

УДК 621.385.69

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ, НАЛАГАЕМЫХ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

*А. С. Зуев\*, В. Е. Запелалов, О. П. Планкин, Е. С. Семенов*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В статье предложен вариант частотно-перестраиваемого гиротрона для работы в широком интервале частот ( $0,1 \div 0,26$  ТГц) с мощностью выходного излучения до 260 кВт. Проведён комбинированный анализ и совместная оптимизация его электронно-оптической и электродинамической систем. Гиротрон спроектирован для работы с криомагнитом JASTEC-10T100 или его аналогами. Проведён анализ эффективности одноступенчатой рекуперации в такой системе. Предложена коллекторная система, способная эффективно осаждать электронные пучки при работе гиротрона во всём указанном диапазоне частот.

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении нескольких десятилетий прослеживается интерес к разработке субтерагерцовых и терагерцовых источников непрерывного излучения с высокой мощностью [1, 2]. Для многих приложений одним из важных требований является возможность изменения частоты в широком диапазоне. Это требуется, в частности, для задач диагностики плазмы [3], где широкополосная перестройка частоты излучения позволяет оперативно получить информацию о слоях плазмы с разной концентрацией. Перспективным источником в указанном частотном диапазоне является гиротрон [4, 5], в котором широкополосная перестройка частоты может быть реализована за счёт последовательного возбуждения нескольких собственных мод сверхразмерного резонатора путём изменения магнитного поля в широких пределах. Данный способ перестройки частоты известен достаточно давно, и в настоящее время опубликовано значительное число работ, посвящённых его реализации [6–12]. Так, в [9] рассмотрен гиротрон с мегаваттным уровнем мощности, работающий в частотном диапазоне  $100 \div 156$  ГГц. Подобные работы проведены в Технологическом институте Карлсруэ, Германия, где в коаксиальном гиротроне с мощностью более 1 МВт экспериментально реализована дискретная перестройка частоты в диапазоне  $134 \div 169,5$  ГГц [10]. В работах [9–11] использовались криомагниты с индукцией до 7 Тл. В настоящее время приобретают широкое распространение «сухие» (не требующие заливки криогенными жидкостями) сверхпроводящие магнитные системы. Такие системы, работающие в непрерывном режиме, создают магнитное поле до 16 Тл, однако сравнительно небольшое проходное отверстие затрудняет их использование в мощных гиротронах.

В данной статье рассматриваются возможности реализации частотно-перестраиваемого в широком частотном диапазоне субтерагерцового гиротрона с высокой мощностью выходного излучения. В качестве примера рассмотрен гиротрон, работающий на первой гармонике циклотронной частоты в интервале  $0,1 \div 0,26$  ТГц с мощностью выходного излучения до 260 кВт. Он проектировался для уже существующего в ИПФ РАН гиротронного комплекса на основе криомагнита JASTEC-10T100, имеющего максимальное магнитное поле 10 Тл и проходное отверстие с диаметром 100 мм [13]. Криомагниты с близкими характеристиками в настоящее время производятся многими фирмами в США, Японии и Великобритании, поэтому задача оптимизации

\* alan.zuev@yandex.ru

системы гиротрон—криомагнит имеет достаточно общий характер. Проведён совместный анализ электронно-оптической и электродинамической систем данного гиротрона

## 1. ГИРОТРОНЫ СО СТУПЕНЧАТОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Для эффективной реализации ступенчатой перестройки частоты в гиротронах требуется достаточно густой спектр собственных мод резонатора  $TE_{m,p}$ , что подразумевает работу на высших модах ( $m \gg 1, p \gg 1$ ). С ростом частоты генерации увеличивается доля омических потерь, что ведёт к возрастанию удельной тепловой нагрузки на стенки резонатора и является дополнительным фактором при выборе рабочей моды и режима работы гиротрона. Одним из основных способов уменьшения плотности тепловых нагрузок является увеличение поперечных размеров резонатора. Однако разместить гиротрон сравнительно высокой мощности, тем более многочастотный, в ограниченном пространстве криомагнита — достаточно сложная задача. Максимальная частота излучения в гиротроне существенно ограничена магнитным полем криомагнита  $B_0$  и ускоряющим напряжением:

$$f [\text{ГГц}] \approx 28(nB_0[\text{Тл}])/\gamma, \quad (1)$$

где  $n$  — номер гармоники и  $\gamma$  — лоренц-фактор.

Дополнительные пространственные ограничения налагаются на подсистемы формирования и транспортировки электронного пучка и вывода микроволнового излучения. Электронная пушка многочастотного гиротрона должна формировать электронные пучки с требуемыми параметрами в широком интервале магнитных полей. Для предварительного анализа перспективности использования магнетронно-инжекторных электронных пушек для частотно-перестраиваемых гиротронов целесообразно использование адиабатической теории [14]. В этом случае отношение  $t_{\perp}$  энергии осцилляторного движения электронов к их полной энергии в рабочем пространстве характеризуется зависимостью

$$t_{\perp} \sim \frac{R_c^6 U_a^2}{R_0^6 \omega^2 U_0}. \quad (2)$$

Здесь  $U_0$  — ускоряющее напряжение,  $R_c$  — радиус эмиссионного пояса на катоде,  $U_a$  — разность потенциалов между катодом и анодом. Согласно (2) радиус пучка  $R_0$  и частота генерации  $\omega$  для частотной перестройки при сохранении прочих параметров (диодный режим) должны удовлетворять соотношению  $R_0^3 \omega = \text{const}$ . Для подстройки радиуса пучка  $R_0$  можно использовать дополнительную катушку, корректирующую магнитное поле вблизи катода. Диодный режим магнетронно-инжекторных пушек не позволяет менять радиус пучка  $R_0$  при сохранении  $t_{\perp}$ , поэтому для гибкого управления параметрами необходимо использование триодной системы с изменяемым напряжением на аноде  $U_a$ . Серьёзной проблемой при разработке магнетронно-инжекторных пушек для мощного частотно-перестраиваемого гиротрона с высокими рабочими токами является разброс скоростей осцилляторного движения электронов. Как правило, значительный вклад в него вносит поле пространственного заряда, особенно при формировании интенсивных электронных пучков. Обычно разброс увеличивается при уменьшении анодного напряжения.

В гиротронах с широкополосной дискретной перестройкой частоты оптимальные длины резонатора, соответствующие максимальному коэффициенту полезного действия (КПД), существенно отличаются для разных мод. Возможна ситуация, когда длина резонатора недостаточна для эффективного возбуждения низкочастотной рабочей моды, в то время как для высокочастотной моды она больше оптимальной. В этом случае выбирается компромиссная длина резонатора, достаточная для возбуждения всех выбранных мод с приемлемой эффективностью.

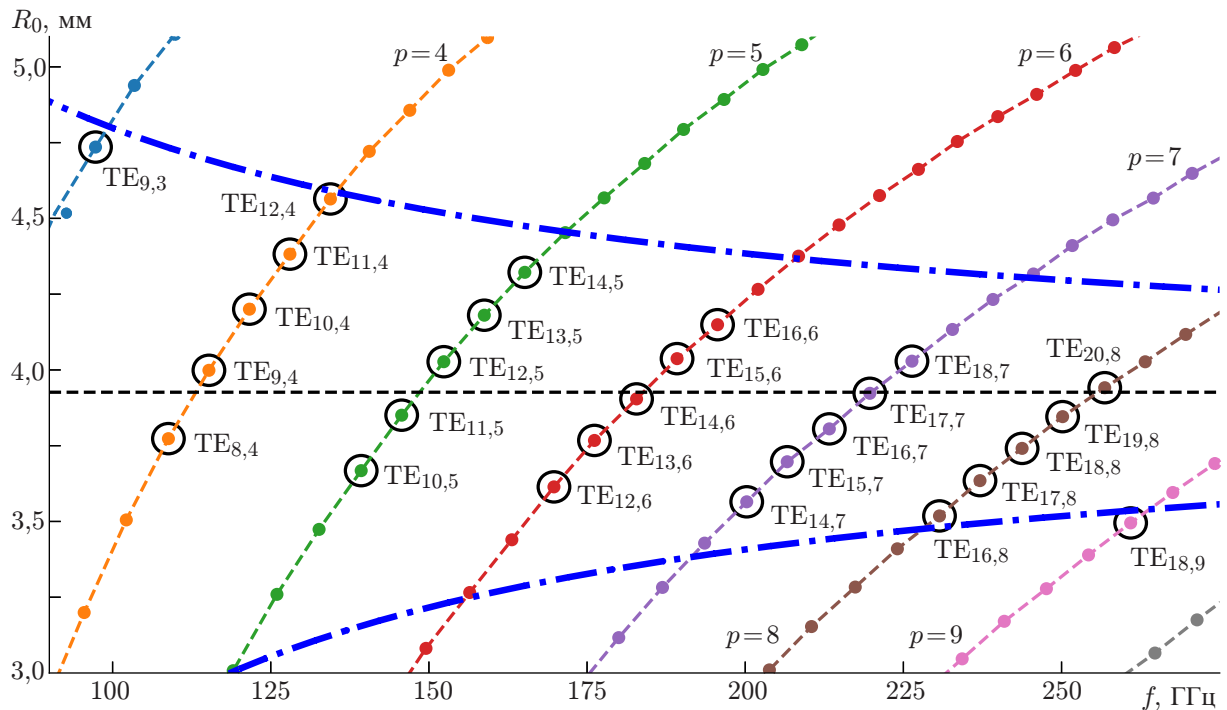


Рис. 1. Оптимальные радиусы и частоты рабочих мод

Формируемая в резонаторе гиротрона рабочая мода со сложной поперечной структурой конвертируется при помощи квазиоптического преобразователя и системы корректирующих зеркал в волновой пучок с гауссовой поперечной структурой и выводится через выходное окно. В настоящее время существует успешная практика разработки квазиоптических преобразователей, позволяющих трансформировать несколько мод со сходными каустиками в гауссов волновой пучок; при этом дифракционные потери в таких системах составляют менее 5 % от мощности всего излучения [15]. Кроме того, разработаны универсальные преобразователи для мод, вращающихся в обе стороны относительно электронного пучка [16].

Для эффективного перекрытия частотного диапазона 0,1÷0,26 ТГц выбрана последовательность рабочих мод от  $TE_{9,3}$  до  $TE_{18,9}$ . Данные моды отмечены кругами на рис. 1, на котором указаны оптимальные радиусы электронных пучков и собственные частоты мод гиротрона. Каждой пунктирной кривой на рис. 1 соответствует множество мод с одним радиальным индексом  $p$ , каждая точка на этих кривых соответствует собственной моде резонатора со своим азимутальным индексом  $m$ . Штрихпунктирные кривые показывают (согласно адиабатической теории) диапазон возможных изменений радиуса пучка за счёт добавления корректирующей катушки с максимальным магнитным полем в области катода до 0,06 Тл. Для устойчивой работы гиротрона выбрана

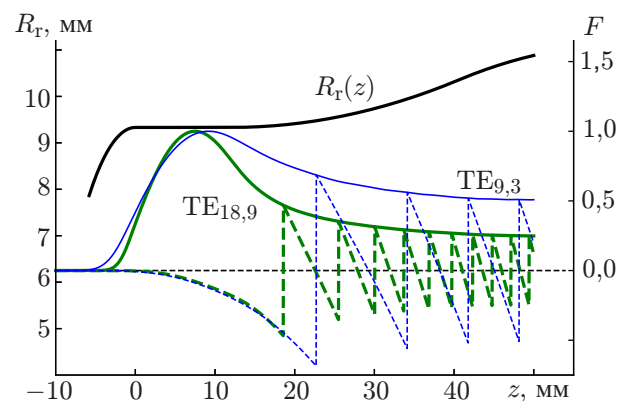


Рис. 2. Профиль резонатора  $R_r(z)$  и продольное распределение амплитуды (сплошные линии) и фазы (штриховые линии), выраженные в относительных единицах на шкале справа, рабочих колебаний на модах  $TE_{9,3}$  и  $TE_{18,9}$

умеренная величина питч-фактора  $g = \beta_{\perp}/\beta_{\parallel} = 1,2$ , где  $\beta_{\perp}$  и  $\beta_{\parallel}$  — нормированные на скорость света поперечная и продольная скорости электрона соответственно. При оптимизации гиротрона с учётом приемлемой удельной тепловой нагрузки (до 3 кВт/см<sup>2</sup>) и ограничений, налагаемых криомагнитом, определены рабочие параметры:  $U_0 = 50$  кВ, рабочий ток  $I = 12$  А. Профиль резонатора и типичная продольная структура нескольких рабочих мод показаны на рис. 2.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНЕТРОННО-ИНЖЕКТОРНОЙ ПУШКИ

Одним из ключевых этапов в разработке гиротрона является проектирование электронно-оптической системы, формирующей винтовой электронный пучок с требуемыми параметрами. Предварительные оценки её параметров проводились согласно адиабатической теории [14], а траекторный анализ — с помощью программы ANGEL-2DS [17]. При формировании электронного пучка существенным фактором является влияние пространственного заряда, определяемое отношением тока пучка к току Чайлда—Ленгмюра:

$$t_j = \frac{I}{2,33 \cdot 10^{-6}} \frac{d^2}{2\pi R_c l U_a^{3/2}}. \quad (3)$$

Здесь  $d$  — расстояние между катодом и анодом,  $l$  — ширина эмитирующего пояса. Данный параметр характеризует степень влияния поля пространственного заряда на качество электронного пучка. Как правило, электронные пушки гиротронов работают при  $t_j \leq 0,2$ , в  $T$ -режиме (с током, ограниченным температурой катода). Диапазон широкополосной перестройки частоты главным образом лимитирован ростом параметра  $t_j$  при уменьшении анодного напряжения. В рамках адиабатической теории из (3) можно получить

$$t_j \sim I \frac{\sqrt{t_{\perp}} \sqrt{U_0}}{R_0 l} \frac{1}{E_c^2}, \quad (4)$$

где  $E_c$  — напряжённость электрического поля вблизи эмиттера катода. Таким образом, одним из очевидных способов уменьшения влияния пространственного заряда на формирование электронного пучка является увеличение напряжённости  $E_c$ . При этом для формирования электронных пучков с заданным питч-фактором  $g \sim E_c/B_c$  необходимо увеличить и магнитное поле на катоде  $B_c$ . Поскольку ведущие центры электронных орбит движутся вдоль силовых линий, это можно сделать за счёт смещения катода в сторону магнитной системы и уменьшения его диаметра. В этом случае основным ограничением на рост электрического поля на катоде и, соответственно, на диаметр катода становится электрический пробой, вероятность которого значительна при  $E_c > 7$  кВ/мм. Кроме того, с уменьшением размеров катода растёт чувствительность пушки к его тепловым смещениям, точности изготовления, а также растёт требуемая плотность тока с эмиттера. Другой способ уменьшить параметр  $t_j$  заключается в увеличении ширины эмитирующего пояса и тем самым снижении плотности тока. Однако ширина пучка в резонаторе при этом не должна быть слишком большой для обеспечения приемлемой эффективности взаимодействия и селекции рабочей моды.

После проведения численного моделирования для нескольких вариантов выбрана триодная модель пушки с длинным носиком катода и относительно длинным анодом, которая создаёт плавно меняющееся электрическое поле в области катода. Благодаря этому уменьшено влияние неадиабатических эффектов для мод с низкими частотами и пушка способна создавать пучки с заданными характеристиками в широком диапазоне магнитных полей. Выбран катод с диаметром 44 мм и шириной эмитирующего пояса 5 мм, при этом плотность тока сравнительно

невелика и составляет  $j \approx 1,7 \text{ А/см}^2$ , а электрическое поле на катоде находится в пределах от 2,14 кВ/мм для моды  $\text{TE}_{8,4}$  до 6,31 кВ/мм в случае моды  $\text{TE}_{20,8}$ . Угол наклона эмитирующего пояса катода к силовым линиям магнитного поля зависит от рабочей моды и находится в интервале  $27,4^\circ \div 30,4^\circ$ , что соответствует формированию ламинарных пучков. Ранее уже отмечалось, что магнетронно-инжекторные пушки с ламинарным электронным пучком благоприятны для широкополосной дискретной перестройки частоты в гиротронах [18]. Эскиз триодной электронной пушки, включая форму электродов и траектории электронов для крайних мод  $\text{TE}_{9,3}$  и  $\text{TE}_{18,9}$ , представлен на рис. 3. Основные расчётные параметры магнетронно-инжекторной пушки и формируемого электронного пучка приведены в табл. 1.

Моделирование выполнено с учётом ионной компенсации 80 % пространственного заряда, которая имеет место в непрерывном и длинно-импульсном режимах работы гиротрона [19]. Траекторный анализ проводился как без учёта начальных скоростей электронов (для оценки позиционного разброса скоростей), так и с учётом разброса начальных скоростей, величина которого полагалась равной 40 % от дрейфовой скорости на катоде. При переходе на моды, генерируемые на меньших частотах, растёт влияние эффектов, связанных с полем пространственного заряда. Для подстройки радиуса пучка  $R_0$  для всех рассматриваемых мод достаточно корректирующей катушки с максимальной индукцией магнитного поля до 0,06 Тл в области катода.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Моделирование электронно-волнового взаимодействия проведено в рамках стационарной самосогласованной модели с учётом омических потерь и относительного разброса поперечных скоростей в электронном пучке, оценённого в 30 % (оценка сверху) [20]. Мощность выходного излучения гиротрона описывается выражением

$$P = \eta_w IU_0 = (1 - Q/Q_{\text{ohm}}) \eta_e IU_0, \quad (5)$$

где  $\eta_e$  и  $\eta_w$  — электронный и волновой КПД,  $Q$  и  $Q_{\text{ohm}}$  — полная и омическая добротности резонатора соответственно. Результаты расчётов электронно-волнового взаимодействия в гиротронах представлены в табл. 2. Эффективность работы гиротрона составила 20÷44 % в зависимости

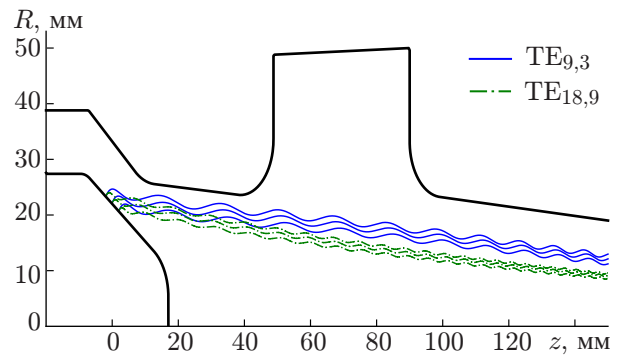


Рис. 3. Эскиз электронной пушки (толстые сплошные линии) и электронные траектории для эффективного взаимодействия с модами  $\text{TE}_{9,3}$  и  $\text{TE}_{18,9}$

Таблица 1. Основные параметры электронной пушки

Радиус катода $R_c$ , мм	22
Рабочее магнитное поле, Тл	3,71÷10
Анодное напряжение $U_a$ , кВ	19,2÷50
Электрическое поле на эмиттере, кВ/мм	2,22÷6,31
Ширина эмитирующего пояса, мм	5
Плотность тока на эмиттере $j$ , А/см <sup>2</sup>	1,7
Коэффициент перемагничивания $\alpha$	21,6÷39,7
Питч-фактор электронного пучка $g$	1,15÷1,25
Разброс поперечных скоростей $\delta V_{\perp}$ , %	20÷25

Таблица 2. Параметры гиротрона для выбранных рабочих мод при токе пучка  $I = 12$  А и ускоряющем напряжении  $U_0 = 50$  кВ

Мода	$R_0$ , мм	$f$ , ГГц	$\eta_w$ , %	$P$ , кВт	$B$ , Тл	$\Delta f$ (по уровню 100 кВт), МГц	$U_a$ , кВ	$E_c$ , кВ/мм
TE <sub>18,9</sub>	3,50	260,9	41,0	246	9,93	90	37,7	4,69
TE <sub>20,8</sub>	3,94	256,7	40,2	241	9,77	94	50,0	6,31
TE <sub>19,8</sub>	3,84	250,2	41,3	248	9,52	106	48,3	6,09
TE <sub>18,8</sub>	3,74	243,6	44,2	265	9,27	106	43,3	5,43
TE <sub>17,8</sub>	3,64	237,1	44,4	266	9,02	108	38,6	4,81
TE <sub>16,8</sub>	3,53	230,5	44,7	268	8,77	108	34,3	4,24
TE <sub>18,7</sub>	4,03	226,2	43,7	261	8,61	106	50,0	6,31
TE <sub>17,7</sub>	3,93	219,7	43,9	263	8,36	107	45,4	5,71
TE <sub>16,7</sub>	3,81	213,2	43,5	260	8,11	109	39,9	4,98
TE <sub>15,7</sub>	3,69	206,6	43,9	263	7,86	116	34,8	4,31
TE <sub>14,7</sub>	3,56	200,1	44,1	265	7,605	110	30,2	3,69
TE <sub>16,6</sub>	4,15	195,6	42,0	252	7,44	116	47,2	5,95
TE <sub>15,6</sub>	4,03	189,2	42,8	257	7,19	112	41,3	5,17
TE <sub>14,6</sub>	3,90	182,7	42,5	255	6,95	115	36,0	4,47
TE <sub>13,6</sub>	3,76	176,2	42,4	255	6,70	112	30,9	3,79
TE <sub>12,6</sub>	3,61	169,6	42,2	253	6,45	111	26,3	3,18
TE <sub>14,5</sub>	4,32	165,0	40,6	243	6,28	89	44,0	5,53
TE <sub>13,5</sub>	4,18	158,6	40,0	240	6,03	86	37,8	4,71
TE <sub>12,5</sub>	4,02	152,2	39,8	289	5,79	94	32,0	3,94
TE <sub>11,5</sub>	3,86	145,7	39,2	235	5,54	104	27,0	3,27
TE <sub>10,5</sub>	3,68	139,2	35,3	212	5,29	97	22,5	2,67
TE <sub>12,4</sub>	4,56	134,4	35,5	213	5,11	105	40,7	5,10
TE <sub>11,4</sub>	4,39	128,0	34,3	206	4,87	86	34,5	4,28
TE <sub>10,4</sub>	4,20	121,6	33,1	198	4,63	98	28,7	3,51
TE <sub>9,4</sub>	4,00	115,2	27,3	164	4,38	76	23,7	2,83
TE <sub>8,4</sub>	3,77	108,7	20,0	120	4,13	43	19,2	2,22
TE <sub>9,3</sub>	4,73	97,3	21,1	127	3,70	59	32,6	4,03

от рабочей моды, при этом мощность выходного излучения для большей части мод превысила 200 кВт (см. рис. 4а). При работе на модах TE<sub>9,3</sub>, TE<sub>8,4</sub> и TE<sub>9,4</sub> из-за недостаточной длины пространства взаимодействия мощность выходного излучения при оптимальном магнитном поле снижается до 120 кВт с волновым КПД 20 %. Диапазон непрерывной перестройки  $\Delta f$  для рабочих мод по уровню 100 кВт указан в табл. 2. Для всех рабочих мод омическая добротность оказалась значительно больше дифракционной, из чего следует, что омические потери существенно влияют на уменьшение волнового КПД.

Основным ограничением на мощность выходного излучения при работе на модах с относительно высокими частотами является значительная тепловая нагрузка на стенки резонатора (см. рис. 4б), которую можно уменьшить, выбрав резонатор меньшей длины, что даёт возможность в перспективе поднять мощность выходного излучения за счёт изменения параметров электронного пучка. В частности, в статье [21] описан гиротрон с мощностью выходного излучения до 330 кВт, работающий на моде TE<sub>19,8</sub> в режиме с большим рабочим током и ускоряющим напряжением 55 кВ. Вместе с этим укорочение резонатора приводит к значительному уменьше-

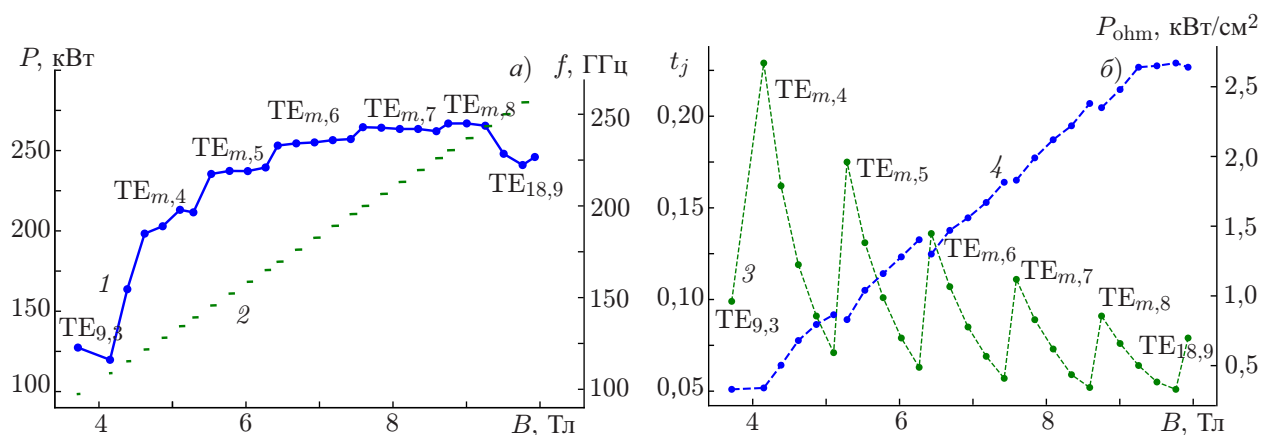


Рис. 4. Зависимость мощности выходного излучения (точки 1) и частоты генерации (2) от магнитного поля (а). Параметр  $t_j$  (3) и удельная тепловая нагрузка  $P_{ohm}$  (4) в зависимости от магнитного поля (б)

нию мощности выходного излучения для мод, генерируемых на относительно низких частотах, что уменьшает диапазон ступенчатой перестройки частоты при фиксированных параметрах тока и ускоряющего напряжения.

#### 4. КОЛЛЕКТОРНАЯ СИСТЕМА

Дополнительным способом повышения эффективности гиротронов является рекуперация остаточной энергии обработанного электронного пучка после электронно-волнового взаимодействия в изолированном коллекторе с тормозящим напряжением [22, 23]. В этом случае итоговый КПД определяется известным соотношением

$$\eta_{cpd} = \frac{U_0}{U_0 - U_{ret}} \eta_w, \quad (6)$$

где  $\eta_{cpd}$  — КПД гиротрона с учётом рекуперации,  $U_{ret}$  — тормозящее напряжение. Последнее ограничено минимальной энергией частиц  $W_{min}$  в обработанном пучке ( $eU_{ret} \leq W_{min}$ ). На рис. 5

показан расчётный энергетический спектр электронного пучка после выхода из пространства взаимодействия при работе на модах  $TE_{11,5}$  и  $TE_{8,4}$ , соответствующих случаям с наибольшей и наименьшей величиной  $W_{min}$ . Для исключения отражения электронов от коллектора при работе на всех выбранных модах взято тормозящее напряжение 15 кВ. За счёт одноступенчатой рекуперации можно повысить эффективность данного гиротрона с 20÷44 % до 29÷64 % соответственно.

Для работы в квазинепрерывном и непрерывном режимах средняя плотность мощности излучения, рассеиваемого на коллекторе, не должна превышать 0,5÷0,8 кВт/см<sup>2</sup>. Оценки проведены для режима с наибольшей тепловой нагрузкой на коллектор, т. е. при отсутствии генерации. Рассмотрены два варианта коллектора с диаметрами 250 и 150 мм.

В цилиндрическом коллекторе с диаметром 250 мм площадь оседания пучка составляет около 1 000 см<sup>2</sup>. Этот коллектор сравнительно прост в изготовлении, устойчив к искажениям магнитных

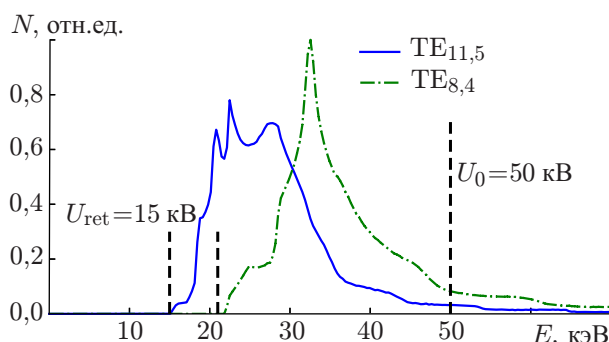


Рис. 5. Энергетический спектр обработанного электронного пучка для мод  $TE_{11,5}$  (сплошная линия) и  $TE_{8,4}$  (штрихпунктирная линия)

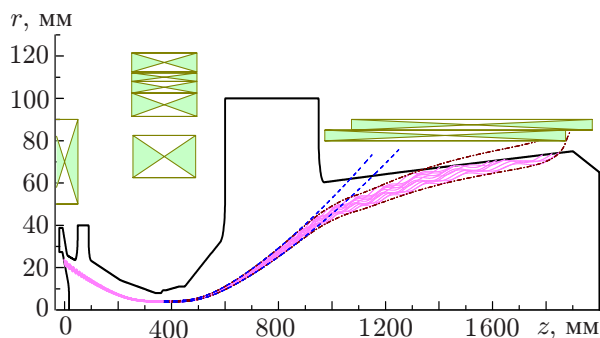


Рис. 6. Эскиз электронно-оптической системы гиротрона: распределение силовых линий вблизи коллектора с дополнительными катушками (штрихпунктирные линии) и без них (штриховые линии)

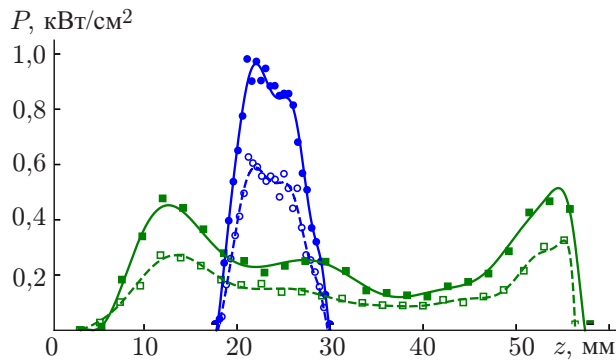


Рис. 7. Распределения плотности мощности, выделяющейся на стенках коллектора, для двух вариантов коллекторов — с диаметрами 250 (круги) и 150 мм (квадраты) без учёта (сплошные кривые) и с учётом (штриховые кривые) рекуперации при работе на моде  $TE_{17,7}$

полей, но имеет большие размеры, ограниченные снизу высокой плотностью мощности потока электронов.

Для уменьшения размеров коллектора при сохранении приемлемой удельной тепловой нагрузки одним из применяемых способов является формирование дополнительного статического магнитного поля при помощи аксиально-симметричных намотанных на коллектор катушек, увеличивающих эффективную область осаждения электронного пучка [24]. Дополнительная возможность снижения удельной тепловой нагрузки связана с использованием коллектора конического профиля. Применение комбинации этих подходов позволяет уменьшить максимальный внутренний диаметр коллектора до 150 мм (см. рис. 6). При этом используются две катушки с одним источником питания, создающие магнитное поле до 0,02 Тл. Площадь осаждения пучка в этой системе составляет около  $2600 \text{ см}^2$ , а средняя тепловая нагрузка на стенки  $0,53 \text{ кВт/см}^2$  без рекуперации и  $0,32 \text{ кВт/см}^2$  с рекуперацией при выборе для каждой рабочей моды оптимального магнитного поля дополнительных катушек, соответствующего эффективному осаждению электронного пучка на коллектор. Распределение тепловой мощности на стенках коллекторов с диаметрами 250 мм и 150 мм показано на рис. 7.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность реализации частотно-перестраиваемого гиротрона с высокой мощностью, работающего в широком диапазоне частот  $97 \div 261 \text{ ГГц}$ . Эффективность работы гиротрона составила  $20 \div 44 \%$  без учёта рекуперации в зависимости от рабочей моды. Для большинства рабочих мод мощность выходного излучения превысила 200 кВт. Такой диапазон дискретной перестройки частоты с 27 рабочими модами удалось достичь при помощи оптимизации магнетронно-инжекторной пушки и профиля резонатора. Количество рабочих мод можно увеличить за счёт возбуждения мод с противоположным вращением поля относительно электронного пучка и мод, взаимодействующих с электронным пучком на втором максимуме структурного фактора. Для успешной эксплуатации и повышения эффективности предложенной гиротронной системы требуется развитие методов автоматизации гиротронных комплексов, позволяющих максимально быстро осуществить перестройку с одной рабочей моды на другую. В данном направлении работы уже активно ведутся [25].



Одноступенчатая рекуперация остаточной энергии электронного пучка позволила поднять итоговый КПД до 29÷64 %. Предложена оптимизированная коллекторная система для частотно-перестраиваемого субтерагерцового гиротрона. За счёт оптимизации профиля коллектора и добавления дополнительных катушек удалось уменьшить его максимальный внутренний диаметр с 250 до 150 мм.

Авторы признательны Г.Г. Денисову и М.Ю. Глявину за интерес к работе и конструктивную критику. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 19-79-30071 «Принципы построения сверхмощных субтерагерцовых комплексов»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братман В.Л., Литвак В.Г., Суворов Е.В. // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 8. С. 867.
2. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е. и др. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 6. С. 667.
3. Dumbrajs O., Heikkinen J. A., Zohm H. // Nuclear Fusion. 2001. V. 41, No. 7. P. 927.
4. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. 336 p.
5. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2014. V. 35, No. 4. P. 325.
6. Brand G. F., Douglas N. G., Gross M., et al. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1982. V. 3, No. 5. P. 725.
7. Hong K. D., Brand G. F., Idehara T. // J. Applied Physics. 1993. V. 74, No. 8. P. 5250.
8. Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 340.
9. Запевалов В.Е., Богдасhev А.А., Денисов Г.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5-6. С. 443.
10. Thumm M., Arnold A., Borie E., et al. // Fusion Engineering and Design. 2001. V. 53. P. 407.
11. Koppenburg K., Dammertz G., Kutze M., et al. // IEEE Trans. Elec. Dev. 2001. V. 48, No. 1. P. 101.
12. Pan S., Du C.-H., Qi X.-B., Liu P.-K. // Scientific Reports. 2017. V. 7, No. 1. P. 7265.
13. Glyavin M. Yu., Chirkov A. V., Denisov G. G., et al. // Rev. Sci. Instr. 2015. V. 86, No. 5. Art. no. 054705.
14. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
15. Чирков А.В., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, № 8. С. 71.
16. Chirkov A. V., Denisov G. G., Kuftin A. N. // Applied Physics Letters. 2015. V. 106, No. 26. Art. no. 263501.
17. Планкин О.П., Семенов Е.С. // Вестник НГУ. Серия. Физика. 2013. Т. 8, № 2. С. 44.
18. Запевалов В.Е., Куфтин А.Н., Лыгин В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 9. С. 773.
19. Мануилов В.Н., Семёнов В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 1. С. 37.
20. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 4. С. 345.
21. Denisov G. G., Glyavin M. Yu., Fokin A. P., et al. // Rev. Scientific Instruments. 2018. V. 89, No. 8. Art. no. 084702.
22. Fix A. Sh., Flyagin V. A., Goldenberg A. L., et al. // Int. J. Electronics. 1984. V. 57, No. 6. P. 821.
23. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73, No. 26. P. 3532.

24. Запевалов В. Е., Калынов Ю. К., Лыгин В. К. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 3. С. 207.
25. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 720.

Поступила в редакцию 25 января 2019 г.; принята в печать 26 апреля 2019 г.

**OPTIMIZATION OF A HIGH-POWER SUBTERAHERTZ GYROTRON TUNABLE  
IN A WIDE FREQUENCY RANGE ALLOWING FOR THE LIMITATIONS  
IMPOSED BY THE MAGNETIC SYSTEM**

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

We present a version of the frequency-tunable gyrotron operating in a wide frequency range (0.1–0.26 THz with an output radiation power of up to 260 kW). Multilevel analysis and combined optimization of its electron-optical and electrodynamical systems are performed. The gyrotron is designed for operation with the JASTEC-10T100 cryomagnet or its analogs. Efficiency of single-stage recuperation in this system is analyzed. A collector system is proposed, which is capable of precipitating electron beams effectively during gyrotron operation in the entire specified frequency range.