

УДК 621.385.69

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГИРОТРОНА НА ТМ-МОДЕ ПРОДОЛЬНО-ЩЕЛЕВОГО РЕЗОНАТОРА

М. Н. Вилков¹, А. Н. Леонтьев¹, Р. М. Розенталь¹, В. П. Тараканов^{2,3}

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова 46, 603950

²Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва,
Каширское шоссе 31, 115409

³Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва ул. Ижорская 13 стр.2
125412

Статья поступила в редакцию 30 января 2019 г.

Аннотация. Выполнены расчеты сильноточного релятивистского гиротрона длинноволновой части миллиметрового диапазона на моде ТМ-типа. Для дискриминации мод ТЕ-типа в гиротроне использован резонатор, составленный из отдельных продольных металлических пластин со щелями между ними. В рамках трехмерного PIC-моделирования кодом KARAT продемонстрирована возможность селективного возбуждения моды ТМ_{5,1} винтовым электронным пучком с энергией частиц 500 кэВ и током 2 кА при выходной мощности более 230 МВт.

Ключевые слова: гиротрон, миллиметровое излучение, сильноточные релятивистские пучки.

Abstract. Pulse gyrotrons with relativistic helical electron beams, formed by explosive emission cathodes, are promising sources of electromagnetic radiation of the millimeter wavelength range with output power level in the hundreds of megawatts. However, an increase of the working current of the electron beam above a certain value, while maintaining the working cavity mode, leads to a significant decrease of gyrotrone efficiency due to the rebunching of electrons. Thus, the maximum power and maximum efficiency regimes in the gyrotron may not significantly overlap. The solution to this problem can be found in lowering the

coupling coefficient of the electron beam with the high-frequency field due to the use of transverse magnetic working mode.

In this paper calculation results for the Ka-band high-current relativistic gyrotron on TM-mode are presented. A cavity formed by separate longitudinal metal plates with slots between them was used to discriminate parasitic TE-modes in the gyrotron. It is shown that in a system of this type, compared to the traditional solid cavity, the TM-modes structure remains practically unchanged, while the TE-modes are radiated through the slots. The possibility of selective exciting of the TM_{51} mode with output power of more than 230 MW in such structure was demonstrated using the PIC-simulation with the 3D KARAT code.

Keywords: gyrotron, millimeter-wave radiation, high-current relativistic electron beams.

Введение

В настоящее время гиротроны являются наиболее мощными непрерывными источниками излучения миллиметрового диапазона длин волн [1]. При этом импульсные гиротроны, запитываемые релятивистскими винтовыми электронными потоками, формируемыми взрывоэмиссионными катодами, также являются перспективными источниками излучения с уровнями мощности в сотни мегаватт [2,3]. Вместе с тем повышение рабочего тока электронного пучка при сохранении неизменной рабочей моды резонатора приводит к значительному снижению КПД гиротронов [4]. Оценки оптимальных значений токов для реализации режимов генерации с предельным КПД [5] применительно к умеренно релятивистским энергиям пучка (~500 кэВ) лежат в диапазоне сотен ампер, что даже при самых благоприятных условиях энергообмена позволяет рассчитывать на выходную мощность лишь на уровне десятков мегаватт. Дальнейшее увеличение мощности возможно при увеличении тока до килоамперного уровня, однако КПД генератора при этом неизбежно снизится.

Увеличение тока и выходной мощности может быть достигнуто за счет увеличения индекса рабочей моды, в качестве которых традиционного выступают моды ТЕ-типа. Однако при этом практически неразрешимой становится задача селективного возбуждения рабочего колебания на временах в десятки наносекунд, соответствующих характерной длительности электронного пучка.

Другим вариантом повышения выходной мощности гиротрона, на который впервые было указано в работе [6], является переход на взаимодействие с модами ТМ типа, для которых коэффициент связи пучка с волной ниже, чем для ТЕ-мод [7-9]. В гиротронах с традиционными резонаторами, выполненными в виде отрезка круглого волновода, возбуждению ТМ-мод препятствуют моды ТЕ-типа, имеющее более высокий коэффициент связи с электронным пучком. Вариант сильноточного гиротрона на ТМ-моды был экспериментально реализован в работе [10], где для дискриминации ТЕ-мод использовался эшелеттный резонатор с коаксиальным внутренним стержнем.

В данной работе дискриминацию мод ТЕ-типа в гиротроне предлагается осуществить за счет использования резонатора, набранного из продольных пластин. По аналогии с задачей распространения волн в круглом волноводе с большим числом продольных щелей [11] можно ожидать, что при величине зазоров между пластинами много меньше рабочей длины волны такая структура для поперечно-магнитных волн будет мало отличаться от резонатора со сплошной металлической стенкой. В то же время поперечно-электрические волны будут эффективно излучаться во внешнее пространство. В результате, как будет показано ниже, добротность мод ТЕ-типа может быть снижена в десятки раз при сохранении добротности рабочей моды ТМ-типа. Эффективность подобного подхода применительно к мощным источникам СВЧ излучения была продемонстрирована в работе [12], где прорезание тонких щелей в резонаторе сильноточного релятивистского оротрона позволило исключить в экспериментах паразитное возбуждение на ТЕ-модах. Другим примером является использование продольно-щелевого гофрированного

волновода в качестве замедляющей системы релятивистской ЛОВ [13], электродинамическая система которой была образована отдельными продольными пластинами. Одновременно продольные сквозные щели на стенках выполняли функции абсорбера остаточных газов и пристеночной плазмы, способствуя улучшению электропрочностных характеристик генератора.

1. Расчет электродинамических характеристик резонаторов для сильноточного гиротрона

Для проведения расчетов были построены трехмерные модели гладкого и продольно-щелевого резонаторов гиротрона в симуляторе высокочастотных электродинамических систем ANSYS (Рис.1).

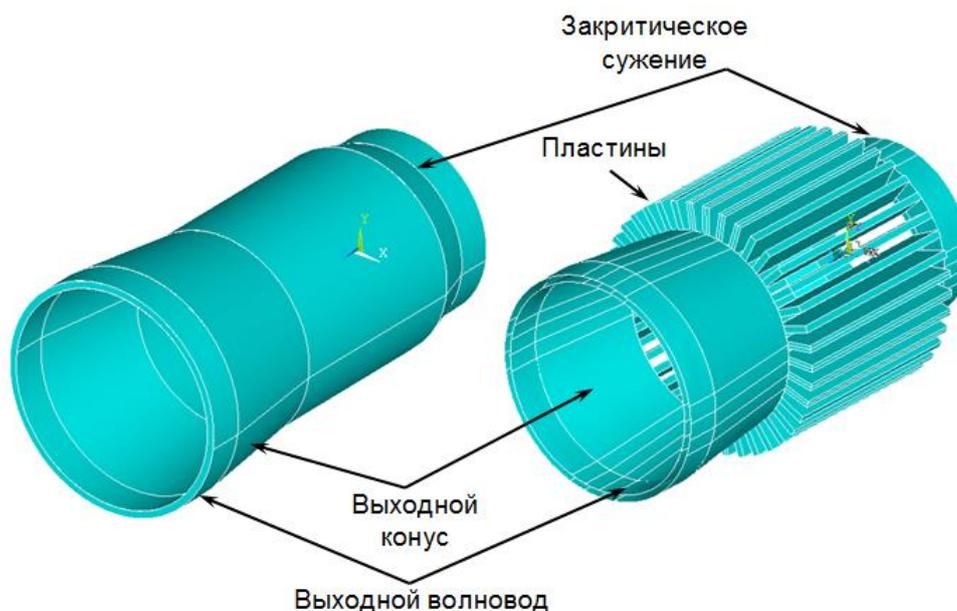


Рис. 1. Исследуемая модель гладкого (слева) и продольно-щелевого (справа) резонатора сильноточного гиротрона.

Во втором случае регулярный участок резонатора был образован набором продольных металлических пластин толщиной 1 мм, шириной 5 мм и длиной 28 мм, расположенных эквидистантно по азимутальному углу. Снаружи пластин располагался поглотитель в виде заостренных продольных ребер (на рисунке не показан). С катодного конца резонаторы сопрягались с

закритическим сужением с внутренним радиусом 11.5 мм, а с коллекторного конца – с выходным волноводом радиусом 16 мм. В расчете использовалось значение удельной проводимости металлических частей $1.45 \cdot 10^6$ См/м, соответствующее нержавеющей стали марки 12X18H10T. Расчетная сетка строилась из тетраэдральных элементов с характерной длиной ребра 1 мм. В областях щелей между пластинами и острых углов, образованных ребрами поглотителя, использовался встроенный алгоритм сгущения сетки.

Для определения минимально необходимого числа пластин на первом этапе исследовалась конфигурация, закрытая в продольном направлении металлическими поверхностями как с катодной, так и с коллекторной стороны. В качестве рабочей рассматривалась мода TM_{51} , собственная частота которой в гладком волноводе (~ 32 ГГц) близка к рабочей частоте разрабатываемого сильноточного гиротрона диапазона 30 ГГц [14].

Расчеты показали, что при числе пластин менее 20 добротность колебания стремительно уменьшается и при 15 пластинах составляет величину порядка нескольких единиц. В то же время при увеличении числа пластин свыше 25 добротность практически перестает меняться, достигая значений порядка 7000, что соответствует омической добротности исследуемого резонатора.

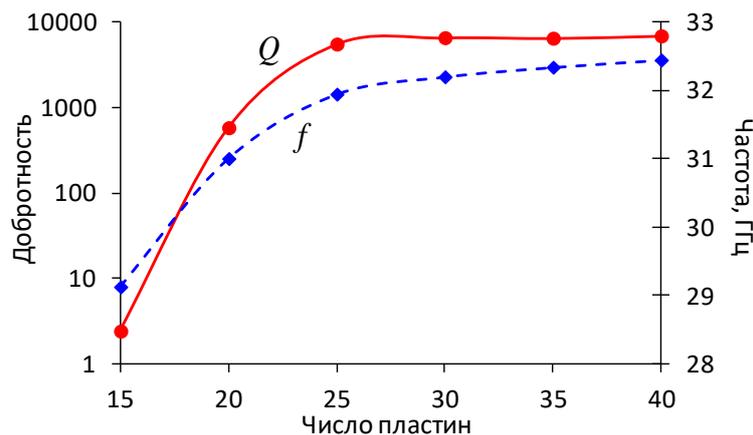


Рис. 2. Зависимость добротности (сплошная линия) и частоты (пунктир) моды TM_{51} в закрытом резонаторе от числа пластин.

На втором этапе были выполнены расчеты добротности колебаний мод TE_{42} и TM_{51} в резонаторе, ограниченном закритическим сужением с катодного конца

и выходным конусом с коллекторного конца. В классическом резонаторе гиротрона со сплошной стенкой дифракционную добротность мод с хорошей точностью можно вычислить по формуле [15-17]

$$Q \approx 8\pi \left(\frac{L}{\lambda_c} \right)^2, \quad (1)$$

где L – длина однородного участка резонатора, λ_c – критическая частота моды.

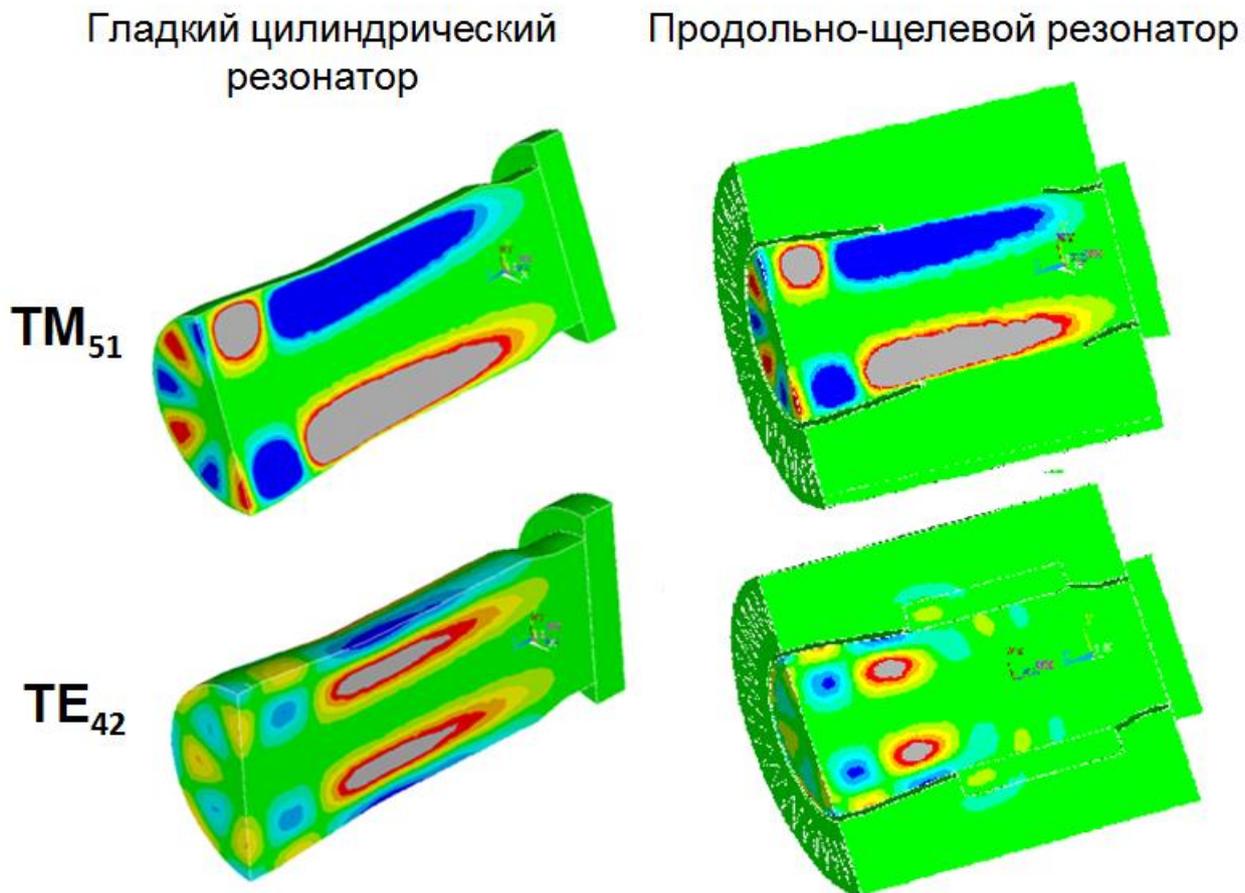


Рис. 3. Структура поля в гладком цилиндрическом резонаторе (левая колонка) и продольно-щелевом резонаторе (правая колонка) при возбуждении мод TM₅₁ и TE₄₂ (для TM и TE мод показаны продольные компоненты электрического и магнитного поля, соответственно).

В силу близости собственных частот мод TE₄₂ и TM₅₁ в гладкой системе их дифракционные добротности, рассчитанные по формуле (1), практически совпадают и составляют величину порядка 120. Как указывалось выше, замена гладкого участка цилиндрического волновода на продольно щелевую структуру

практически не изменяет свойства колебания ТМ-типа. С согласия с этим соображением, в продольно-щелевом резонаторе рассчитанная добротность моды TM_{51} составила порядка 140. Увеличение добротности по сравнению со случаем гладкого резонатора, очевидно, связано с наличием резкого перехода от пластин к выходному конусу, создающими дополнительные отражения рабочей волны. Вместе с тем добротность моды TE_{42} уменьшилась более чем на порядок по сравнению с гладким резонатором. Это подтверждается и структурой поля в исследуемых системах, представленных на Рис.3. Хорошо видно, что продольная и поперечная структуры для моды TM_{51} в гладком и продольно-щелевом резонаторе практически не отличаются друг от друга. При этом из-за значительного излучения моды TE_{42} через продольные щели ее поперечная структура заметно нарушается.

2. 3D PIC-моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия

Для сравнения эффективности взаимодействия винтового электронного пучка с модами поперечно-электрического и поперечно-магнитного типа было выполнено прямое численное моделирование методом крупных частиц с использованием трехмерной версии PIC-кода KARAT [18,19]. В моделировании винтовой электронный пучок с энергией 500 кэВ, током 2 кА, питч-фактором 1.0 и начальным разбросом по поперечным скоростям около 40% инжектировался в резонатор гиротрона с радиусом встраля, соответствующим максимуму коэффициента связи с рабочей модой. Первоначальные оценки, сделанные на основе известной теории [4], показывает, что возможное относительное изменение КПД гиротрона для случая взаимодействия с ТМ-модами по сравнению с ТЕ-модами может достигать 30%. Электронный импульс в моделировании задавался в форме трапеции с длительностью фронтов и “полочки” 5 и 10 нс, соответственно. После окончания взаимодействия электроны высаживались на стенку электродинамической системы за счет введения спадающего участка магнитного поля (Рис.4а). Для моделирования условий излучения на коллекторном конце пространства взаимодействия был размещен поглощающий слой с переменной

проводимостью, коэффициент отражения от которого не превышал 1% от мощности падающей волны.

Результаты моделирования показали, что в резонаторе с гладкой стенкой в диапазоне значений резонансного магнитного поля 18.7-20.3 кЭ происходит селективное возбуждение моды TE_{42} . Максимальная мощность излучения достигается на нижней границе магнитного поля и составляет величину около 200 МВт (Рис.5а). В свою очередь, в продольно-щелевом резонаторе в диапазоне магнитных полей 18.3-20 кЭ наблюдается селективное возбуждение моды TM_{51} с максимальной мощностью излучения более 230 МВт (Рис.5б).

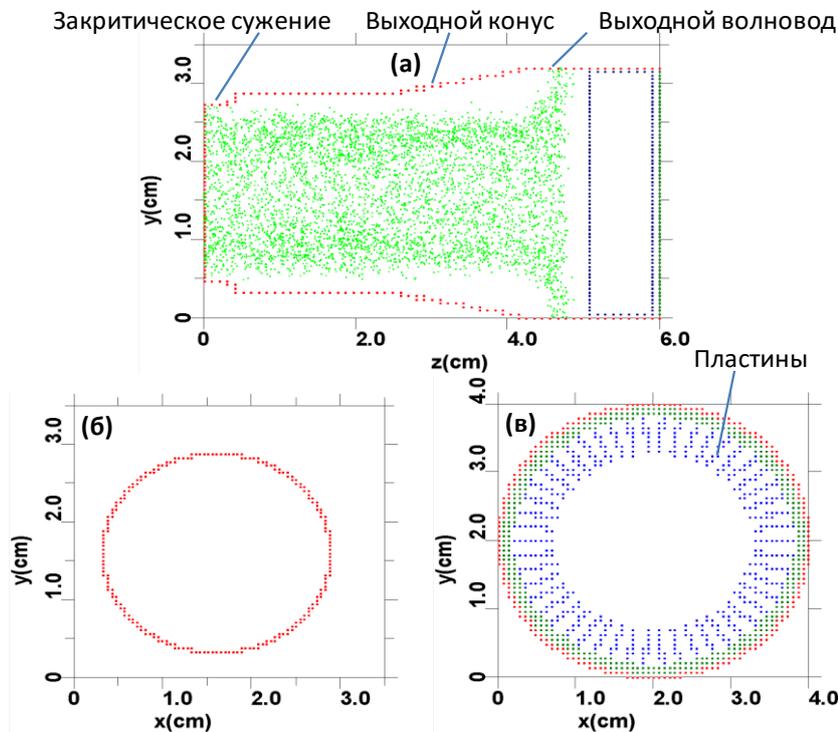


Рис. 4. Продольное сечение гладкого резонатора и мгновенное положение макрочастиц в РС-моделировании (а); поперечное сечение гладкого (б) и продольно-щелевого (в) резонаторов.

Меньшее значение выходной мощности, полученное в РС-моделировании, по всей видимости, связано с недостаточно хорошим согласованием резонатора, выполненного из пластин, и гладкого выходного конуса, приводящим к излишней добротности рабочего колебания. В дальнейшем планируется оптимизировать переход от резонатора к выходному конусу, что

позволит снизить добротность до минимальной дифракционной, определяемой выражением (1).

Заключение

Продольно-щелевые резонаторы представляют значительный интерес для применения в сильноточных гиротронах, поскольку позволяют уменьшить избыточно большой коэффициент связи электронного пучка с рабочей модой и тем самым повысить эффективность электронно-волнового энергообмена.

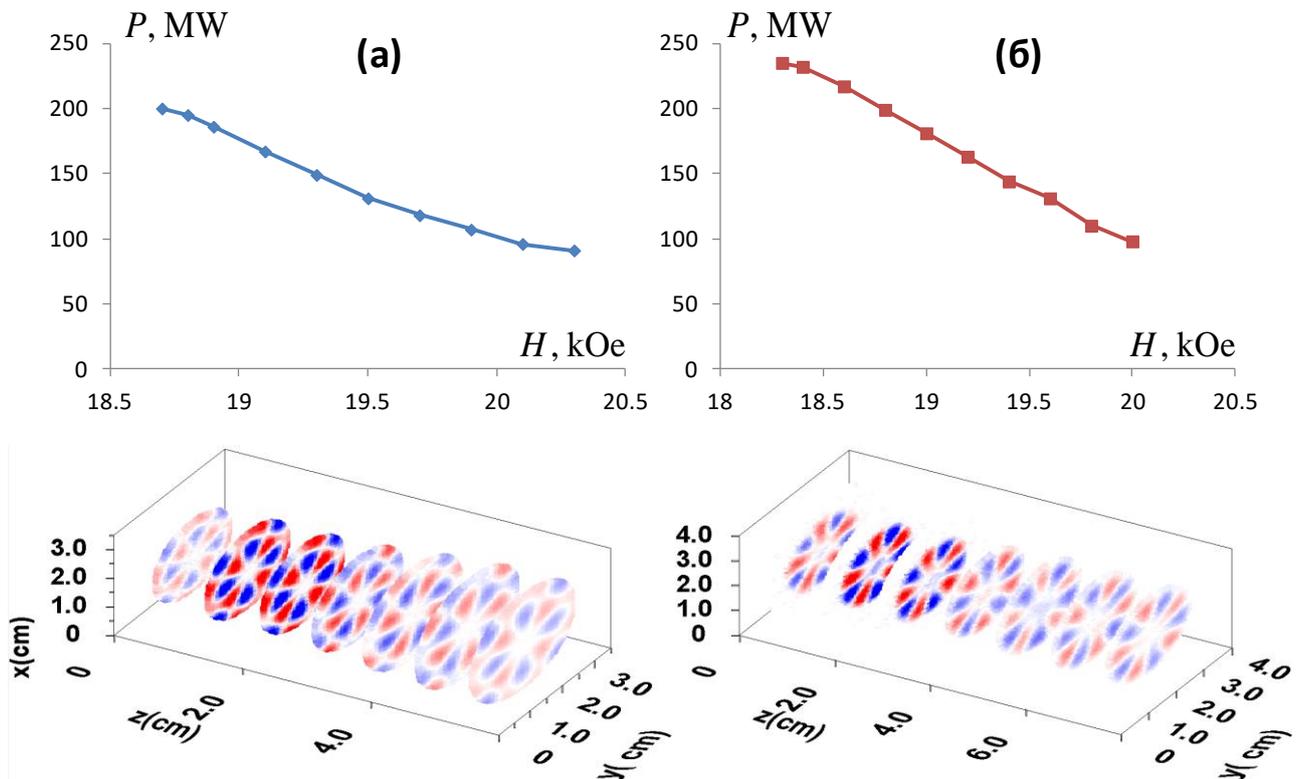


Рис. 5. Зависимости мощности излучения от магнитного поля (сверху) и структуры полей (снизу) для моды TE_{42} в гладком цилиндрическом резонаторе (а) и моды TM_{51} в продольно-щелевом резонаторе (б) (для ТМ и ТЕ мод показаны продольная компонента электрического и магнитного поля, соответственно).

Вместе с тем, данный вид наборных электродинамических систем может найти применение и в других усилительных и генераторных разновидностях мазеров на циклотронном резонансе, применительно к которым обсуждаются возможности работы на модах ТМ типа [20-24].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-38-00725.

Литература

1. Dhillon S.S., Vitiello M.S., Linfield E.H. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 50, No. 4, art.no. 043001, January 2017.
2. Black W.M., Gold S.H., Fliflet A.W., Kirkpatrick D.A., Manheimer W.M., Lee R.C., Granatstein V.L., Hardesty D.L., Kinkead A.K., and Sucey M. Megavolt, multikiloamp Ka band gyrotron oscillator experiment. *Phys. of Fluids B: Plasma Phys*, 1990, Vol. 2, Iss 1.
3. Radack D. J., Ramaswamy K., Destler W.W., and Rodgers J. A fundamental mode, high-power, large-orbit gyrotron using a rectangular interaction region. *J. Appl. Phys.* 1993, Vol. 73, Iss 12.
4. В.Л. Братман, М.И. Петелин. К вопросу об оптимизации параметров мощных гиromонотронов с нефиксированной структурой ВЧ поля // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1975, т. 18, №10, с. 1538-1543.
5. Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев. О достижении высокого КПД релятивистского гиротрона // // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2001, т. 44, №4, с. 345-352.
6. В.Л. Братман. Поперечно-магнитные моды в МЦР-монотроне // Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ. 1974, №7, с. 92-94.
7. Н.С. Гинзбург Н.С., Г.С. Нусинович. К нелинейной теории релятивистского гиротрона // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1979. Т. 22. №64. С.754.
8. Bratman V.L. et al. Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers. *Int. J. Electron.*, 1981, v.51, no.4, p.541-567.
9. Э.Б. Абубакиров. Возбуждение поперечно-магнитных волн и селекция мод в релятивистских МЦР // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 4. С. 492.
10. Ботвинник, В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, М.М. Офицеров. Релятивистские гиротроны с высокоселективными резонаторами на моды поперечно-магнитного типа // Письма в ЖТФ, 1984, т.10, вып.13, с. 792-796.

11. И.П. Котик, В.В. Мериакри, М.В. Персиков, А.Н. Сивов. Теоретический анализ и некоторые применения волноводов круглого сечения с продольными щелями // Радиотехника и электроника. 1965, т.10, №7, с. 1226-1232.
12. В.Л. Братман, В.П. Губанов, Г.Г. Денисов, С.Д. Коровин, С.Д. Полевин, В.В. Ростов, А.В. Сморгонский. Релятивистские оротроны – мощные источники когерентного миллиметрового излучения // Письма в ЖТФ. 1984, т. 10, вып.13, с. 807-811.
13. М.Б. Гойхман, В.В. Кладухин, С.В. Кладухин, Н.Ф. Ковалев, Н.Г. Колганов, С.П. Храмцов. Мощная релятивистская лампа обратной волны с продольно-щелевой электродинамической системой // Письма в ЖТФ. 2014, т. 40, вып. 2, с. 75-81.
14. Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, А.П. Конюшков и др. Разработка сильноточного гиротрона миллиметрового диапазона // Изв. РАН. Серия Физическая. 2018. Т. 82. №1. С. 56-60.
15. Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М., Петелин М.И., Рогачева Г.Г. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 1969. Т.12. №8. С.1236-1244.
16. В.Е. Запевалов, Ю.К. Калынов, А.Н. Куфтин, С.А. Малыгин, Е.М. Тай. Низкодобротные резонаторы для мощных гиротронов // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 1994. Т.37. №3. С.381-386.
17. Г.Г. Денисов, Н.И. Зайцев, С.В. Кузиков, М.Е. Плоткин. Повышение селективности резонаторов релятивистских гиротронов, работающих на осесимметричных модах // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т.51. №10. С.837-849.
18. Тараканов В.П. / В кн. "Математическое моделирование. Проблемы и результаты". М.: Наука, 2003. С. 456.
19. Tarakanov V. P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // *Proc. EPJ Web Conf.*, 2017, vol. 149, art.no. 04024.

20. Kalyanasundaram N., Saini J. On small-signal amplification of a TM circular cylindrical wave-guide mode in a gyro-TWT. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2013, Vol. 7, No. 8, pp. 644-655.
21. Chang T.H., Xu K.J. Gain and bandwidth of the TM-mode gyrotron amplifiers. *Physics of Plasmas*, 2018, 25, 112109.
22. Jiao C., Luo J. A Gyrotron Backward Wave Oscillator Operating in the TM₁₁ Mode with Large-Orbit Electron Beam. *2007 IEEE International Vacuum Electronics Conference, Kitakyushu*, 2007, pp. 1-2.
23. Sabchevski S., Idehara T. Cyclotron Autoresonance With TE and TM Guided Waves. *Int. J. IR&MM Waves*, 2005, Vol. 26, No. 5, p. 669-689.
24. Liu B.F., Zhang S.C. Nonlinear Simulation of a Cyclotron Autoresonance Maser (CARM) Operating in a Transverse Magnetic Mode. *J. IR MM THz Waves*, 2011, Vol. 32, Iss. 1, pp 8–15.

Для цитирования:

М. Н. Вилков, А. Н. Леонтьев, Р. М. Розенталь, В. П. Тараканов. Моделирование сильноточного релятивистского гиротрона на ТМ-моду продольно-щелевого резонатора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/6/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.6