

УДК 629.3.052.4

РАЗРАБОТКА МОЩНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ К-ДИАПАЗОНА

М. Д. Проявин^{1*}, *М. Ю. Глявин*¹, *Н. А. Завольский*¹, *В. Н. Мануилов*^{1,2},
*М. В. Морозкин*¹, *Д. И. Соболев*¹, *Т. О. Крапивницкая*^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Проанализирована возможность создания нового поколения непрерывных гиротронов К-диапазона частот ($28 \div 30$ ГГц) на основном циклотронном резонансе с мощностью выходного излучения $25 \div 30$ кВт и более. Для гиротрона с магнито экранированным соленоидом выполнена оптимизация электронно-оптической и электродинамической систем, обеспечивающая генерацию с высоким (около 50 %) коэффициентом полезного действия (КПД) при приемлемых тепловых нагрузках на ключевые элементы прибора. Предложенный проект гиротрона обеспечивает длительную непрерывную работу технологического комплекса при полном КПД системы около 35 %, что значительно превосходит существующие аналоги.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко распространены технологии, в которых необходимо использование мощного непрерывного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в частотном диапазоне $24 \div 30$ ГГц [1]: плазмо-химическое выращивание алмазных плёнок и дисков [2], спекание керамических и композитных материалов [3], получение интенсивных пучков многозарядных ионов [4]. В качестве перспективных направлений рассматривается возможность эффективного применения источников микроволнового излучения в комплексах, предназначенных для бор-нейтронозахватной терапии [5], получения нанопорошков оксидов металлов методом испарения—конденсации [6] и ряда других задач.

подавляющее число существующих технологических комплексов реализовано на базе гиротронов, которые давно продемонстрировали возможность долговременной, стабильной и эффективной генерации излучения для осуществления длительных (до нескольких недель) процессов. Дальнейшее развитие источников электромагнитного поля требует в первую очередь повышения мощности и эффективности комплекса в целом при сохранении простоты управления параметрами его излучения.

Следует отметить, что до сих пор большинство технологических гиротронов работали на второй гармонике гирочастоты при относительно низких (около 0,5 Тл) магнитных полях, создаваемых «тёплыми» соленоидами с водяным или масляным охлаждением. Типичные значения генерируемой мощности на частотах $24 \div 30$ ГГц равны $10 \div 15$ кВт, однако её дальнейшее повышение при увеличении рабочих токов затруднено конкуренцией с паразитными модами на основном циклотронном резонансе. Естественным решением этой проблемы представляется переход к генерации на первой гармонике циклотронной частоты. Дополнительным преимуществом является тот факт, что электронно-волновое взаимодействие винтового электронного пучка (ВЭП) с рабочим типом колебаний на основной гармонике гирочастоты, как правило, даёт возможность

* mdchase@yandex.ru

реализовывать большие значения коэффициента полезного действия (КПД) — до 50 % без рекуперации энергии, что и было продемонстрировано в эксперименте на частоте 24 ГГц [7]. Главным образом это связано с возможностью реализации оптимальных с точки зрения взаимодействия тока $I_0 \sim I_b[A](L/\lambda)^{7-2n}$ и длине резонатора L при приемлемых технических параметрах режима (n — номер гармоники, λ — длина волны, I_b — ток пучка). При использовании гармоник гирочастоты необходимо переходить к более высоким рабочим токам. В то же время при работе на второй гармонике оптимальная с точки зрения энергообмена длина регулярной части резонатора примерно вдвое больше, чем в гиротронах на первой гармонике. Согласно известной формуле для дифракционной добротности $Q_{\text{dif}} \sim (L/\lambda)^2$, увеличение длины L влечёт за собой рост дифракционной добротности Q_{dif} и соответствующее уменьшение КПД гиротрона:

$$\eta = \eta_{\perp} \frac{g^2}{1 + g^2} \left(1 - \frac{Q_{\text{dif}}}{Q_{\text{dif}} + Q_{\text{ohm}}} \right), \quad (1)$$

где $\eta_{\perp}$ — поперечный КПД, g — питч-фактор (отношение вращательной и поступательной скоростей электронов), Q_{ohm} — омическая добротность.

Перейти к генерации на первой гармонике и в то же время сохранить на приемлемом уровне мощность питания соленоида можно за счёт экранирования магнитного поля рассеяния основного «тёплого» соленоида. При этом поле рассеяния заметно снижается, линии поля концентрируются и поле внутри экранированной области увеличивается. Существенно, что для основной циклотронной гармоники длина однородного участка магнитного поля, требуемая для эффективного энергообмена электронов с волной, заметно меньше [8], чем на высших гармониках, что позволяет дополнительно снизить энергопотребление соленоида.

Первые теоретические и экспериментальные работы по исследованию гиротронов с экранированными магнитными системами представлены в работах [9–11], продемонстрировавших возможность генерации с КПД около 20 % при мощности выходного излучения 10 кВт [11] на второй гармонике гирочастоты в гиротроне с неадиабатической электронно-оптической системой. Подобные системы формирования ВЭП, как правило, характеризуются большей чувствительностью к вариациям рабочих параметров (напряжение и ток электронного пучка, магнитное поле в области эмиттера), погрешностям изготовления и юстировки. С учётом вышесказанного, для следующего поколения технологических гиротронов наиболее предпочтительным представляется адиабатический вариант электронно-оптической системы.

Ниже рассмотрен проект мощного (25–30 кВт) непрерывного гиротрона на первой гармонике циклотронной частоты с экранированным «тёплым» соленоидом и частотой генерации 28 ГГц, использующего традиционную адиабатическую магнетронно-инжекторную пушку (МИП) и позволяющий, как показывают расчёты, обеспечить полный технический КПД комплекса около 35 %.

1. РАБОЧАЯ МОДА И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ

На выбор рабочей моды и размер резонатора гиротрона влияет ряд ограничений. Во-первых, для снижения энергопотребления магнитной системы диаметр «тёплого» отверстия основного соленоида был выбран равным 53 мм (см. подробнее раздел 2). В силу ограничений, налагаемых продольным распределением магнитного поля основного соленоида и геометрическими размерами магнита, в качестве рабочей была выбрана мода попутного с электронами вращения $TE_{1,2}$ на основном циклотронном резонансе. В этом случае радиус резонатора, соответствующий критической частоте, равен $R = 9,05$ мм, что позволяет разместить эффективную систему охлаждения проточным хладагентом.

Параметры высоковольтных источников питания (напряжение $U \leq 23$ кВ, ток пучка $I_b \leq 2,4$ А) соответствуют используемым в технологических комплексах на базе гиротронов, что в перспективе позволит применять новые лампы в существующих системах. Опыт реализации современных гиротронов показывает, что в рассматриваемом диапазоне частот можно сформировать ВЭП с питч-фактором $g = 1,6$.

Исходя из анализа структурных факторов рабочей и ближайших к ней паразитных мод, данных о требуемых для долговременной работы эмиттера плотностях токов (как правило, не более 3 А/см^2 при времени жизни в тысячи часов) и типичном для МИП отношении магнитных полей в резонаторе и на катоде (определяющим и соотношением радиусов ведущих центров электронных орбит), можно оценить приемлемый радиус электронного пучка в резонаторе: $3 \text{ мм} < R_b < 4 \text{ мм}$. Указанный диапазон значений R_b был проанализирован подробнее на основе самосогласованных уравнений с нефиксированной структурой ВЧ поля [12], позволяющих получить значения мощности выходного излучения и эффективности генерации при различных профилях резонатора и радиусах электронного пучка. Оптимизация профиля резонатора и магнитного поля проводилась с помощью решения системы уравнений с нефиксированной структурой высокочастотного (ВЧ) поля, критерием сходимости которого являлось стремление к нулю невязки, а именно коэффициента отражения от выходного сечения R_{out} , даваемого формулой

$$|R_{\text{out}}|^2 = \left| \left(\frac{dF}{dz} + ik_{\parallel} F \right) / \left(\frac{dF}{dz} - ik_{\parallel} F \right) \right|^2, \quad z = z_{\text{out}}, \quad (2)$$

где F — начальная амплитуда ВЧ поля, $k_{\parallel}$ — волновой вектор, определяющий частоту генерации, z — продольная координата. Таким образом, были уточнены рабочие параметры, обеспечивающие максимальный возможный КПД. Магнитное поле в области взаимодействия профилировалось с плавным нарастанием к выходному концу для сохранения условий синхронизма и повышения эффективности взаимодействия. Моделирование проводилось с учётом разброса поперечных скоростей электронов 20 %, типичного для МИП гиротронов. В окончательном варианте расчётный КПД составил 48 % без использования рекуперации остаточной энергии электронного пучка при $R_b = 3$ мм, длине однородного участка магнитного поля 65 мм и индукции 1,024 Тл.

2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ГИРОТРОНА

Выбор диаметра проходного отверстия соленоида диктуется компромиссом между необходимостью обеспечить достаточное пространство для размещения анодно-катодного узла и желанием минимизировать энергопотребление соленоида.

Форма и положение ферромагнитного экрана выбирались по методике, подробно изложенной в работе [13]. Моделирование и оптимизация системы выполнялись в программе ELCUT 5.6 [14]. Результаты расчётов распределения магнитного поля приведены на рис. 1. Для его тонкой подстройки в области резонатора гиротрона в магнитной системе использованы катушки, намотанные непосредственно на корпус прибора.

Поле рассеяния экранированного соленоида характеризуется большой степенью неоднородности, что затрудняет использование хорошо разработанных адиабатических МИП. Для обеспечения условий адиабатичности магнитного поля во всей области формирования ВЭП магнитная система предусматривает установку корректирующей катушки в области катода (её мощность менее 3 % от мощности основного соленоида). Отметим, что применение катодной катушки позволяет осуществлять и плавную подстройку параметров электронного пучка. С целью дополнительного снижения мощности питания катодной катушки она также была окружена ферромагнитным экраном (см. рис. 1).

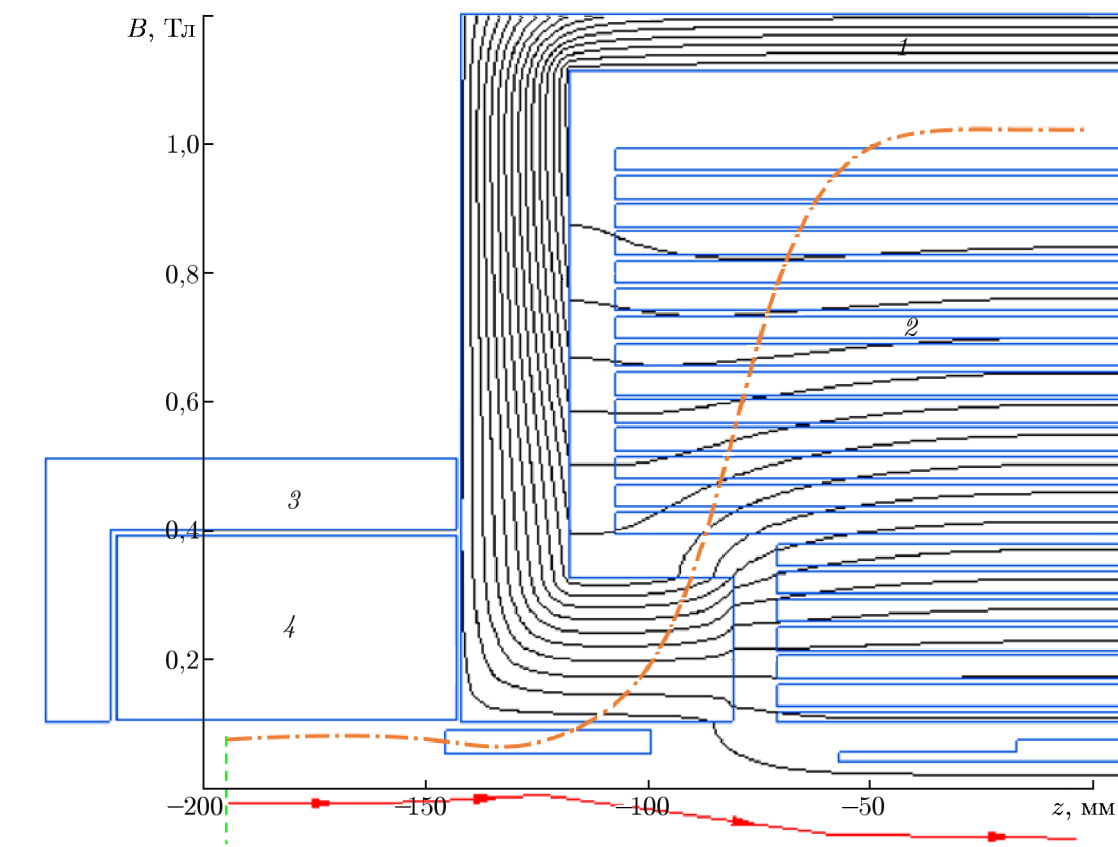


Рис. 1. Конфигурация магнитной системы и распределение осевого магнитного поля (штрихпунктир). 1 — ферромагнитный кожух основного соленоида, 2 — медная обмотка основного соленоида, 3 — ферромагнитный кожух катодной катушки, 4 — катодная катушка. Показано положение центра эмиттера МИП (штриховая линия) и выходящая из него силовая магнитная линия

Экспериментальные измерения параметров магнитной системы выполнены с использованием датчика Холла и согласуются с данными численного моделирования. Расхождения в области рабочего пространства гиротрона не превышают 0,1 %, а в области МИП и канала транспортировки — 2÷3 %. Указанные расхождения связаны с небольшим отличием реальных B - H -характеристик ферромагнетиков от использованных в расчёте, не влияют на качество формируемого ВЭП и могут быть легко скомпенсированы малой вариацией тока катодной катушки.

При токе питания соленоида $I = 103$ А и напряжении $U = 124$ В было получено магнитное поле в центре системы 1,024 Тл, что хорошо согласуется с расчётной мощностью потребления в 13650 Вт ($I = 105$ А, $U = 130$ В). Масса магнитной системы с экранами составляет около 200 кг.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предварительные оценки параметров МИП были выполнены на базе адиабатической теории [15, 16]. Результаты сведены в табл. 1. В расчётах принято умеренное значение плотности тока $j_k = 1,7$ А/см², что позволяет прогнозировать время жизни катода в десятки тысяч часов. Для возможности подстройки параметров ВЭП рассматривалась триодная конфигурация МИП. Оценки показывают, что при указанных выше плотностях тока отношение рабочего тока

Таблица 1. Основные параметры системы формирования ВЭП

Ускоряющее напряжение, кВ	23
Напряжение первого анода, кВ	6,5
Рабочее магнитное поле, Тл	1,024
Номер гармоники гирочастоты	1
Ток пучка, А	2,4
Средний радиус ведущего центра электронов в резонаторе, мм	3
Питч-фактор	1,6
Радиус катода, мм	11
Коэффициент перемангничивания	13,44
Магнитное поле на катоде, Тл	0,076
Расстояние от центра магнитной системы до центра эмиттера, мм	194
Ширина эмиттера, мм	2
Разброс ведущих центров электронных орбит, мм	0,377
Плотность тока, А/см ²	1,7
Расстояние между катодом и первым анодом, мм	7,6

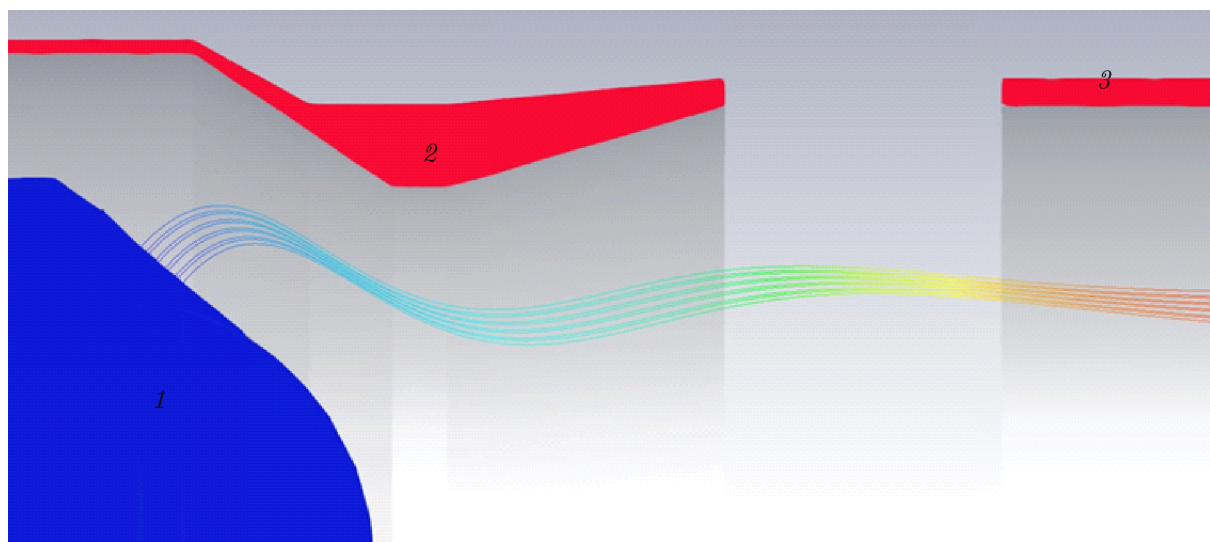


Рис. 2. Профиль электродов и электронные траектории при потенциале катода 0 кВ (1), анода 6,5 кВ (2), полном ускоряющем напряжении 23 кВ (3) и токе пучка 2,4 А

Таблица 2. Параметры оптимизированного ламинарного ВЭП

Ускоряющее напряжение, кВ	23
Потенциал первого анода, кВ	6,5
Разброс поперечных скоростей, %	13
Питч-фактор	1,58
Радиус пучка, мм	3

к ленгмюровскому току пушки составляет $t_j \approx 0,4$, что приводит к существенному возмущению распределения скоростей электронов в пучке силами пространственного заряда [17]. Для снижения влияния этого фактора угол наклона эмиттера к оси симметрии системы был выбран таким, чтобы обеспечить формирование ламинарного пучка.

Последующая оптимизация формы электродов с целью снижения позиционного разброса скоростей и разброса скоростей, вызванного полем пространственного заряда, выполнялась на базе комплекса CST Studio Suite [18]. Оптимизация МИП позволила получить ламинарный электронный пучок (см. рис. 2) с приемлемыми для эффективного электронно-волнового взаимодействия параметрами, приведёнными в табл. 2 и на рис. 3.

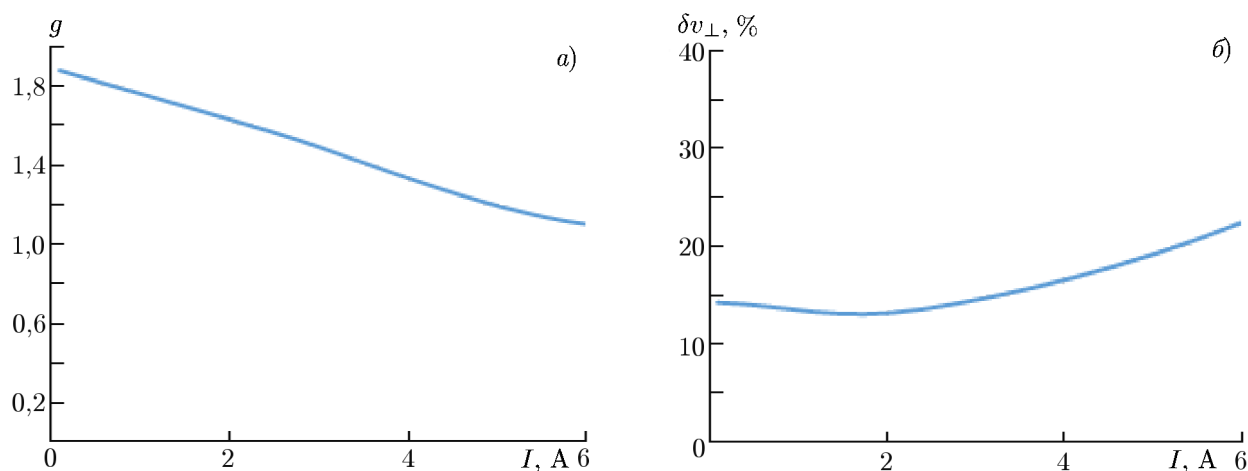


Рис. 3. Зависимости питч-фактора (а) и разброса вращательных скоростей электронов (б) от тока пучка

4. ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ГИРОТРОНА

В технологических гиротронах вследствие малых поперечных размеров прибора обычно используют прямой вывод СВЧ излучения. При этом коллектор электронов играет также роль выходного волновода. Оценки показывают, что для реализации непрерывного режима с мощностью в десятки киловатт необходим пространственно развитый коллектор с диаметром порядка 70 мм. Быстрая расходимость силовых линий в экранированном соленоиде, вдоль которых движется ВЭП, и, соответственно, близость зоны оседания электронного пучка к центру резонатора приводят к необходимости синтеза оптимизированного профиля поверхности, обеспечивающего минимальную трансформацию рабочего типа колебаний и приемлемую плотность мощности электронного потока.

Указанная задача решалась с помощью итерационной процедуры. Сначала на основе метода синтеза слабонерегулярных волноводов находился профиль выходного волновода, обеспечивающий малый (менее 2%) коэффициент трансформации рабочего колебания $TE_{1,2}$ в другие моды [19], а затем по методике [20] проводилось численное моделирование электронных траекторий в коллекторной области гиротрона для определения границ оседания электронного следа на коллекторе и распределения плотности мощности. Далее форма коллектора модифицировалась для снижения плотности мощности и указанный цикл расчётов повторялся до достижения как малых коэффициентов трансформации рабочего типа колебаний, так и пикового значения плотности мощности (см. рис. 4).

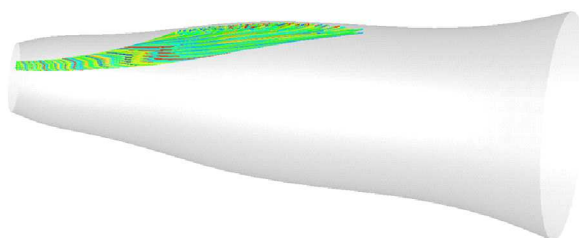


Рис. 4. Оптимизированная форма коллектора и след электронного пучка. Плотность мощности не более 480 Вт/см², коэффициент передачи рабочей моды $TE_{1,2}$ 98 %

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан технологический гиротрон с мощностью, в несколько раз превышающей известные аналоги. Показано, что для снижения энергопотребления комплекса в целом необходимо использовать магнитно экранированные системы. При сохранении энергопотребления магнитной системы технологического гиротронного стенда экспериментально продемонстрирована возмож-

ность двойного повышения магнитного поля используемых соленоидов. Это позволяет перейти к генерации на первой гармонике циклотронной частоты, что обеспечивает простое решение проблемы селекции типов колебаний при повышении мощности выходного излучения. Показано, что возможна реализация устойчивой одномодовой генерации с КПД 48 % и мощностью выходного излучения до 25÷30 кВт. При использовании простейшего конусного профиля коллектора содержание примесных мод за счёт переизлучения рабочей моды составляет около 10 %. Оптимизирован профиль коллектора гиротрона, обеспечивающий одновременно умеренную плотность мощности, пригодную для работы в непрерывном режиме, и малый (менее 2 %) коэффициент трансформации рабочей моды в примесное излучение при выводе её из резонатора гиротрона.

Результаты работы свидетельствуют о возможности реализации полного КПД (т. е. отношения мощности выходного СВЧ излучения к полной потребляемой комплексом мощности) 35 %, что вдвое выше, чем у существующих систем.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН 0035–2019–0001 и при поддержке РФФИ (проекты 17–02–00183, 19–32–90102).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков Ю. В., Еремеев А. Г., Глявин М. Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 10. С. 843.
2. Vikharev A. L., Gorbachev A. M., Kozlov A. V., et al. // Diamond and Related Materials. 2006. V. 15, No. 4–8. P. 502.
3. Bykov Yu. V., Egorov S. V., Ereemeev A. G. et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 96, No. 11. P. 3518.
4. Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., et al. / J. Instrument. 2012. V. 7. Art. no. P10010.
5. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., et al. / J. Appl. Phys. 2015. V. 118. No. 9. Art. no. 093301.
6. Samokhin A. V., Alekseev N. V., Vodop'yanov A. V., et al. // High Energy Chem. 2015. V. 49, No. 4. P. 267.
7. Bykov Yu., Glyavin M., Goldenberg A., et al. // Proc. 4th Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, 2000. V. 2. P. 747.
8. Нусинович Г. С., Эрм Р. Э. // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1972. № 8. С. 55.
9. Запевалов В. Е., Куфтин А. Н., Мануилов В. Н. // Тез. докл. XI Всесоюзн. конф. по электронике СВЧ. Орджоникидзе. 1986. С. 136.
10. Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Тез. докл. X Всесоюзн. конф. по электронике СВЧ. Т. 1. Вакуумная электроника СВЧ. Минск. 1983. С. 192.
11. Куфтин А. Н., Белов С. П. // Прикладная физика. 2000. № 3. С. 76.
12. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Моисеев В. А., Немировская Л. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 8. С. 675.
13. Глявин М. Ю., Мануилов В. Н., Проявин М. Д. // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 10. С. 1010.
14. <http://elcut.ru>
15. Гольденберг А. Л., Петелин М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 1. С. 141.
16. Цимринг Ш. Е. // Лекции по электронике СВЧ (3-я Зимняя школа-семинар для инженеров). Саратов: СГУ, 1974. Кн. 4. С. 3.
17. Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 4. С. 491.
18. <https://www.cst.com>
19. Sobolev D. I., Denisov G. G. // IEEE Trans. Plasma Sci. V. 38, No. 10. P. 2825.

20. Morozkin M. V., Glyavin M. Yu., Manuilov V. N., Proyavin M. D. // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. Art. no. 04043.

Поступила в редакцию 22 апреля 2019 г.; принята в печать 2 августа 2019 г.

**DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER CONTINUOUS-WAVE GYROTRON
FOR HIGH-EFFICIENCY TECHNOLOGICAL K-BAND MICROWAVE
COMPLEXES**

*M. D. Proyavin, M. Yu. Glyavin, N. A. Zavol'sky, V. N. Manuilov, M. V. Morozkin, D. I. Sobolev, and
T. O. Krapivnitskaya*

We analyze the possibility to create new generation continuous-wave gyrotrons operating in the K-band (at frequencies of 28-30 GHz) at the fundamental cyclotron resonance with an output power of 25–30 kW and more. For a gyrotron with a magnetically shielded solenoid, the electron-optical and electrodynamic systems have been optimized, which ensures generation with high efficiency (about 50%) at acceptable thermal loads on the key device elements. The proposed design of the gyrotron ensures long-term continuous-wave operation of the technological complex with a total system efficiency of about 35%, which is significantly superior to the existing analogs.