

УДК 621.385.69

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОЙ И ПЛАВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ГИРОТРОНАХ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ НА ПРИМЕРЕ ГЕНЕРАТОРА ДИАПАЗОНА 0,20÷0,27 ТГц

*Н. А. Завольский, В. Е. Запечалов, А. С. Зувев\*, О. П. Планкин, А. С. Седов, Е. С. Семёнов*  
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены основные особенности маломощного частотно-перестраиваемого гиротрона со сверхразмерным резонатором, предназначенного для использования в спектроскопии ядерного магнитного резонанса и других приложениях, с интервалом частот 0,20÷0,27 ТГц и мощностью выходного излучения 200 Вт. Исследованы возможности широкополосной перестройки частоты генерируемого излучения за счёт возбуждения последовательности мод с близкими каустиками посредством изменения магнитного поля и плавной перестройки за счёт возбуждения мод с большим числом продольных вариаций. С целью увеличения диапазона перестройки частоты также проанализирована возможность плавного изменения частоты за счёт контролируемой вариации температуры резонатора. Обсуждаются специфические черты электронно-оптической системы этого гиротрона и возможность повышения его эффективности при помощи одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронного пучка.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в связи с потребностями целого ряда приложений усилился интерес к разработке субтерагерцовых и терагерцовых источников непрерывного излучения с уровнем мощности 10÷1000 Вт [1, 2]. Для некоторых практических задач ключевым фактором является возможность контроля частоты излучения (перестройка и стабилизация) [3]. Частотно-перестраиваемые источники излучения активно используются, например, в спектроскопии ядерного магнитного резонанса: достаточно интенсивное микроволновое излучение позволяет значительно уменьшить время, необходимое для накопления информации [4, 5]. Кроме того, для многих спектроскопических приложений необходимы широкополосные источники для диагностики большого количества удалённых друг от друга спектральных линий. По совокупности параметров одним из перспективных или даже единственным типом источников с требуемыми характеристиками является гиротрон [6, 7].

Гиротрон работает на частоте, близкой к критической частоте одной из собственных мод резонатора. Необходимым условием генерации излучения в гиротроне является синхронизм между собственной частотой резонатора  $\omega$  и одной из гармоник циклотронной частоты:

$$\omega \approx n\omega_H, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

При этом релятивистская циклотронная частота электронов определяется равенством

$$\omega_H = \frac{eB}{\gamma m_0}, \quad (2)$$

где  $B$  — величина однородного продольного магнитного поля в пространстве взаимодействия,  $e$  — элементарный заряд,  $m_0$  — масса покоя электрона,  $\gamma = 1 + U$  [кВ]/511 — лоренц-фактор.

---

\* alan.zuev@yandex.ru

Изменение частоты выходного излучения можно осуществить за счёт изменения гирочастоты, т. е. за счёт либо изменения величины магнитного поля, либо ускоряющего напряжения  $U$ , при этом электродинамическая система должна обеспечивать выполнение условия (1).

Широкополосная перестройка частоты в гиротронах может быть реализована при помощи последовательного возбуждения мод с близкими каустиками за счёт изменения внешнего магнитного поля [8, 9]. До сих пор данный метод перестройки в основном использовался в гиротронах высокой мощности. Переход маломощного гиротрона от работы на низких модах с редким спектром к использованию пространственно-развитых мод делает возможным реализацию широкополосной перестройки частоты и в таких приборах. Отметим, что уровень мощности порядка 1 кВт для гиротронов является сравнительно низким, что определяет специфику оптимизации прибора. Такая мощность достигается в гиротронах при сравнительно малой мощности электронного потока, что приводит к необходимости оптимизации профиля резонатора и электронно-оптической системы. Кроме вышеупомянутого метода, в гиротронах доступны дополнительные возможности перестройки частоты за счёт возбуждения продольных мод и изменения температуры резонатора.

В качестве примера далее рассмотрен вариант частотно-перестраиваемого гиротрона с использованием резонатора с большой сверхразмерностью для работы в интервале частот  $0,20 \div 0,27$  ТГц с мощностью выходного излучения до 200 Вт в непрерывном режиме в условиях синхронизма с первой гармоникой гирочастоты. Указанный уровень мощности вполне достаточен для многих приложений. Гиротрон проектировался для работы в составе с криомагнитом JASTEC-10T100, имеющим индукцию магнитного поля до 10 Тл и проходное отверстие с диаметром 100 мм [10].

## 1. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГИРОТРОНА

В условиях работы на пространственно-развитых модах определяющим фактором при выборе поперечных размеров электродинамической системы (резонатора, преобразователя и системы вывода) и электронно-оптической системы являются размеры проходного отверстия криомагнита. Для указанного диапазона для реализации ступенчатой перестройки частоты выбраны следующие рабочие моды (в скобках указаны собственные частоты данных мод):  $TE_{16,6}$  (203,3 ГГц),  $TE_{17,6}$  (210,0 ГГц),  $TE_{17,7}$  (228,3 ГГц),  $TE_{18,7}$  (235,0 ГГц),  $TE_{18,8}$  (253,2 ГГц),  $TE_{19,8}$  (260,0 ГГц),  $TE_{20,8}$  (266,8 ГГц). Обычно предварительную оптимизацию многочастотного гиротрона проводят для одной из мод, принятой за основную. Как правило, в качестве основной выбирают одну из самых высокочастотных мод, т. к. для таких мод все проблемы проявляются наиболее заметно. В качестве основной выбрана мода  $TE_{19,8}$  с частотой 260 ГГц. На рис. 1 приведены оптимальные радиусы пучка  $R_0$  и частоты  $f = \omega/(2\pi)$  указанных рабочих мод для ступенчатой перестройки частоты. Оптимальные радиусы  $R_0$  электронного пучка в рабочем пространстве для каждой моды существенно отличаются, поэтому должна быть предусмотрена возможность изменения коэффициента перемангничивания  $\alpha$ , равного отношению рабочего магнитного поля к магнитному полю на катоде ( $\alpha = B_0/B_c$ ) и определяющего радиус  $R_0 = R_c/\sqrt{\alpha}$ , где  $R_c$  — радиус катода. Выбранный профиль резонатора, амплитуда и фаза поля на моде  $TE_{19,8}$  показаны на рис. 2. Коэффициент переизлучения в другие моды минимизировался в процессе оптимизации профиля резонатора и составил менее 0,1%. В табл. 1 приведены значения частот  $f$ , а также дифракционной ( $Q_d$ ) и омической ( $Q_{ohm}$ ) добротностей для выбранных мод.

Мощность выходного излучения и коэффициент полезного действия (КПД) гиротрона описываются выражениями

$$P = \eta_{out}IU, \quad \eta_{out} = t_{\perp}\eta_{\perp}\eta_c\eta_w Q_{ohm}/(Q_{ohm} + Q_d), \quad (3)$$

где  $I$  и  $U$  — ток пучка гиротрона и ускоряющее напряжение,  $\eta_{\perp}$  и  $\eta_c$  — поперечный КПД и коэф-

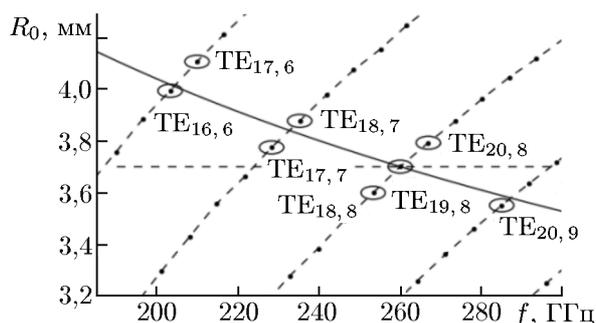


Рис. 1. Оптимальные радиусы и частоты рабочих мод при ступенчатой перестройке частоты. Штриховым кривым соответствуют разные радиальные индексы, каждой точке отвечает свой азимутальный индекс. Горизонтальная штриховая линия соответствует уровню  $R_0 = 3,7$  мм

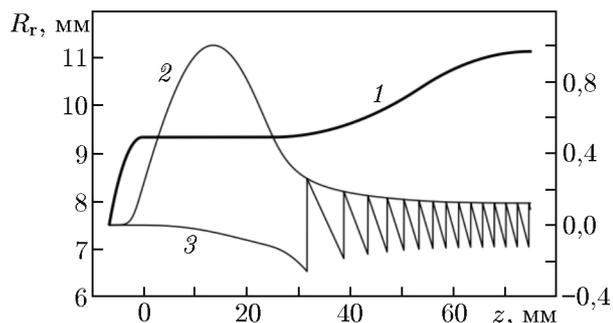


Рис. 2. Профиль резонатора  $R_r(z)$  (кривая 1) и продольные распределения амплитуды (2) и фазы (3), выраженных в относительных единицах (см. правую вертикальную ось), рабочих колебаний на моде  $TE_{19,8}$  в гиротроне

Таблица 1. Рабочие параметры выбранных мод

Мода	$f$ , ГГц	$Q_d$	$Q_{ohm}$	$Q_{ohm}/(Q_{ohm} + Q_d)$	$R_0$ , мм
$TE_{16,6}$	203,3	11 310	26 140	0,698	3,995
$TE_{17,6}$	210,0	12 160	26 240	0,683	4,106
$TE_{17,7}$	228,3	14 670	28 320	0,659	3,776
$TE_{18,7}$	235,0	15 660	28 430	0,645	3,879
$TE_{18,8}$	253,2	18 520	30 320	0,621	3,601
$TE_{19,8}$	260,0	19 650	30 430	0,608	3,700
$TE_{20,8}$	266,8	20 820	30 540	0,595	3,786
$TE_{20,9}$	285,0	24 160	32 290	0,572	3,549

коэффициент преобразования встроенного преобразователя,  $t_{\perp}$  — отношение энергии осцилляторного движения электронов к их полной энергии,  $\eta_w$  — коэффициент пропускания выходного окна соответственно. Фактор  $Q_{ohm}/(Q_{ohm} + Q_d)$ , определяющий снижение КПД вследствие омических потерь, и оптимальный радиус  $R_0$  для выбранных мод приведены в табл. 1. Для достижения высокого КПД в маломощном гиротроне требуется сравнительно протяжённая область взаимодействия, что соответствует относительно большой оптимальной длине резонатора, высокой дифракционной добротности и, соответственно, большой доле омических потерь (см. (3)).

Предварительная оптимизация электронно-волнового взаимодействия проведена в приближении фиксированной продольной структуры высокочастотного поля [11]. Для устойчивой работы гиротрона выбран питч-фактор  $g = 1,2$ . На рис. 3 приведены зависимости КПД, рабочего тока и оптимальной длины  $L$  резонатора гиротрона с указанной мощностью от ускоряющего напряжения при разных средних питч-факторах (питч-фактором называется отношение средней поперечной скорости к средней продольной скорости электронов). Оптимальным с точки зрения эффективности прибора является ускоряющее напряжение 5 кВ, но при этом существенно осложняется конструирование системы формирования винтового электронного пучка с нужным уровнем тока. Увеличение напряжения до 10 кВ (см. рис. 3, где звёздочкой показан выбранный режим) позволяет решить эту проблему, снижает критичность параметров пучка к тепловым деформациям электронной пушки и незначительно уменьшает КПД. Сравнительно низкое ускоряющее напряжение выбрано для достижения максимальной частоты генерации при условии ограниченной

величины магнитного поля (см. (1 и 2)) и, кроме этого, для упрощения и удешевления системы электропитания и защиты от рентгеновского излучения, что важно для обеспечения широкой области применения приборов. Для каждой выбранной моды в заданном режиме работы оптимальные длины резонаторов отличаются незначительно и находятся в диапазоне от 24 до 32 мм. С одной стороны, согласно расчётам, увеличение длины резонатора позволяет возбудить большее число продольных волн, что в итоге расширяет диапазон непрерывной перестройки частоты. С другой стороны, рост длины резонатора приводит к повышению доли омических потерь и падению КПД. Немаловажным фактором для выбора длины резонатора также является продольное распределение магнитного поля, однородный участок которого ограничивает длину резонатора.

Дальнейшая оптимизация параметров гиротрона, работающего на модах  $TE_{16,6}$ – $TE_{20,8}$ , проведена в рамках теории с самосогласованной продольной структурой высокочастотного поля [12]. В результате оптимизации полный КПД гиротрона при работе на указанных модах составил  $15,3 \div 18,2\%$  при электронном КПД  $27,7 \div 33,3\%$ . Основные параметры многочастотного гиротрона приведены в табл. 2. Расчёты проведены с учётом относительного разброса поперечных скоростей в электронном пучке, оценённого в  $30\%$  [13, 14]. Ширина полосы циклотронного резонанса  $\Delta\omega$  в гиротроне определяется временем пролёта  $T_{\text{pass}}$  электронов через резонатор:

$$\Delta\omega \approx 1/T_{\text{pass}} = v_{\parallel}/L, \quad (4)$$

где  $v_{\parallel}$  — продольная скорость электронов. Вследствие большой длины резонатора в полосу возбуждения попадает незначительное число мод, что практически снимает проблему их конкуренции в данном гиротроне.

Проведена оценка критичности системы к погрешностям в процессе изготовления. Допуск на

Таблица 2. Рабочие параметры гиротрона

Рабочие моды	$TE_{16,6}$ – $TE_{20,8}$
Частота генерации $f$ , ГГц	260
Мощность выходного излучения $P_{\text{out}}$ , Вт	более 200
Ускоряющее напряжение $U$ , кВ	10
Ток электронного пучка $I$ , А	0,13
Питч-фактор электронного пучка $g$	1,2
Радиус электронного пучка в рабочем пространстве $R_0$ , мм	$3,6 \div 4,1$
Радиус резонатора $R_r$ , мм	8,97
Длина резонатора $L$ , мм	30
Доля омических потерь в резонаторе	$30,2 \div 40,5\%$
Рабочее магнитное поле $B_0$ , Тл	$7,3 \div 10,0$

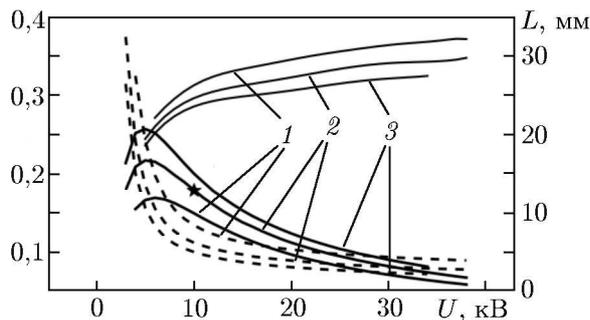


Рис. 3. Зависимости КПД  $\eta$  (толстые линии), рабочего тока  $I$  (штриховые линии) и оптимальной длины резонатора  $L$  (тонкие линии) от ускоряющего напряжения  $U$  при разных питч-факторах (значениям  $g = 1,0; 1,2$  и  $1,4$  соответствуют линии 1, 2 и 3) на моде  $TE_{19,8}$  для гиротрона с мощностью выходной излучения 200 Вт. Левая вертикальная ось соответствует безразмерным значениям  $\eta$  и силе тока  $I$ , выраженной в амперах

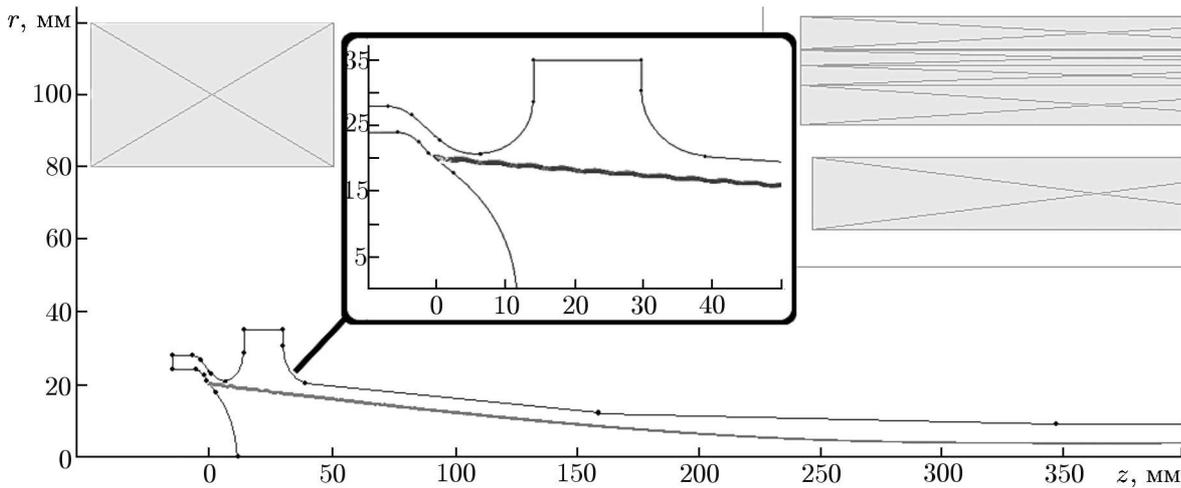


Рис. 4. Эскиз оптимизированной магнетронно-инжекторной пушки триодного типа

изменение радиуса регулярной части резонатора  $\Delta R_r$  определяется отклонением дифракционной добротности от проектного значения не более чем на 20 %, что отвечает условию [15]

$$\Delta R_r \leq 0,025 R_r \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2, \tag{5}$$

где  $\lambda$  — рабочая длина волны,  $R_r$  и  $L$  — радиус и длина регулярной части резонатора соответственно. Условие слабого изменения стартового тока [16] при изготовлении регулярной части резонатора имеет вид

$$\Delta R_r \leq \frac{2\pi}{16} 10^{-3} R_r \left( \frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\parallel 0}} \right)^3 \frac{L}{\lambda}, \tag{6}$$

где  $\beta_{\perp 0}$  и  $\beta_{\parallel 0}$  — начальные поперечные и продольные скорости электронов, нормированные на скорость света, соответственно. Обе оценки дают близкий результат: при изготовлении изменение радиуса регулярной части резонатора не должно превышать 0,3 мкм. Точность изготовления подобных резонаторов, доступная в настоящее время, составляет 2,5 мкм, при этом изменение радиуса регулярной части резонатора не превышает 0,2 мкм [17], что делает данное требование выполнимым.

## 2. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Одним из ключевых элементов разработки гиротронов является проектирование электронно-оптической системы, формирующей винтовой электронный пучок с заданными параметрами. Предварительные оценки последних проводились с помощью адиабатической теории [13], а уточняющий траекторный анализ — с помощью программы ANGEL-2DS [14]. В качестве электронно-оптической системы была выбрана магнетронно-инжекторная пушка триодного типа, позволяющая реализовать гибкое управление параметрами электронного пучка благодаря возможности подстройки напряжения между анодом и катодом. Дополнительные возможности даёт корректирующая катушка, находящаяся в области эмиттера, которая позволяет менять радиус электронного пучка в резонаторе. Для наших целей достаточно корректирующей катушки с максимальной индукцией магнитного поля 0,05 Тл в области катода. Эскиз триодной электронной пушки, включая форму электродов, магнитную систему и траектории электронов, представлен на рис. 4. По-

Таблица 3. Основные параметры электронной пушки

Радиус катода $R_c$ , мм	20
Расстояние от центра эмиттера до центра магнита, мм	364,8
Рабочее магнитное поле, Тл	$7,3 \div 10$
Магнитное поле на катоде, Тл	$0,242 \div 0,358$
Магнитное поле корректирующей катодной катушки, Тл	0,05
Ускоряющее напряжение $U$ , кВ	10
Анодное напряжение $U_a$ , кВ	$7,47 \div 9,40$
Электрическое поле на эмиттере, кВ/мм	$2,82 \div 3,56$
Ширина эмитирующего пояса, мм	1
Плотность тока на эмиттере $j$ , А/см <sup>2</sup>	0,1
Ток электронного пучка $I$ , А	0,13
Коэффициент перемагничивания $\alpha$	$22,56 \div 35,83$
Питч-фактор электронного пучка $g$	1,2
Позиционный разброс скоростей	менее 2%
Полный разброс скоростей	до 28%

сле предварительных оценок выбран катод с диаметром 40 мм. С уменьшением размеров катода растёт чувствительность пушки к тепловым смещениям катода и к точности изготовления, вместе с этим необходимо увеличивать электрическое поле на эмиттере, что повышает вероятность электрического пробоя. Выбран относительно узкий эмиттер, с шириной 1 мм, т. к. требуемый рабочий ток сравнительно мал. Поскольку плотность тока мала, разброс скоростей электронов обусловлен, главным образом, разбросом их начальных скоростей, который определяется свойствами эмиттера (шероховатостью поверхности и начальными тепловыми скоростями) и, исходя из реальных оценок указанных факторов, в расчёте полагался равным 25%; позиционный разброс скоростей составил менее 2%. Основные расчётные параметры электронно-оптической системы и формируемого электронного пучка приведены в табл. 3.

### 3. ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ

Последовательное возбуждение соседних мод в процессе ступенчатой перестройки частоты выходного сигнала осуществляется за счёт изменения внешнего магнитного поля. Подстройка питч-фактора электронного пучка может реализоваться корректировкой анодного напряжения. Выбранные моды (отмечены на рис. 1) являются ближайшими к кривой, которая получена в рамках адиабатической теории [13] и связывает радиус  $R_0$  и частоту при прочих фиксированных параметрах системы (сплошная линия на рис. 1). В табл. 4 указаны основные параметры этих мод. Кроме мод, рассмотренных выше, есть возможность возбуждения мод с противоположным направлением вращения поля относительно электронного пучка:  $TE_{-14,7}$ ,  $TE_{-15,7}$ ,  $TE_{-15,8}$ ,  $TE_{-16,8}$ ,  $TE_{-17,9}$ ,  $TE_{-18,9}$ , и мод, взаимодействующих с электронным пучком на втором максимуме структурного фактора:  $TE_{12,8}$ ,  $TE_{13,8}$ ,  $TE_{13,9}$ ,  $TE_{14,9}$ ,  $TE_{14,10}$ ,  $TE_{15,10}$ . Собственные частоты и оптимальные радиусы  $R_0$  электронного пучка данных мод указаны в табл. 5. Для работы с частотами свыше 270 ГГц требуется криомагнит с магнитной индукцией больше 10 Тл (см. табл. 4). Например, для оптимального режима работы гиротрона на моде  $TE_{20,9}$  необходимо поле около 10,3 Тл. Генерация данной моды может быть реализована добавлением обычной катушки, помещённой между криомагнитом и корпусом гиротрона. Замена криомагнита на его промышленно

Таблица 4. Параметры гиротрона со ступенчатой перестройкой частоты при токе пучка  $I = 0,13$  А и ускоряющем напряжении  $U = 10$  кВ

Мода	$f$ , ГГц	$P_{out}$ , Вт	$\eta_{out}$	$U_a$ , кВ	$B_0$ , Тл	$\delta f$ (по уровню 10 Вт), ГГц
TE <sub>16,6</sub>	203,3	237	18,2%	8,15	7,37	0,17
TE <sub>17,6</sub>	210,0	232	17,9%	9,20	7,61	0,16
TE <sub>17,7</sub>	228,3	229	17,6%	7,80	8,27	0,34
TE <sub>18,7</sub>	235,0	222	17,1%	8,80	8,52	0,33
TE <sub>18,8</sub>	253,2	211	16,2%	7,50	9,18	0,34
TE <sub>19,8</sub>	260,0	208	16,0%	8,40	9,42	0,33
TE <sub>20,8</sub>	266,8	199	15,3%	9,40	9,70	0,33
TE <sub>20,9</sub>	285,0	170	14,1%	8,20	10,30	0,47

Таблица 5. Параметры мод с противоположным направлением вращения поля относительно электронного пучка и мод, взаимодействующих с электронным пучком на втором максимуме структурного фактора, пригодных для широкополосной перестройки частоты.

Мода	$f$ , ГГц	$R_0$ , мм
TE <sub>-14,7</sub>	207,9	3,91
TE <sub>-15,7</sub>	214,7	4,01
TE <sub>-15,8</sub>	232,6	3,71
TE <sub>-16,8</sub>	239,5	3,81
TE <sub>-17,9</sub>	264,2	3,64
TE <sub>-18,9</sub>	271,1	3,73
TE <sub>12,8</sub>	211,7	3,97
TE <sub>13,8</sub>	218,7	4,10
TE <sub>13,9</sub>	236,2	3,79
TE <sub>14,9</sub>	243,3	3,90
TE <sub>14,10</sub>	260,8	3,64
TE <sub>15,10</sub>	267,9	3,74

выпускаемые аналоги с максимальными полями 12 и 13 Тл позволит пропорционально увеличить максимальную частоту генерации. Без изменений конструкции гиротрона для повышения рабочей частоты может быть использован криомагнит JASTEC-12T100, имеющий аналогичное продольное распределение магнитного поля.

В случае возбуждения мод с несколькими продольными вариациями высокочастотного поля отрицательное поглощение наблюдается в двух зонах углов пролётов электронов, соответствующих взаимодействию электронного пучка с попутной или встречной волной, частоты которых немного отличаются от критической частоты рабочей моды [18, 19]. Диапазон  $\delta\omega$  такой частотной перестройки можно оценить формулой:

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \approx \frac{1}{8} \left( \frac{\lambda}{L} \right)^2 (q^2 - 1), \quad (7)$$

где  $q$  — продольный индекс рабочей моды в резонаторе. Количество продольных мод, возбуждаемых

за счёт плавного изменения магнитного поля, главным образом зависит от рабочего тока и отношения  $\lambda/L$  длины волны рабочей моды к длине резонатора. Так, согласно расчётам по самосогласованной модели [12] в выбранном режиме работы гиротрона моды TE<sub>16,6</sub> и TE<sub>17,6</sub> могут возбудиться лишь с одной и двумя продольными вариациями. В случае работы на модах TE<sub>17,7</sub>, TE<sub>18,7</sub>, TE<sub>18,8</sub>, TE<sub>19,8</sub> и TE<sub>20,8</sub> возможна генерация мод с тремя продольными вариациями. Диапазон непрерывной перестройки  $\delta f = \delta\omega/(2\pi)$  для данных мод по уровню 10 Вт указан в табл. 4. Оценка частотной перестройки по формуле (7) слегка завышает результаты, полученные в рамках самосогласованной модели.

В гиротронах малой мощности также может быть реализована дополнительная подстройка частоты за счёт управления температурой резонатора (порядка 3÷4 МГц/°С). При изменении температуры охлаждающей жидкости на 25° можно осуществить частотную перестройку излучения до 0,1 ГГц. Данный способ частотной подстройки позволяет увеличить диапазон непрерывной перестройки до 0,27 ГГц для мод TE<sub>16,6</sub> и TE<sub>17,6</sub> и до 0,44 ГГц для мод TE<sub>17,7</sub>, TE<sub>18,7</sub>, TE<sub>18,8</sub>,

TE<sub>19,8</sub> и TE<sub>20,8</sub>. Такой метод уже успешно применялся ранее в маломощных гиротронах, разработанных для задач спектроскопии [19, 20]. Необходимым условием практической реализации указанного метода является наличие в конструкции гиротрона возможности свободного расширения резонатора и отдельного контура его охлаждения с возможностью контроля температуры подаваемой жидкости.

Реализация многомодовой непрерывной перестройки частоты в данном гиротроне невозможна из-за низкого рабочего тока, при котором затруднено возбуждение мод с несколькими продольными вариациями. Также широкополосная непрерывная перестройка осложняется большой длиной резонатора, которая лишь незначительно превосходит минимальную длину, при которой возможна генерация на всех выбранных модах.

#### 4. КОЛЛЕКТОР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Создание коллекторной системы электронного пучка на проектных уровнях мощности гиротрона не представляет серьёзных проблем. Для рассматриваемого гиротрона предложен цилиндрический коллектор с диаметром 70 мм, средняя тепловая нагрузка на который составляет 28 Вт/см<sup>2</sup> (пиковая нагрузка 57 Вт/см<sup>2</sup>), что позволяет обойтись без интенсивного водяного охлаждения.

Поскольку электроны при взаимодействии с высокочастотным полем в резонаторе отдают не больше определённой доли своей энергии, то за счёт отбора остаточной энергии отработанного электронного пучка после выхода из пространства взаимодействия (рекуперации) можно повысить эффективность гиротрона [21–23]. При одноступенчатой рекуперации электронного пучка итоговый КПД определяется известным выражением (см., например, [23]):

$$\eta = \frac{W}{W - W_{\min}} \eta_{\text{out}}, \quad (8)$$

где  $W$  — полная энергия электронов,  $W_{\min}$  — минимальная энергия частиц в отработанном пучке. В случае мод с одной продольной вариацией минимальная энергия отработанного электронного пучка составляет 32% начальной энергии электронов (см. рис. 5). За счёт разности потенциалов между коллектором и резонатором 3 кВ процесс одноступенчатой рекуперации электронного пучка поднимает полный КПД с 15,2÷18,2% до 21,7÷26,0% соответственно. В случае работы на модах с двумя продольными вариациями рекуперация энергии отработанного электронного пучка позволяет увеличить полный КПД от 2,2÷3,7% до 5,50÷9,35% для мод TE<sub>20,8</sub>—TE<sub>16,6</sub> соответственно. Кроме повышения КПД и возможности использовать источники питания меньшей мощности, в гиротроне с рекуперацией снижается потребление охлаждающей жидкости и уменьшается уровень рентгеновского излучения от коллектора.

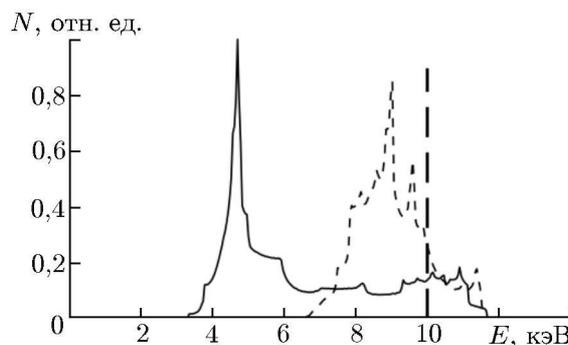


Рис. 5. Энергетический спектр  $N(E)$  отработанного электронного пучка для моды TE<sub>20,8</sub> с одной продольной вариацией (сплошная линия) и для моды с двумя продольными вариациями (штриховая линия). Начальная энергия электронного пучка соответствует  $E_0 = 10$  кэВ

## 5. СИСТЕМА ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

При проектировании гиротронов приходится решать задачу преобразования рабочей моды и вывода излучения. После взаимодействия с электронным пучком рабочая мода со сложной поперечной структурой при помощи системы из квазиоптических зеркал трансформируется в гауссов волновой пучок с выводом излучения через выходное окно. Существуют методы построения эффективных многомодовых преобразователей, дифракционные потери в которых составляют менее 5% от энергии излучения [24], включая вариант для мод с разными направлениями вращения [25].

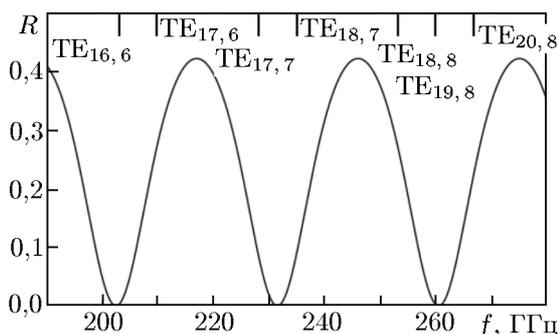


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты излучения для однодискового окна. Толщина выходного окна оптимизирована для семи мод

Для гиротронов малой и средней мощности в качестве материала для выходного окна часто используют нитрид бора, т. к. этот материал существенно дешевле, чем другие, и работа с ним хорошо освоена [26]. Требуемый уровень пропускания для некоторых частот доступен при использовании однодискового окна, но для полного перекрытия всего диапазона  $0,20 \div 0,27$  ТГц полос пропускания такого окна недостаточно. Оптимизированная для семи мод (см. табл. 4) толщина однодискового выходного окна при нормальном падении поперечной электрической волны составила 2,38 мм (см. рис. 6) с наибольшим коэффициентом отражения 27% для моды  $TE_{18,8}$ . Хотя меньшая толщина и приводит в некоторых случаях к уменьшению коэффициентов отражения для данных мод, она не может быть реализована из-за разности давлений на стенках окна. Существенно увеличить коэффициенты пропускания можно при использовании окон с большей толщиной, но подобные окна из нитрида бора не выпускаются в промышленности. Поэтому можно использовать окно из лейкосапфира с толщиной 7,71 мм, для которого наибольший коэффициент отражения среди семи выбранных мод составит 12,6%. Кроме этого, меньший коэффициент отражения можно получить путём добавления просветляющей пластинки. Низкая тепловая нагрузка на выходное окно даёт возможность в процессе его эксплуатации менять просветляющую пластинку при переходе на другую рабочую моду и, таким образом, значительно снизить коэффициент отражения для каждой моды. В случае падения поперечных магнитных волн наиболее перспективным является использование окна Брюстера. Дополнительные возможности по минимизации отражения предоставляет использование двухдискового окна или широкополосного профилированного окна [27].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирована возможность дискретной и плавной перестройки рабочей частоты многочастотного субтерагерцового гиротрона с мощностью выходного излучения около 200 Вт. Итоговый КПД для выбранных параметров пучка и электродинамической системы с учётом одноступенчатой рекуперации составляет  $21,7 \div 26,0$ % для мод  $TE_{20,8}$ — $TE_{16,6}$  соответственно. Ограничение эффективности в основном обусловлено высокими омическими потерями в резонаторе. В случае мод с двумя продольными вариациями рекуперация энергии отработанного электронного пучка позволяет повысить полный КПД более чем в два раза, до  $5,50 \div 9,35$ % в зависимости от рабочей моды. За счёт изменения внешнего магнитного поля (при необходимости с коррекцией

анодного напряжения) можно обеспечить селективное возбуждение различных мод и тем самым осуществить широкополосную дискретную перестройку частоты в диапазоне  $0,20 \div 0,27$  ТГц. Посредством возбуждения мод с несколькими продольными вариациями высокочастотного поля и при помощи дополнительной подстройки частоты за счёт управления температурой резонатора возможна непрерывная подстройка частоты от 0,27 до 0,44 ГГц в зависимости от рабочей моды.

Авторы признательны М. Ю. Глявину и В. Н. Мануилу за интерес к работе и конструктивную критику. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 15-42-02380 р\_поволжье\_а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // УФН. 2016. Т. 186, № 6. С. 667.
2. Kumar N., Singh U., Singh T. P., Sinha A. K. // J. Fusion Energy. 2011. V. 30, No. 4. P. 257.
3. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. V. 1, No. 1. P. 54.
4. Becerra L. R., Gerfen G. J., Temkin R. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71, No. 21. P. 3561.
5. Bajaj V. S., Farrar C. T., Hornstein M. K., et al. // J. Magnetic Res. 2003. V. 160. P. 85.
6. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2017. V. 35, No. 4. P. 325.
7. Idehara T., Sabchevski S. P. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2012. V. 33, No. 7. P. 667.
8. Thumm M., Arnold A., Borie E., et al. // Fusion Eng. and Design. 2001. V. 53. P. 407.
9. Запевалов В. Е., Богдашёв А. А., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5–6. С. 443.
10. Glyavin M. Yu., Chirkov A. V., Denisov G. G., et al. // Rev. Sci. Instr. 2015. V. 86, No. 5, Art. no. 054705.
11. Нусинович Г. С., Эрм Р. Э. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1972. № 8. С. 55.
12. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Моисеев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 4. С. 345.
13. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
14. Планкин О. П., Семёнов Е. С. // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2013. Т. 8, № 2. С. 44.
15. Запевалов В. Е., Малыгин О. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26, № 7. С. 903.
16. Nusinovich G. S., Pu R., Sinitsyn O. V., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, No. 6. P. 1200.
17. Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiri J. R., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. V. 58, No. 8. P. 2777.
18. Hornstein M. K., Bajaj V. S., Griffin R. G., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. V. 52, No. 5. P. 798.
19. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 720.
20. Венедиктов Н. П., Дубров В. В., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
21. Fix A. Sh., Flyagin V. A., Goldenbedg A. L., et al. // Int. J. Electron. 1984. V. 57, No. 6. P. 821.
22. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73, No. 26, P. 3532.
23. Glyavin M. Yu., Kuftin A. N., Venediktov N. P., Zapevalov V. E. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. V. 18, No. 11. P. 2129.

24. Чирков А. В., Денисов Г. Г., Куфтин А. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, № 8. С. 71.
25. Chirkov A. V., Denisov G. G., Kuftin A. N. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106, No. 26. Art. no. 263501.
26. Parshin V. V. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1994. V. 15, No. 2. P. 339.
27. Власов С. Н., Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 804.

Поступила в редакцию 20 ноября 2017 г.; принята в печать 25 июня 2018 г.

**ANALYSIS OF THE METHODS OF DISCRETE AND SMOOTH FREQUENCY  
TUNING IN GYROTRONS FOR SPECTROSCOPY, ON AN EXAMPLE  
OF A GENERATOR OPERATED IN THE 0.20–0.27 THz FREQUENCY RANGE**

*N. A. Zavolsky, V. E. Zapevalov, A. S. Zuev, O. P. Plankin, A. S. Sedov, and E. S. Semenov*

We consider main features of a low-power frequency-tunable gyrotron with an oversized cavity, which is designed for the purposes of nuclear magnetic resonance spectroscopy and other applications and operates in the 0.20–0.27 frequency range producing an output power of 200 W. The possibilities of wideband output frequency tuning by exciting a sequence of modes with similar caustics using magnetic-field variations and smooth tuning due to excitation of modes with a great number of longitudinal variations. Aiming at expanding the frequency tuning range, we analyzed also the possibility of smooth frequency tuning determined by controlled variations of the cavity temperature. Specific feature of the electron-optical system of such a gyrotron is discussed, along with the possibility of increasing its efficiency by means of single-stage recuperation of the residual energy of the electron beam.