УДК 621.385.69

ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ГИРОТРОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОД ТМ-ТИПА

© 2020 г. А. Н. Леонтьев^{1,} *, Э. Б. Абубакиров¹, В. И. Белоусов¹, Ю. М. Гузнов¹, Р. М. Розенталь¹, А. Э. Федотов¹, В. П. Тараканов^{2, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук", Нижний Новгород, Россия ²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Объединенный институт высоких температур Российской академии наук", Москва, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

> **E-mail: leontiev@ipfran.ru* Поступила в редакцию 29.07.2019 г. После доработки 30.08.2019 г. Принята к публикации 27.09.2019 г.

Рассматривается возможность освоения более высоких токов инжекции и повышения мощности выходного излучения сильноточных релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона длин волн за счет использования рабочих мод ТМ-типа. С помощью численного моделирования и экспериментальных тестов исследован продольно-щелевой резонатор, обеспечивающий дискриминацию паразитных мод ТЕ-типа. В рамках трехмерного моделирования методом крупных частиц показана возможность селективного возбуждения моды TM_{51} с выходной мощностью более 200 MBT и моды TM_{71} с мощностью более 300 MBT.

DOI: 10.31857/S0367676520010196

введение

Задача создания генераторов импульсного излучения субгигаваттного уровня мощности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов представляет значительный интерес для целого ряда приложений. Среди них можно отметить разработку перспективных схем лазеров на свободных электронах рентгеновского диапазона, в которых раскачка электронных сгустков происходит не в статическом поле последовательно расположенных постоянных магнитов, а в поле мощной СВЧ-волны (т. н. микроволновый ондулятор) [1]. Также следует отметить недавние экспериментальные исследования, где было показано, что в разряде, поддерживаемом мощным сфокусированным излучением субмиллиметрового диапазона с плотностью мощности 16 MBт · см⁻² в неоднородном потоке газа, возможно создание плазмы с концентрацией, существенно превышающей критическую [2], на основе чего могут быть созданы источники экстремального ультрафиолетового излучения [3]. В свою очередь повышение плотности плазмы неизбежно связано с использованием излучения с еще большими значениями плотности мощности.

82

В настоящее время гиротроны являются наиболее мощными непрерывными источниками излучения миллиметрового диапазона длин волн [4]. При этом для достижения уровня мощности в сотни мегаватт могут быть использованы импульсные гиротроны, запитываемые релятивистскими винтовыми электронными потоками, формируемыми взрывоэмиссионными катодами [5, 6]. Вместе с тем повышение рабочего тока электронного пучка при сохранении неизменной рабочей моды резонатора приводит к значительному снижению КПД гиротронов [7]. Оценки оптимальных значений токов для реализации режимов генерации с предельным КПД [8] 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 снижается.

Увеличение тока и выходной мощности может быть достигнуто за счет увеличения индекса рабочей моды, в качестве которых традиционного



Рис. 1. Трехмерная модель (*a*) и внешний вид изготовленного макета (*б*) продольно-щелевого резонатора сильноточного гиротрона.

выступают моды TE-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 [9], является переход на взаимодействие с модами TM-типа. Для резонатора круглого сечения коэффициент связи пучка с полем, определяющий величину эффективного тока для мод TE_{mp} и TM_{mp}, можно определить [9–11] как:

$$G_{TE} = \frac{J_{m-1}^{2} (\mathbf{v}_{mp} R_{b} / R_{0})}{(\mathbf{v}_{mp}^{2} - m^{2}) \cdot J_{m}^{2} (\mathbf{v}_{mp})},$$

$$G_{TM} = \frac{\beta_{\parallel}^{2} J_{m-1}^{2} (\mathbf{v}_{mp} R_{b} / R_{0})}{\mathbf{v}_{mp}^{2} \cdot J_{m}^{'2} (\mathbf{v}_{mp})},$$
(1)

где $v_{mp} - p$ -й корень уравнения $J_m(v) = 0$ для TE-

мод и уравнения $J'_m(v) = 0$ для ТМ-мод, R_b – радиус электронного пучка, R_0 – радиус резонатора, $\beta_{\parallel} = \upsilon_{\parallel}/c$ – нормированная на скорость света поступательная скорость электронов. В результате для электронного пучка с $\beta_{\parallel} \approx 0.6$ (что соответствует полной энергии 500 кэВ, и значению питчфактора $g = \beta_{\perp}/\beta_{\parallel} = 1$) максимальный коэффициент связи для моды ТМ₅₁ будет в 2.8 и 3.5 раза меньше, чем для соседних мод TE₄₂ и TE₇₁ соответственно. Однако важной проблемой при реализации гиротрона с рабочей модой ТМ-типа являются паразитные моды TE-типа, поскольку большая величина коэффициента связи означает меньшую величину стартового тока.

Дискриминацию мод ТЕ-типа в гиротроне можно осуществить за счет использования резонатора, набранного из продольных пластин [12]. По аналогии с задачей распространения волн в круглом волноводе с большим числом продольных щелей [13] 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. Эффективность подобного подхода применительно к мощным источникам СВЧ-излучения была продемонстрирована в работе [14], где прорезание тонких щелей в резонаторе сильноточного релятивистского оротрона позволило исключить в экспериментах паразитное возбуждение на ТЕ-модах. Другим примером является использование продольнощелевого гофрированного волновода в качестве замедляющей системы релятивистской ЛОВ [15], 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.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДОЛЬНО-ЩЕЛЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Для проведения расчетов была построена трехмерная модель резонатора в симуляторе высокочастотных электродинамических систем ANSYS (рис. 1*a*). Регулярный участок резонатора был образован набором продольных металлических пластин толщиной 1 мм, шириной 5 мм и длиной 28 мм, расположенных эквидистантно



Рис. 2. Расчетная (*a*) и экспериментальная (*б*) резонансные характеристики моды TM_{51} в продольнощелевом резонаторе.

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⁻¹, 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) находится в *К* α -диапазоне. 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, близких к омической добротности исследуемого резонатора.

На втором этапе был выполнен расчет добротности моды TM₅₁ в резонаторе, ограниченном закритическим сужением с катодного конца и выходным конусом с коллекторного конца. Для этого с катодного конца резонатор сопрягался с волноводом, в котором возбуждалась рабочая мода. Для этой системы снималась частотная зависимость коэффициента прохождения между входным и выходным сечениями. Добротность моды определялась по ширине резонансной кривой, она составила величину Q = 135 (рис. 2) при центральной частоте 32 ГГц.

Для экспериментального подтверждения результатов расчетов был изготовлен макет продольно-щелевого резонатора. Регулярная часть резонатора собрана из 31 пластины из нержавеющей стали толщиной 1 мм, изготовленной методом электроэрозионной обработки. Для равномерного позиционирования пластин по азимутальному углу использовали пластиковые "обоймы", изготовленные методом 3D-печати (рис. 16).

В ходе холодных испытаний с помощью панорамного измерителя ослабления фиксировалась характеристика резонатора при возбуждении его с помощью прямоугольного диэлектрического волновода с "катодного" конца. Для повышения эффективности приема сигнала на выходе резонатора был использован простейший козырьковый преобразователь рабочей волны в направленный волновой пучок [16, 17], использование которого позволяет локализовать выходное электромагнитное поле и значительно повысить его амплитуду в области приемника по сравнению с ненаправленным высвечиванием через простой открытый конец волновода, что значительно облегчает измерения характеристик резонатора

В результате измерений был найден резонансный максимум с центральной частотой 31.5 ГГц и добротностью Q = 134 (рис. 2). Отличие измеренной частоты моды от расчетного значения по всей видимости обусловлено неточностью позиционирования пластин при сборке.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО РІС-КОДА КАRAT

Для подтверждения возможности эффективной работы сильноточного гиротрона на модах поперечно-магнитного типа было выполнено прямое численное моделирование методом крупных частиц с использованием трехмерной версии РІС-кода KARAT. При 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 выстрела, соответствующим максимуму коэффициента связи с рабочей модой. Электронный импульс при 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. Для моделирования условий излучения на коллекторном конце пространства взаимодей-



Рис. 3. Результаты 3D PIC-моделирования: форма импульсов ускоряющего напряжения и выходной мощности (слева) и спектр излучения (справа) для случая возбуждения моды TM_{51} (*a*) и моды TM_{71} (*б*).

ствия был размещен поглощающий слой с переменной проводимостью, коэффициент отражения от которого не превышал 1% от мощности падающей волны.

При моделировании в диапазоне магнитных полей 18.3—20 кЭ наблюдалось селективное возбуждение моды TM_{51} с максимальной мощностью излучения более 230 МВт (рис. 3*a*). При дальнейшем увеличении магнитного поля последовательно возбуждались моды TM_{61} и TM_{71} . В последнем случае за счет увеличения рабочего тока до 3 кА удалось получить одночастотные режимы генерации с выходной мощностью более 300 МВт (рис. 3*b*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты численных расчетов и экспериментальных тестов подтверждают начальные предположения о селективных свойствах продольно-щелевых резонаторов и демонстрируют их применимость в сильноточных гиротронах с целью освоения больших токов инжекции и повышения мощности выходного излучения.

Принимая во внимание успешную реализацию электронно-оптической системы, способной формировать электронные пучки с энергией 500 кэВ, током до 2 кА, питч-фактором до 1.0 и приемлемым скоростным разбросом [18], полученные данные позволяют ожидать в ближайшем времени экспериментальную реализацию гиротрона Ка-диапазона с выходной мощностью около 300 МВт.

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 [19–21].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kukov S.V., Savilov A.V. // 43rd Int. Conf. on Infrared, Millim., and Terahertz Waves (Nagoya, 2018). P. 1.
- Водольянов А.В., Глявин М.Ю., Голубев С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 4. С. 10; Vodopyanov A.V., Glyavin M. Yu., Golubev S. V. et al. // Tech. Phys. Lett. 2017. V. 43. № 2. Р. 186.
- 3. Abramov I.S., Gospodchikov E.D., Shalashov A.G. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 10. Art. № 034065.
- Booske J., Paoloni C. // J. Phys. D. 2017. V. 50. № 4. Art. № 043001.
- Black W.M., Gold S.H., Fliflet A.W. et al. // Phys. Fluids B. 1990. V. 2. № 1. P. 193.
- Radack D.J., Ramaswamy K., Destler W.W., Rodgers J. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. № 12. P. 8139.
- 7. Братман В.Л., Петелин М.И. // Изв. вузов. Радиофиз. 1975. Т. 18. № 10. С. 1538; Bratman V.L., Pe-

telin M.I. // Radiophys. Quant. Electron. 1975. V. 18. No 10. P. 1136.

- Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. // Изв. вузов. Радиофиз. 2001. Т. 44. № 4. С. 345; Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Moiseev М.А. // Radiophys. Quant. Electron. 2001. V. 44. № 4. Р. 318.
- 9. *Братман В.Л.* // Электрон. техн. Сер. І. Электроника СВЧ. 1974. № 7. С. 92.
- 10. Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. // Изв. вузов. Радиофиз. 1979. Т. 22. № 64. С.754; Ginzburg N.S., Nusinovich G.S. // Radiophys. Quant. Electron. 1979. V. 22. № 6. Р. 522.
- 11. Абубакиров Э.Б. // Изв. вузов. Радиофиз. 1983. Т. 26. № 4. С. 492; Abubakirov E.B. // Radiophys. Quant. Electron. 1983. V. 26. № 4. Р. 492.
- Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 56; Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Konyushkov A.P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 1. P. 48.
- Котик И.П., Мериакри В.В., Персиков М.В., Сивов А.Н. // Радиотехн. и электрон. 1965. Т. 10. № 7. С. 1226.

- 14. Братман В.Л., Губанов В.П., Денисов Г.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 13. С. 807; Bratman V.L., Gubanov V.P., Denisov G.G. et al. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1984. V. 10. P. 807.
- 15. Гойхман М.Б., Кладухин В.В., Кладухин С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 2. С. 75; Goykhman M.B., Kladukhin V.V., Kladukhin S.V. et al. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. № 1. Р. 84.
- Власов С.Н., Орлова И.М. // Изв. вузов. Радиофиз. 1974. Т. 17. № 1. С. 148; Vlasov S.N., Orlova I.M. // Radiophys. Quant. Electron. 1974. V. 17. № 1. Р. 115.
- 17. Власов С.Н., Загрядская Л.И., Петелин М.И. // Радиотехн. и электрон. 1975. Т. 20. № 10. С. 2026; Vlasov S.N., Zagryadskaya L.I., Petelin M.I. // Radio Eng. Electron. Phys. 1975. V. 20. Р. 14.
- 18. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fedotov A.E. et al. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. Art. № 033302.
- 19. *Liu B.F., Zhang S.C.* // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. V. 32. № 1. P. 8.
- 20. Kalyanasundaram N., Saini J. // IET Microwaves. Antennas. Propagation. 2013. V. 7. № 8. P. 644.
- 21. Chang T.H., Xu K.J. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. Art. № 112109.