УДК 621.385.69

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОНА С ЭШЕЛЕТТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

В. И. Белоусов^{*}, С. Н. Власов, Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, Е. В. Копосова, С. Ю. Корнишин, А. Н. Куфтин, М. А. Моисеев, В. И. Хижняк

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Описан гиротрон, работающий на первой гармонике гирочастоты, с эшелеттным резонатором с синусоидальным профилем гофрировки. Приводится методика расчёта характеристик эшелеттного резонатора и гиротрона. Даются результаты измерений электродинамических характеристик эшелеттного резонатора и экспериментальных исследований гиротрона с таким резонатором. Показано, что гиротрон имеет разреженный спектр собственных колебаний и коэффициент полезного действия на уровне типичных гиротронов мегаватного уровня мощности при существенно более низкой степени нагрева стенок резонатора. Обсуждается структура излучения из гиротрона с эшелеттным резонатором и возможность его передачи при помощи зеркального волновода.

ВВЕДЕНИЕ

В мощных приборах миллиметрового диапазона длин волн — гиротронах — используются резонаторы в виде волноводов переменного сечения, излучающие в рабочем режиме в выходной тракт (волновод кругового сечения) одну вращающуюся *H*-моду с азимутальным *m* и радиальным *p* индексами [1–3]. Свойства таких резонаторов исследованы очень подробно. Они обладают так называемой минимальной дифракционной добротностью

$$Q_{\rm dif.min} = \frac{4\pi L_{\rm p}^2}{\lambda^2}\,,\tag{1}$$

где $L_{\rm p}$ — длина резонатора, λ — длина волны излучения [1–4]. Существование величины $Q_{\rm dif.min}$ обусловлено наличием «дифракционного» одномодового вывода излучения из резонатора. Формула (1) отражает тот факт, что излучение из такого резонатора выводится с определённой скоростью, равной групповой скорости рабочей моды в резонаторе, которая поэтому не может быть произвольно большой. Это ограничение обусловлено работой резонатора на частоте, близкой к критической частоте конкретной (рабочей) моды. Существование предела снизу величины $Q_{\rm dif.min}$ при конечной величине омической добротности из-за ограничения сверху плотности потока энергии излучения в стенку на уровне $I \approx 2 \, {\rm kBt/cm^2}$ ограничивает мощность, которая может быть получена из гиротрона с данной модой. Повышение мощности достигается увеличением площади поверхности резонатора, для чего необходимо увеличение его поперечного сечения. Однако это возможно до определённого предела, поскольку спектр собственных частот резонатора при этом сгущается [5] и селекция мод в нём ухудшается.

Преодоление ограничения, связанного с равенством (1), возможно при использовании резонаторов, функционирующих в рабочем режиме на одной частоте, но с полезным излучением в виде многих мод выходного волновода.

Одним из резонаторов с таким выводом излучения является эшелеттный резонатор, в котором возможно снижение в несколько раз плотности потока энергии излучения в стенку. Гиротроны с такими резонаторами описаны в [6–8], где была продемонстрирована их работоспособность.

^{*} vbelousov@appl.sci-nnov.ru

Однако эффективность гиротронов [6–8] оказалась сравнительно невысокой, что было связано как с неоптимальностью сопряжения резонатора с выходным трактом, так и с недостатками используемой электронной пушки, формирующей винтовой электронный пучок сравнительно невысокого качества. В настоящей работе исследован гиротрон с эшелеттным резонатором, в котором использовалась электронная пушка, описанная в [9] и обеспечивающая работу гиротронов с традиционными резонаторами с высоким коэффициентом полезного действия (КПД), а также несколько улучшена конструкция самого́ резонатора и выходного тракта. Гиротрон спроектирован для работы на основном циклотронном резонансе в криомагните, идентичном по конструкции типичным криомагнитам для гиротронов с частотой 140÷170 ГГц мегаваттного уровня мощности. Проектная рабочая частота гиротрона около 150 ГГц и ускоряющее напряжение равно 80 кВ.

1. РАСЧЁТ ЭШЕЛЕТТНОГО РЕЗОНАТОРА НА СИММЕТРИЧНЫХ МОДАХ



туры высокочастотного поля от продольной коор-

Характеристики резонатора — частоты, добротности и структуры полей симметричных мод с азимутальным индексом m = 0 для синусоидального профиля гофрировки, наиболее простого для теоретического анализа, рассчитывались методом, описанным в работах [10–12]. Профиль резонатора показан на рис. 1. Зависимость радиуса резонатора от продольной координаты z описывается формулой

$$R(z) = R_{\rm b} + x(z)\sin\theta + y(z)\cos\theta + l_{\rm pr}\left[\sin(\pi z/L_{\rm p}) - 1\right], \quad (2)$$

где x(z) и y(z) являются решением системы уравнений:

 $z = x \sin \theta + y \cos \theta, \qquad y = A \sin(2\pi x/D).$ (3)

Здесь x — координата вдоль прямой, проходящей через точки $R_{\rm b} = 10,786$ мм при продольной координате $z_{\rm b}$ и $R_{\rm c} = 24,788$ мм при продольной координате $z_{\rm b}$. Эту прямую, наклонённую под углом θ к оси резонатора, будем называть «образующей», а расстояние $L_{\rm p} = z_{\rm c} - z_{\rm b} = 33,6$ мм будем считать длиной резонатора. Координата y считается перпендикулярной «образующей». Период гофрированной структуры, отсчитываемый вдоль образующей, D = 2,6 мм, связан с углом наклона «образующей» к оси резонатора $\theta = 22,6^{\circ}$ формулой

$$\sin \theta = \lambda / (2D). \tag{4}$$

При выполнении условия (4) волна, падающая на гофрированную структуру из резонатора нормально к его оси, при подходящей величине амплитуды гофра A частично отражается в направлении к оси, а частично выводится из резонатора в виде конического волнового пучка с образующей конуса, направленной под углом $\theta_{\rm p} = 2\theta$ к оси симметрии системы. На рис. 2 показано сечение конического волнового пучка, излучаемого из резонатора, плоскостью, проходящей через ось симметрии резонатора. Сечение имеет вид двух колоколообразных плоских пучков с начальной шириной $2a_0$, распространяющихся под углами $\pm \theta_{\rm p}$ к оси резонатора. Величины D и θ могут выбираться в широких пределах. Необходимо учитывать, что угол конуса θ не может быть

В. И. Белоусов, С. Н. Власов, Н. А. Завольский и др.

498

динаты z

очень маленьким, чтобы конический волновой пучок не попадал на гофрированную поверхность резонатора.

Амплитуда гофра определяет отношение амплитуды волны, рассеянной к оси, к амплитуде волны, уходящей из резонатора, и тем самым устанавливает добротность мод резонатора. При её величине, равной A = 0.48 мм $\approx \lambda/4$, согласно расчётам, теоретическая величина добротности Qоказалась примерно равной 4200, что обеспечивает при выбранных выше размерах резонатора и использовании электронной пушки, описанной в [9], достижение максимального значения электронного КПД.

Структура поля продольной компоненты магнитного поля F у рабочей моды в зависимости от продольной координаты на оси резонатора изображена на рис. 1. Приведённые на нём цифры 0.12; 0.15; 0.18; 0.22 и 0.25 являются азимутальным и радиальным индексами симметричной (что обозначено цифрой 0 перед точкой) моды, которая близка к критической в данном сечении и поле которой является доминирующим.

Как указано выше, излучение в выходном сечении резонатора в сечении $z = z_{\rm e}$ является коническим волновым пучком. Он может быть представлен в виде набора волноводных мод с различными радиальными индексами р. Для его сужения, т.е. уменьшения количества мод в нём, введён «параметр прогиба» $l_{\rm pr}.$ Проведённые расчёты показали, что при сравнительно небольшой величине $l_{\rm pr} = 0.08$ мм спектр излучения получается узким: в трёх модах с радиальными ин-



Рис. 2. Структура поля, излучаемого из резонатоpa

дексами p = 17, 18 и 19 содержится 0.93 (93 %) всей мощности волнового пучка.

Для оценки величины омических потерь и анализа взаимодействия поля такого резонатора с электронным пучком можно ввести понятие эквивалентного цилиндрического резонатора со средним радиусом $R_{\rm eff} = 17,25$ мм на моде $TE_{0.18}$. Проведённые нами расчёты, подробности которых будут опубликованы, показали, что при выбранном профиле омические потери на гофрированной поверхности увеличиваются по сравнению с потерями на гладкой поверхности приблизительно в 1,8 раза. Для величины омической добротности имеем $Q_{\rm ohm\,eff\,cil} \approx 50\,000$, таким образом, омические потери теоретически составляют примерно 14 % от полезного излучения при значении дифракционной добротности $Q \approx 4\,200$.

2. ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИРОТРОНА η С ЭШЕЛЕТТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Структура высокочастотного (ВЧ) поля в резонаторе (рис. 2) очень близка к гауссовой с протяжённостью $L_{\rm e} \approx 0.22$ мм на уровне $\exp(-1)$. Поэтому для расчётов КПД η можно воспользоваться результатами работы [13]. При напряжении $U_0 = 80$ кВ, питч-факторе g = 1,2(соответственно $\gamma_0 = 1 + U_0/511 = 1,156, \beta_\perp = 0,3859, \beta_z = 0,3216$) получается значение параметра неизохронности $\mu = \pi g \beta_{\perp} L / \lambda = 15,5$, почти оптимальное с точки зрения максимизации

В. И. Белоусов, С. Н. Власов, Н. А. Завольский и др.

499

2014

КПД [13]. Оценим токовый параметр на первой гармонике гирочастоты с помощью формулы

$$I_0 = \frac{0.24QI \, (\pi g)^4 \, (L/\lambda)^3}{4 \cdot 10^3 \gamma_0} \, G_{\rm mp} \tag{5}$$

при структурном факторе $G_{\rm mp\,max} = 0,000759$ для моды TE_{0,18} эквивалентного цилиндрического резонатора с соответствующим средним радиусом при оптимальном радиусе центров орбит электронного пучка $R_0 = 7,74$ мм. При токе электронного пучка I = 30A величина $I_0 = 1\,200$ близка к оптимальному значению $I_0 \approx 1\,500$ при $\mu \approx 16$. Согласно [13] это значит, что ожидаемый поперечный КПД $\eta_{\perp} \approx 70$ % и полный КПД $\eta_{\perp} \approx 40$ % без учёта разброса скоростей и омических потерь.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА С ГОФРИРОВКОЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Резонатор был изготовлен из меди марки М0б ГОСТ 10988-75 с точностью до 0,01 мм на токарном патронно-центровом станке с ЧПУ МК6801Ф3. Станок предварительно был испытан с установлением точности 0,008 мм. Точность обработки обеспечивается в том числе линейными направляющими качения фирмы «INA» (Германия) и шпинделем фирмы «Siemens» (Германия). Для выполнения канавок в резонаторе на электроэрозионном станке Accutex AU-300i был изготовлен резец из твёрдого сплава ВК8 с точностью до 0,005 мм. Исполнительные размеры инструмента и детали были проконтролированы на координатно-измерительной машине CWB-450DV с установленной точностью измерения 0,004 мм.

На первом этапе исследований были проведены «холодные» измерения изготовленного образца резонатора, фотография которого показана на рис. 3. Схема измерения добротности квазиоптического резонатора представлена на рис. 4, а фотография установки — на рис. 5. Возбуждение резонатора осуществлялось с помощью рупорного излучателя, формирующего параксиальный волновой пучок. Этот пучок параболическим рефлектором преобразовывался в волну, сходящуюся к оси резонатора под углом, близким к 45°. Эта волна, попадая на гофрированную поверхность резонатора, отражалась от неё в двух направлениях – в зеркальный и в –1-й дифракционные



Рис. 3. Фотография эшелеттного резонатора: a — общий вид, b — вид профиля

В. И. Белоусов, С. Н. Власов, Н. А. Завольский и др.



Рис. 4. Схема измерения добротности резонатора: 1 — резонатор, 2 — параболический рефлектор, 3 — излучающий рупор, 4 —
направленный ответвитель, 5 — детектор, 6 — генератор, 7 — измеритель КСВ
н



Рис. 5. Фотография установки для измерения добротности резонатора

максимумы. Излучение зеркального лепестка возбуждает моду в резонаторе. Величину связи возбуждаемой моды можно регулировать путём взаимного перемещения резонатора и параболического рефлектора.

коэффициент отражения, дБ



Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты

Измерялся коэффициент отражения от резонатора с помощью стандартного измерителя КСВн. На резонансной частоте коэффициент отражения достигал минимальных значений. По зависимости коэффициента отражения от частоты (рис. 6) можно определить добротность возбуждаемого таким образом резонанса. Измерения проводились для двух случаев: 1) вся поверхность резонатора участвовала в создании колебания H_{0n} (кривая 1 на рис. 6); 2) половина поверхности резонатора была закрыта металлической фольгой (кривая 2 на рис. 6). Из сравнения этих кривых видно, что добротность резонатора силь-

но падает, если часть его поверхности закрыть металлическим экраном. Это подтверждает то обстоятельство, что измеренные характеристики резонатора связаны с образованием резонансного колебания гофрированной поверхностью резонатора. Наиболее добротным, по результатам эксперимента, оказался резонанс на частоте f = 151,205 ГГц. Измеренная добротность на этой частоте составила $Q = 1\,470$ и была ниже расчётной. Последнее связано как с неточностью расчётов, так и неточностью изготовления. Отметим, что измеренные величины добротностей существенно ниже $Q_{\rm dif\ min}$, которая при выбранной длине резонатора равна примерно 3 500.

4. «ПРЯМОЙ» ВЫХОДНОЙ УЗЕЛ ЭШЕЛЕТТНОГО ГИРОТРОНА С ДВУМЯ ФОКУСИРУЮЩИМИ ЗЕРКАЛАМИ

Выходное излучение из эшелеттного резонатора можно представить в виде конического волнового пучка с углом раскрыва конуса θ_p . Для анализа изменения структуры пучка по мере его распространения воспользуемся представлением его сечения меридиональной плоскостью в виде двух плоских пучков, каждый из которых будем характеризовать шириной и углом между осью системы и направлением распространения пучка. Его структуру в зависимости от координаты вдоль оси \bar{x} , перпендикулярной направлению распространения конического пучка (направлению образующей конуса) и проходящей через точку T_0 — центр гофрированной поверхности резонатора (рис. 2), приближённо можно представить в виде гауссовой структуры $\exp[-\bar{x}^2/(2a_0^2)]$, где, согласно рис.1, величина a_0 — «полуширина» крыла пучка, $a_0 \approx 10$ мм. Поскольку конический волновой пучок является суперпозицией мод с радиальными индексами $p \gg 1$ и с частотами, далёкими от критических, то для расчёта изменения «полуширины» волнового пучка при его распространении по выходному тракту можно пользоваться формулами, описывающими плоские гауссовые волновые пучки.

Предположим, что структура волнового конического пучка при дальнейшем распространении сохраняется, но меняется его ширина и кривизна его фазового фронта («безаберрационное приближение» по терминологии работы [14]). Согласно [14, 15], полуширина гауссовых пучков меняется согласно формуле

$$a^{2} = a_{0}^{2} \left(1 - \frac{\bar{y}}{\bar{F}_{0}} \right)^{2} + \frac{\bar{y}^{2}}{k^{2} a_{0}^{2}}, \qquad (6)$$

где a — «полуширина» колоколообразной структуры проекции конического пучка на мериди-

В. И. Белоусов, С. Н. Власов, Н. А. Завольский и др.

502

ональную плоскость, \bar{y} — координата вдоль направления распространения конического пучка (рис. 2), $k = 2\pi/\lambda$, a_0 — «полуширина» в начале (при $\bar{y} = 0$), \bar{F}_0 — радиус кривизны его фазового фронта в этой же точке в плоскости, проходящей через ось симметрии резонатора. Для резонатора с профилем, показанным на рис. 1, $\bar{F}_0 \sim L_p^2/(8l_{\rm pr}) = 1\,900$ мм, и при дальнейших расчётах кривизной волнового фронта вблизи гофрированной поверхности пренебрегалось. По мере распространения вместе с шириной пучка меняется также кривизна фазового фронта. Её изменение описывается выражением

$$\bar{F} = -a/(\partial a/\partial \bar{y}). \tag{7}$$

Конический волновой пучок при распространении несколько (i) раз отражается от квазицилиндрических зеркал, каждое из которых в месте падения пучка мы будем характеризовать углом $\theta_{in,i}$ между образующей конуса конического пучка и нормалью к оси системы, углом конусности зеркала α_i (рис. 7) и радиусом кривизны R_i в плоскости, проходящей через ось симметрии.

При каждом отражении «полуширина» крыла не меняется, направление распространения крыла изменяется согласно формуле геометрической оптики

$$\theta_{\text{out},i} = \theta_{\text{in},i} + 2\alpha_i,$$
(8)

где $\theta_{\text{out}, i}$ — угол между нормалью к оси симметрии и образующей конуса выходного конического пучка. Радиус кривизны фазового фронта крыла пучка меняется согласно выражению

$$\frac{1}{2F_{\text{out},i}} = \frac{1}{2F_{\text{in},i}} + \frac{1}{R_i \cos(\theta_{\text{in},i} + \alpha_i)}, \quad (9)$$

где $F_{\text{in},i}$ и $F_{\text{out},i}$ — радиусы кривизны крыльев пучка перед падением и после падения на квазицилиндрическое зеркало соответственно.



Рис. 7. Конструкция электродинамической системы гиротрона: 1 — выходное излучение, 2 — выходное окно, 3 — коллектор, зеркальный волновод, 4 — зеркало 2, 5 — зеркало 1, 6 — эшелеттный резонатор

На рис. 7 приведена схема выходного узла, построенного на основе этих представлений. Он состоит из двух зеркал, расположенных непосредственно за резонатором, и волновода с диаметром D = 80 мм, оконченного вакуумным выходным окном. Первое зеркало наклонено к оси системы под углом $\alpha_1 = 7,29^\circ$, а второе — $\alpha_2 = 0^\circ$.

Радиусы кривизны зеркал найдены из следующих соображений. Исходным условием является коллимированность конического пучка на выходном окне, т.е. условие $\bar{F} = \infty$ в точке T_3 , где \bar{F} — радиус кривизны, определённый согласно расчётам по формулам (6)–(9). При этом диаметр пучка $a_{\rm w} \cos \theta_{\rm w}$ на окне не должен превышать D/3. Выполнение этих требований возможно при $R_1 = -630$ мм, $R_2 = 960$ мм, причём $\theta_2 = 59,9^{\circ}$, расстояние между точками T_0 и T_1 равно $\bar{y}_{01} = 65$ мм, а между точками T_1 и $T_2 - \bar{y}_{12} = 137$ мм. Расстояние между точками T_2 и T_3 по ломаной линии (поскольку конический волновой пучок отражается от цилиндрического волновода 3 раза) равно $\bar{y}_{23} = 552$ мм, полуширины крыльев пучка на первом и втором зеркалах соответственно равны $a_1 = 10,2$ мм и $a_2 = 18,8$ мм.



5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОНА С ЭШЕЛЕТТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ



Рис.
 9. Зависимость выходной мощности Pи КПД
 η от тока $I_{\rm b}$ электронного пучка

Экспериментальное исследование гиротрона с эшелеттным резонатором проводилось по традиционной схеме с использованием аппаратуры, описанной в [16]. На рис. 8 показана измеренная зависимость выходной мощности Р в импульсе (длительность импульса $\tau = 50$ мс при частоте следования импульсов $f_0 = 5 \, \mathrm{c}^{-1}$) при ускоряющем напряжении U = 80 кВ от величины магнитной индукции в криомагните B_0 , т.е. фактически от тока в сверхпроводящем соленоиде, при различных значениях тока $J_{\rm a}$ электронного пучка, снимаемого с катода. Для подстройки положения электронного пучка (центров электронных орбит $R_{\rm e}$) внутри резонатора путём изменения перемагничивания использовалась вспомогательная катушка, расположенная в области катода. Благодаря подстройке тока этой катушки

были выбраны оптимальные значения параметров электронного пучка для получения максимального значения КПД η . Из кривых рис. 8 можно сделать вывод, что в полосе $\Delta B_0/B_0 \approx 0.05$ имеется одно колебание. Зависимость мощности P и η от величины тока пучка показана на рис. 9. Высокое значение $\eta = 0.32$ имело место при токе $J_a = 35$ А. При $J_a = 25$ А значение КПД было несколько ниже ($\eta = 0.29$). Эти значения КПД находятся в хорошем согласии с теоретическими оценками (с учётом пониженного по отношению к расчётному значению добротности резонатора). Измеренное значение частоты $f_g = 151.6$ ГГц близко к частоте одной из мод, полученной при «холодных» измерениях: $f_{\rm g \, cold} = 151.2$ ГГц. Отметим, что при том значении добротности,

которое получено при холодных измерениях ($Q \approx 1400$), в стенках резонатора выделяется от 5 % выходной мощности, если учесть, что потери при отражении от гладкой и гофрированной поверхности разные [17] (на гофрированной они больше, чем на гладкой). При наклонной длине стенок резонатора $L_{\rm p\, Hakn} = L_{\rm p}/\cos\theta = 37$ мм плотность поглощаемой мощности составляет величину $I \approx 1.3 \,\mathrm{\kappa Br/cm^2}$, которая существенно ниже аналогичной величины в традиционных резонаторах, используемых в гиротронах.

В исследованном гиротроне имела место генерация также и при более низких значениях магнитного поля, что, по-видимому, объясняется генерацией на спадающем участке магнитного поля в резонаторе, образованном вторым зеркалом. Это явление хотя и не препятствует генерации в рабочем режиме, но для полного прояснения своей природы требует дополнительного исследования.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что эшелеттный гиротрон имеет существенно более разреженный спектр собственных частот и в три раза меньшую тепловую нагрузку на стенки резонатора по сравнению с традиционным гиротроном при эффективности, близкой к эффективности последнего. Это позволяет надеяться на получение в эшелеттных гиротронах большей мощности в квазинепрерывном режиме. Получаемое в эшелеттном гиротроне излучение в виде конического волнового пучка в виде суперпозиции симметричных TE-волн волновода с круговым сечением может быть сравнительно простыми трансформаторами преобразовано в волну TE_{0,1} волновода с круговым сечением, имеющую минимальные потери при распространении и обеспечивающую наибольшую электропрочность [2]. Необходимым условием является существенное продвижение в технологии изготовления резонаторов такого типа, а также дальнейшее развитие методов их расчёта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-02-00611).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Запевалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8-9. С. 559.
- 2. Гиротрон: Сб. научн. трудов / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. 255 с.
- Власов С. Н., Жислин Г. М., Орлова И. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12, № 8. С. 1236.
- Братман В. Л., Моисеев М. А., Петелин М. И., Эрм Р.Э. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 4. С. 622.
- 5. Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 476 с.
- 6. Власов С. Н., Копосова Е. В., Павельев А. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, № 4. С. 8.
- Власов С. Н., Копосова Е. В., Павельев А. Б., Хижняк В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 691.
- Агапов Л. Н., Богданов С. Д., Венедиктов Н. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 7. С. 489.
- 9. Запевалов В.Е., Куфтин А.Н., Лыгин В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 9. С. 773.
- 10. Цимринг Ш. Е., Павельев В. Г. // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, № 6. С. 1099.
- 11. Павельев В. Г., Цимринг Ш. Е. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 6. С. 1121.

- 12. Власов С. Н., Завольский Н. А., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. C. 716.
- 13. Гиротроны: Сб. научн. трудов / Под ред. В.А. Флягина. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. 217 с.
- 14. Власов С. Н., Петрищев В. А., Таланов В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14, № 9. C. 1353.
- 15. Бондаренко Н.Г., Таланов В.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7, № 2. С. 313.
- 16. Запевалов В. Е., Богдашов А. А., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5–6. C. 443.
- 17. Ильинский А.С., Слепян Г.Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями. М.: МГУ, 1983. 231 с.

Поступила в редакцию 28 января 2014 г.; принята в печать 26 апреля 2014 г.

STUDIES OF A GYROTRON WITH THE ECHELETTE CAVITY

V. I. Belousov, S. N. Vlasov, N. A. Zavol'sky, V. E. Zapevalov, E. V. Koposova, S. Yu. Kornishin, A. N. Kuftin, M. A. Moiseev, and V. I. Khizhnyak

We describe a gyrotron operated at the first gyrofrequency harmonic with an echelette cavity which has the sinusoidal corrugation profile. The method used to calculate the parameters of the echelette cavity and the gyrotron is described. The results of measuring the electrodynamic characteristics of the echelette cavity and studying experimentally the gyrotron with such a cavity are presented. It is shown that the gyrotron has a rarefied spectrum of eigenoscillations and the efficiency at the level of typical megawatt-power gyrotrons at a significantly lower degree of cavity wall heating. The structure of radiation generated by the gyrotron with the echelette cavity is discussed, as well as the possibility of transmitting this radiation by means of a mirror waveguide.