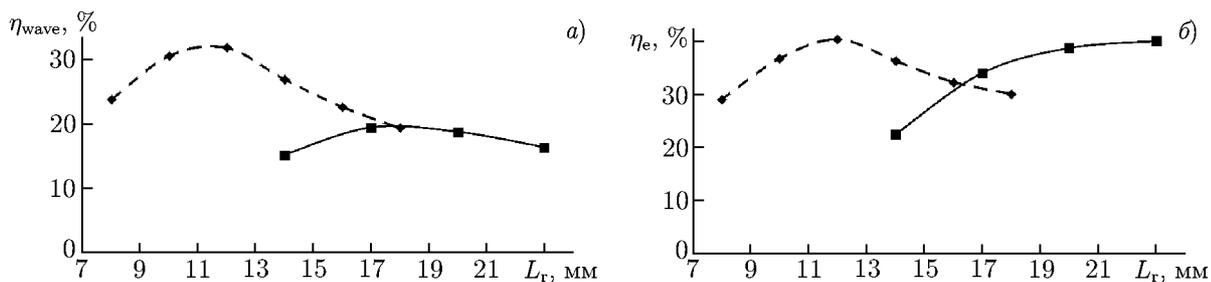


Рис. 3. Зависимость волнового  $\eta_{wave}$  (а) и электронного  $\eta_e$  (б) КПД гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц на моде  $TE_{5,3}$  от длины цилиндрической части резонатора при ускоряющем напряжении 15 кВ и питч-факторе  $g = 1,3$  для тока пучка 0,1 А (сплошная линия) и 0,7 А (пунктирная линия)

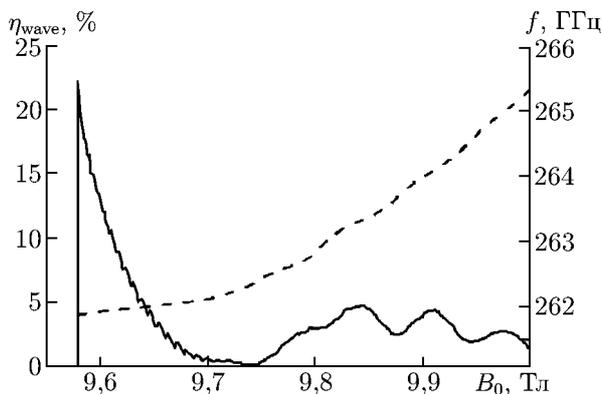


Рис. 4. Зависимость выходного КПД и частоты генерации гиротрона от величины рабочего магнитного поля для моды  $TE_{5,3}$ , ускоряющего напряжения 15 кВ, тока пучка 0,4 А, питч-фактора 1,3 и разброса скоростей  $\delta v_{\perp} = 0,3$

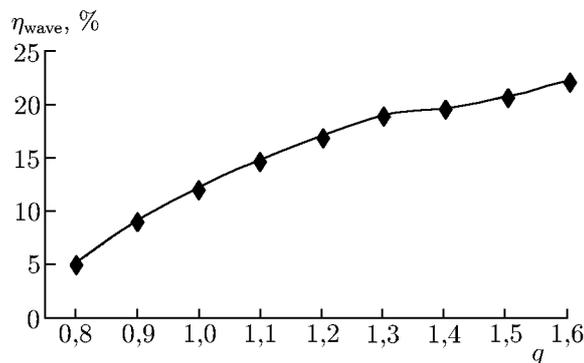


Рис. 5. Зависимость КПД гиротрона от питч-фактора при рабочей частоте 263 ГГц, ускоряющем напряжении 15 кВ, токе пучка 0,1 А и длине цилиндрической части резонатора 20 мм для моды  $TE_{5,3}$

режимов, чтобы обеспечить эффективное возбуждение рабочей моды в том числе и при сравнительно низком токе (порядка 10 мА). Это в перспективе позволит использовать маломощные источники питания для тех приложений, где необходимый уровень мощности выходного излучения составляет несколько десятков ватт.

Зависимости КПД и частоты генерации гиротрона от величины магнитного поля в рабочем пространстве для ускоряющего напряжения 15 кВ и тока 0,4 А приведены на рис. 4.

На рис. 5 показаны результаты расчёта КПД в зависимости от питч-фактора электронного пучка при длине цилиндрической части резонатора 20 мм и сохранении остальных параметров. Как видно из рисунка, гиротрон может эффективно работать в широком диапазоне значений питч-фактора.

При выбранных значениях параметров резонатора гиротрона (длина 20 мм и угол раскрытия порядка  $1^\circ$ ) омические потери в резонаторе составляют около 35%. Стабильность частоты  $10^{-5}$  достигается при относительных флуктуациях не более 0,5% по напряжению, 0,5% по току электронного пучка и 0,02% по величине магнитного поля криомагнита. Выбранная система охлаждения резонатора должна обеспечивать постоянство температуры его стенок с погрешностью не более  $0,5^\circ\text{C}$ .

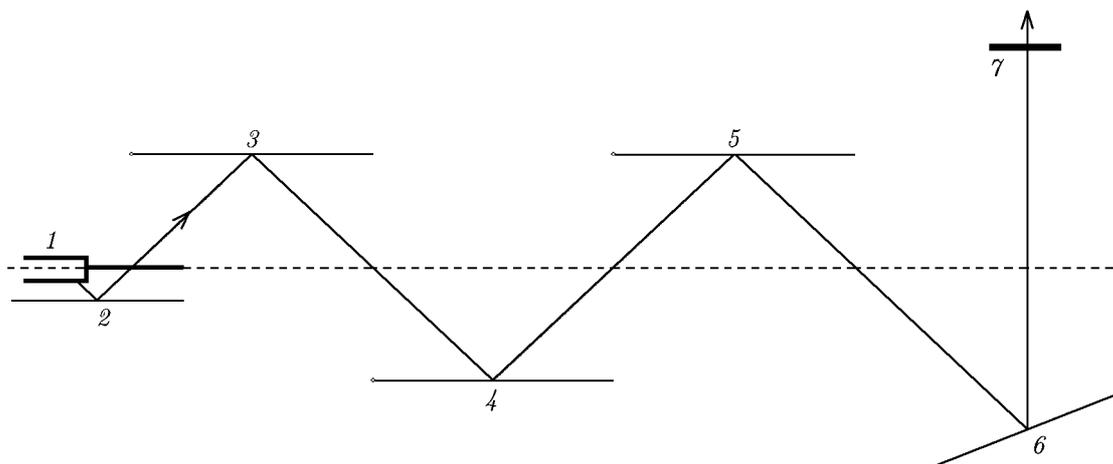


Рис. 6. Схема квазиоптического преобразователя  $TE_{5,3}$ - $TEM_{0,0}$ : 1 — синтезированный волноводный излучатель, 2 — квазипараболическое зеркало, 3–6 — система синтезированных зеркал, 7 — окно вывода излучения

### 3. ВНУТРЕННИЙ КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

В разработанном ранее гиротронном комплексе [15] вследствие малости проходного отверстия криомагнита использовался внешний квазиоптический преобразователь, который был весьма громоздок и усложнял работу с системой. Криомагнит для нового гиротронного комплекса имеет значительно большее проходное отверстие, и это даёт возможность использовать более удобный вариант гиротрона со встроенным (внутренним) квазиоптическим преобразователем. Основной функцией этого преобразователя является конверсия рабочей моды гиротрона  $TE_{5,3}$  в параксиальный волновой пучок, который должен проходить через вакуумное выходное окно с диаметром 32,6 мм. Обычно квазиоптический преобразователь гиротрона состоит из так называемого козырькового излучателя, квазипараболического зеркала [33, 34], а также поворотного зеркала [35, 36], обеспечивающего перпендикулярный оси гиротрона вывод волнового пучка.

В данной работе из-за большой высоты криомагнита (см. табл. 1) для вывода излучения из гиротрона была использована более сложная, чем обычно, система, состоящая из четырёх зеркал. Общая схема квазиоптического преобразователя для данного гиротрона представлена на рис. 6. На основе итерационной процедуры, предложенной в работах [37, 38], были синтезированы профили волноводного излучателя и системы зеркал, обеспечивающие трансформацию рабочей волны в гауссов пучок с эффективностью порядка 95% (см. рис. 7). На рис. 7 в оттенках серого цвета представлены профиль волновода и распределение модуля продольной компоненты магнитного поля  $|H_{z'}(\varphi, z')|$  вдоль стенки волновода, где  $z'$  — продольная координата, отсчитываемая от начала профилированного участка,  $\varphi$  — азимутальный угол в поперечной плоскости. Средний радиус волновода равен 3,586 мм, длина профилированного участка 40 мм, максимальная деформация профиля  $\pm 0,096$  мм.

### 4. КОЛЛЕКТОРНАЯ СИСТЕМА ГИРОТРОНА

Электронно-оптическая система, кроме формирования и транспортировки винтового электронного пучка, также должна обеспечивать рассеяние его остаточной энергии по поверхности коллектора с приемлемой плотностью мощности. Была выбрана простейшая цилиндрическая

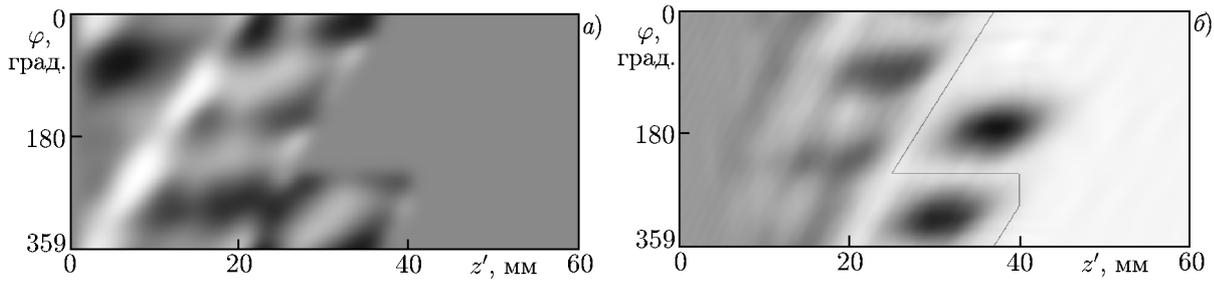


Рис. 7. Развёртка внутренней поверхности (радиус) синтезированного излучателя (а) и распределение  $|H_z(\varphi, z)|$  вдоль стенки волновода (б) в квазиоптическом преобразователе  $TE_{5,3}-TEM_{0,0}$ . Белый цвет соответствует минимальному радиусу волновода и нулевой напряжённости магнитного поля

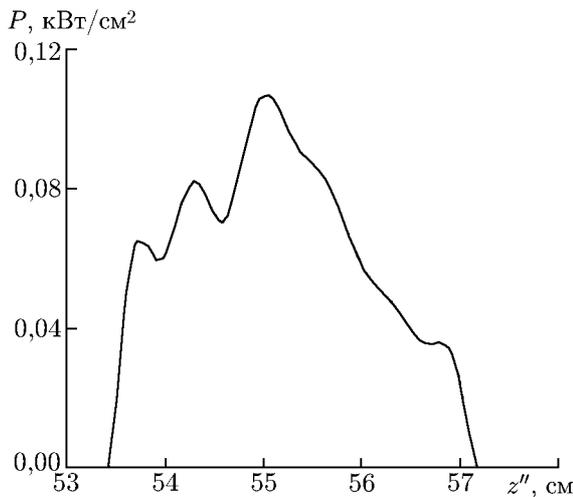


Рис. 8. Распределение по длине коллектора плотности мощности  $P$  не взаимодействующего с высокочастотным полем электронного пучка

ности составляет  $0,11 \text{ кВт/см}^2$  (рис. 8), что вполне приемлемо. Оценки ухода следа из-за теплового расширения ножки катода показывают, что след может сдвигаться на  $\pm 50 \text{ мм}$  от расчётного положения, поэтому зона охлаждения коллектора была спроектирована с соответствующим запасом.

форма коллектора с диаметром 20 мм со статическим магнитным полем. Отличительной особенностью данной ЭОС являются малые расстояния от пучка до оси системы по сравнению с характерными радиальными размерами сверхпроводящего магнита. Вследствие этого обстоятельства ведущие силовые линии подходят к поверхности коллектора под очень малым углом (всего  $1,5^\circ$ ), что может вызвать повышенную критичность коллектора к небольшим тепловым деформациям катода и несоосности магнитной системы. Траекторный анализ коллекторной области для случая отсутствия генерации (наиболее критичный случай с точки зрения тепловой нагрузки коллектора) показал, что для тока пучка  $0,1 \text{ А}$  (мощность пучка  $1,5 \text{ кВт}$ ) начало и конец зоны посадки пучка находятся соответственно в сечениях  $z'' = 534$  и  $571 \text{ мм}$  ( $z'' = 0$  соответствует центру криомагнита), а пиковая плотность мощ-

### 5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИРОТРОНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Одной из важных составляющих создаваемого комплекса стала разработанная специально для него автоматизированная система управления (АСУ). Её необходимость и актуальность во многом была обусловлена тем фактом, что такие гиротронные комплексы зачастую эксплуатируются широким кругом исследователей, не обязательно имеющих специальную подготовку и навыки (например химиками или биологами). Автоматизированная система управления не только непосредственно обеспечивает безопасность работы комплекса, но и содержит систему сбора, регистрации, отображения и протоколирования информации, и дистанционного управления различными узлами комплекса, что позволяет оператору не находиться в непосредственной близости от него. В состав АСУ входит как специализированные программные средства, обеспечивающие

интерактивное взаимодействие оператора с системами гиротрона, так и необходимое компьютерное оборудование.

Подсистема управления блокировками и связями, которая и обеспечивает безопасную работу комплекса, базируется на автономном контроллере ADAM-5510E. Он был запрограммирован в соответствии с логикой функционирования комплекса, т. е. с последовательностью включения узлов и связей между ними. Все модули комплекса имеют выходы сигналов («штатное состояние» или «внештатное состояние»), информация с которых передаётся в систему управления, а также входы сигналов блокировки «разрешение работы» или «запрет работы». Автономный контроллер непрерывно считывает сигналы состояния устройств, подключённых к его входным модулям, и управляет выходными контактами модулей в соответствии с программой, хранящейся в его памяти. Каждый выходной канал контроллера приходит в состояние «разрешение работы» только в том случае, если все входные каналы, находящиеся в логической связи с данным выходным каналом, находятся в состоянии «штатная работа». Если какой-либо из входных каналов находится во внештатном состоянии, все выходные каналы, логически связанные с данным входным каналом, находятся в состоянии «запрет работы».

Подсистема сбора данных и управления обеспечивает дистанционное управление мощностью выходного излучения с помощью изменения рабочих параметров гиротрона: напряжений между катодом и коллектором, между катодом и резонатором, тока накала катода, тока основного соленоида и тока катодной катушки. Во время работы комплекса сигнал с калориметрической нагрузки обрабатывается программным обеспечением автоматизированной системы управления, и на дисплее станции оператора отображается фактическая мощность излучения. Наряду с измерением фактической мощности излучения, подсистема сбора данных и управления осуществляет сбор информации о текущих параметрах, характеризующих работу элементов комплекса, включая основные параметры гиротрона. Для взаимодействия данной подсистемы сбора данных и управления с элементами гиротронного комплекса используются как цифровые интерфейсы, так и обмен аналоговыми и дискретными сигналами.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены результаты разработки узлов нового гиротронного комплекса с рабочей частотой 0,263 ТГц на основе криомагнита с максимальным магнитным полем 10 Тл. В результате оптимизации электронно-оптической системы показана возможность получения винтового электронного пучка с уровнем тока несколько сот миллиампер и приемлемыми значениями параметров (питч-фактором и разбросом скоростей). Расчёты электронно-волнового взаимодействия позволяют надеяться на получение уровня мощности выходного излучения до 1 кВт при токе пучка 0,4 А и ускоряющем напряжении 15 кВ. При этом, с одной стороны, в данном гиротроне будет возможно реализовать режимы с предельно низкими уровнями тока пучка порядка десяти миллиампер, а с другой — при модернизации электронно-оптической и охлаждающей систем можно будет реализовать режимы с более высокими токами пучков и, соответственно, мощностью в несколько киловатт, что может быть использовано для ряда технологических приложений. Разработанный для данного гиротрона внутренний квазиоптический преобразователь обеспечивает трансформацию рабочей волны в гауссов пучок с эффективностью, близкой к 95 %. В статье также описана разработанная специально для данного комплекса система управления. Комплекс планируется применять для широкого спектра научных и технологических приложений, в том числе в области биохимии и медицины. Результаты экспериментальных исследований представлены в отдельной статье в настоящем выпуске журнала.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-29-00192).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. V. 1, No. 1. P. 54.
2. Sidorov A. V., Bratman V. L., Glyavin M. Yu., et al. // Abstr. 40th IEEE Int. Conf. Plasma Sci. (ICOPS 2013). San-Francisco, 16–21 Jun. 2013. DOI:10.1109/PLASMA.2013.6635224.
3. Idehara T., Sabchevski S. P. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2012. V. 33. No. 7. P. 667.
4. Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В. К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1414.
5. Flyagin V. A., Gaponov A. V., Petelin M. I., Yulpatov V. K. // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1977. V. 25, No. 6. P. 514.
6. Torrezan A. C., Han S.-T., Mastovsky I., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, No. 6. P. 1150.
7. Jawla S., Nanni E., Shapiro M., et al. // 36th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves (IRMMW-THz). Houston, 2–7 Oct. 2011. doi:10.1109/IRMMW-THz.2011.6105096.
8. Blank M., Borchard P., Cauffman S., et al. // Vacuum Electron. Conf., IEEE Int. 22–24 April 2014, Monterey, CA, USA. P. 7.
9. <http://www.bruker-biospin.com/dnp-dir.html>
10. Idehara T., Saito T., Ogawa I. // Thin Solid Films. 2008. V. 517, No. 4. P. 1503.
11. Alberti S., Ansermet J.-Ph., Avramides K. A., et al. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19, No. 12. P. 123102.
12. Зайцев Н. И., Панкратова Т. Б., Петелин М. И., Флягин В. А. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 5. С. 1056.
13. Глявин М. Ю., Гуртовник А. А., Нусинович Г. С., Панкратова Т. Б. // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. С. 73.
14. Запевалов В. Е., Лыгин В. К., Малыгин О. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 6. С. 461.
15. Венедиктов Н. П., Дубров В. В., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
16. Denysenkov V., Prandolini M. J., Gafurov M., et al. // Phys. Chemistry Chemical Phys. 2010. V. 12. P. 5786.
17. Bratman V. L., Bogdashov A. A., Denisov G. G., et al. // Int. J. IRMM THz Waves. 2012. V. 33, No. 7. P. 715.
18. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 8. С. 745.
19. [http://www.jastec-inc.com/e\\_products\\_cryogen/index.html](http://www.jastec-inc.com/e_products_cryogen/index.html).
20. Цимринг Ш. Е. Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). Кн. 4. Саратов: СГУ, 1974. С. 3.
21. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
22. Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1972. Т. 15, № 8. С. 1247.
23. Lygin V. K. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1995. V. 16, No. 2. P. 363.
24. Kuftin A. N., Lygin V. K., Tsimring Sh. E., Zapevalov V. E. // Int. J. Electron. 1992. V. 72. P. 1145.
25. Лыгин В. К., Цимринг Ш. Е. // Журн. техн. физ. 1973. Т. 43, № 8. С. 1695.
26. Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 4. С. 491.

27. Мануилов В. Н., Полушкина С. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 795.
28. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2001. V. 22, No. 8. P. 1 119.
29. Нусинович Г. С. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 8. С. 1788.
30. Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., Zavolsky N. A. // Int. J. Electron. 1986. V. 61, No. 6. P. 881.
31. Moiseev M. A., Nemirovskaya L. L., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. V. 18, No. 11. P. 2 117.
32. Братман В. Л., Моисеев М. А., Петелин М. И., Эрм Р. Э. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 4. С. 622.
33. Власов С. Н., Орлова И. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. V. 17, № 1. С. 148.
34. Власов С. Н., Ликин К. М. // Гиротроны. Горький, 1980. С. 125.
35. А. с. 952033 СССР. Мазер на циклотронном резонансе / Глазман В. Н., Богданов С. Д., Власов С. Н. и др. Заявл. 16.01.81; Опубл. 20.11.99.
36. Myasnikov V. E., Sayer A. P., Bogdanov S. D., Kurbatov V. I. // Conf. Digest 16th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, Lousanne, 26–30 August 1991, SPIE. V. 1 576. P. 127.
37. Каценеленбаум Б. З., Семёнов В. В. // Радиотехника и электроника. 1967. № 2. С. 244.
38. Чирков А. В., Денисов Г. Г., Кулыгин М. Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 59, № 5. С. 381.

Поступила в редакцию 24 апреля 2015 г.; принята в печать 30 сентября 2015 г.

**PECULIARITIES OF OPTIMIZING THE SUBSYSTEMS  
OF A CONTINUOUS-WAVE GYROTRON WITH A GENERATION  
FREQUENCY OF 0.26 THz AT THE MAIN CYCLOTRON RESONANCE**

*M. Yu. Glyavin, G. G. Denisov, V. E. Zapevalov, A. N. Kuftin, V. N. Manuilov, E. A. Soluyanov,  
A. S. Sedov, V. V. Kholoptsev, and A. V. Chirkov*

We present the results of developing main units of a gyrotron operated in the continuous-wave regime with a generation frequency of 0.26 THz. To improve selection of the operating mode in the oversized electrodynamic system, the gyrotron works at the main cyclotron harmonic, which anticipates the use of a cryomagnet with a maximum magnetic field of 10 T, which does not require filling with liquid helium. The results of optimizing the electron-optical system, the cavity, and the quasi-optical converter of the output radiation are presented, and the control system, which is developed for the gyrotron complex, is described.