

УДК 621.385.69

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ДВУХЛУЧЕВОМ ТЕРАГЕРЦОВОМ ГИРОТРОНЕ

*М. Ю. Глявин, В. Ю. Заславский, И. В. Зотова, В. Н. Мануилов, А. П. Фокин**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена теоретическому исследованию возможностей двухступенчатой рекуперации энергии в двухпучковом терагерцовом гиротроне. Численное моделирование, выполненное для гиротрона с частотой излучения 0,78 ТГц, работающего на второй гармонике циклотронной частоты на моде $TE_{8,5}$, показывает возможность пространственного и энергетического разделения электронных пучков, что позволяет реализовать двухступенчатую систему рекуперации. Полученные энергетические спектры электронов предполагают увеличение коэффициента полезного действия гиротрона в $3,5 \div 4$ раза.

ВВЕДЕНИЕ

Создание источников непрерывного субтерагерцового и терагерцового излучения с мощностью от нескольких до сотни ватт во многом определяет потенциальные возможности таких современных областей науки и техники, как спектроскопия [1], медицина [2], терагерцовое видение [3] и целого ряда других. Одними из наиболее мощных источников излучения в этом частотном диапазоне являются гиротроны [4–6], из которых самыми интересными для практического применения являются гиротроны, работающие в непрерывном режиме на второй или третьей гармонике циклотронной частоты. Такие приборы позволяют получать мощности, на несколько порядков превышающие возможности классических вакуумных электронных приборов (например, ламп бегущей волны), при этом оставаясь относительно компактными и недорогими устройствами (по сравнению с лазерами на свободных электронах, обеспечивающими аналогичные средние мощности). Ещё более привлекательными их делают последние успехи в стабилизации частоты излучения [7] и возможности её широкополосной перестройки с сохранением уровня мощности [8].

Основным недостатком таких высокочастотных гиротронов остаётся относительно низкий коэффициент полезного действия (КПД), как правило не превышающий нескольких процентов [9]. Эффективность терагерцовых гиротронов ограничивается, во-первых, большими омическими потерями в стенках резонатора и, во-вторых, сильной конкуренцией мод, лимитирующей рабочий ток и достижимую эффективность электронно-волнового взаимодействия. Одним из подходов к повышению полного КПД системы, успешно применяемым в мощных гиротронах на меньших частотах, особенно в гиротронах мегаваттного уровня мощности для установок управляемого термоядерного синтеза, является использование системы рекуперации остаточной энергии электронного пучка [10, 11]. Простые системы рекуперации с одной ступенью позволяют увеличить КПД мощных гиротронов в 1,5 раза [12], а двухступенчатые — до 2 раз [13].

Принципиальной сложностью двухступенчатых схем в классических гиротронах является необходимость пространственного разделения пучка на энергетические фракции и последующего торможения и осадки указанных фракций на разные ступени коллектора с пониженным относительно резонатора потенциалом. Существует несколько различных схем указанной пространственной сепарации, однако все они весьма сложны в техническом исполнении и часто не

* ap.fokin@mail.ru

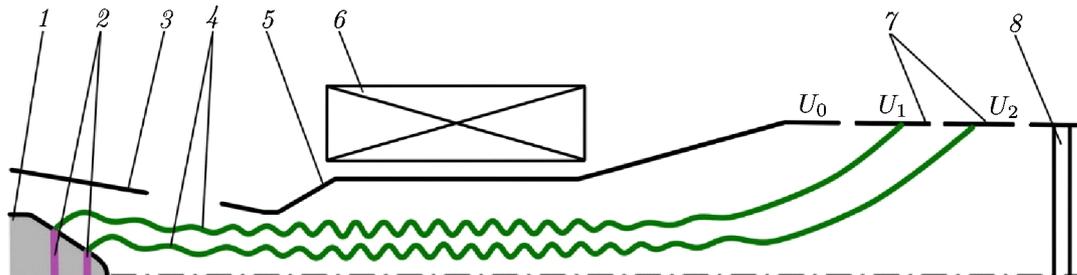


Рис. 1. Общая схема двухлучевого гиротрона с двухступенчатой рекуперацией: 1 — катод, 2 — эмиттеры, 3 — анод, 4 — электронные пучки, 5 — резонатор, 6 — магнит, 7 — коллектор и 8 — выходное окно; U_0 — потенциал резонатора гиротрона, U_1 и U_2 — потенциалы первой и второй ступеней системы рекуперации

обеспечивают приемлемого уровня разделения, что снижает КПД до величин, типичных для одноступенчатой схемы. Более того, применение таких схем в терагерцовых гиротронах дополнительно затруднено малыми размерами всех элементов прибора и сильным ведущим магнитным полем криомагнита.

Решением обеих проблем — и низкого КПД из-за конкуренции мод, и сложностей с созданием многоступенчатых систем рекуперации для гиротронов терагерцового диапазона — могут стать многолучевые системы [14]. Селективные свойства нескольких электронных пучков позволяют увеличить рабочий ток и мощность источников [15], а естественная сепарация двух пучков в пространстве (когда уже изначально, начиная от катода, имеется два отдельных пучка) делает схему двухступенчатой рекуперации более привлекательной, чем для классического однолучевого гиротрона.

В данной статье представлены результаты исследования возможностей многоступенчатой рекуперации энергии в двухлучевых гиротронах на примере разработанного в ИПФ РАН совместно с Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui (FIR-UF, г. Фукуи, Япония) двухлучевого гиротрона с непрерывным режимом работы на частоте 0,78 ТГц [16].

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ДВУХЛУЧЕВОМ ТЕРАГЕРЦОВОМ ГИРОТРОНЕ

В использованном в качестве примера терагерцовом гиротроне была применена хорошо зарекомендовавшая себя в низкочастотной области [17] схема с двумя генерирующими электронными пучками. Разборный вариант лампы с прямым выводом энергии был создан на основе сухого криомагнита Jastec JM15T52 с максимальным магнитным полем 15 Тл и тёплым отверстием диаметра 52 мм. Принципиальная схема созданного гиротрона приведена на рис. 1. Исходя из выбора в качестве рабочей моды $TE_{8,5}$ на второй гармонике циклотронной частоты и современных технологических возможностей, были определены параметры резонатора: диаметр 3 мм при длине однородного участка 12 мм. Для генерации на частоте 0,78 ТГц расчётное ведущее магнитное поле равно 14,5 Тл, ускоряющее напряжение 20 кВ, а полный ток 2 А за счёт применения схемы с двумя пучками [18]. Средние радиусы ведущих центров электронных пучков в резонаторе равны $R_1 = 0,45$ мм и $R_2 = 0,717$ мм. Для максимизации селективных свойств двухлучевой схемы на основе результатов численного моделирования доля тока внешнего пучка I_{out} была выбрана равной $I_{out}/I_{tot} = 0,66$, где I_{tot} — полный ток [15].

Выбор оптимального положения электронных пучков в резонаторе гиротрона обусловлен дву-

мя факторами. С одной стороны, в схеме с двумя генерирующими пучками внешний пучок обычно имеет большую мощность (большой ток) за счёт большей площади эмитирующей поверхности. С другой стороны, электронные пучки обычно инжектируются в резонатор в максимумы поля рабочей моды при сохранении минимально возможной связи с конкурирующими модами. При этом структура электромагнитного поля в резонаторе такова, что первый радиальный максимум поля всегда больше последующих, т. е. более удалённых от оси прибора: коэффициент связи пучка с волной [19] равен

$$G_{m,p} = \frac{J_{m-n}^2(\nu_{m,p} R_b/R)}{(\nu_{m,p}^2 - m^2) J_m^2(\nu_{m,p})},$$

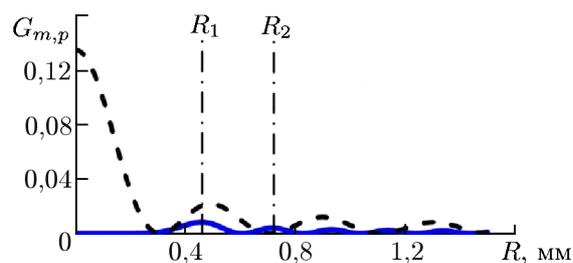
где $J_m(\xi)$ — функция Бесселя m -го порядка, $\nu_{m,p}$ — корень уравнения $J'_m(\nu_{m,p}) = 0$, соответствующий рассматриваемой моде $TE_{m,p}$, R_b — радиус электронного пучка, R — радиус однородного участка резонатора. Коэффициенты связи для рабочей моды $TE_{8,5}$ и основной конкурирующей моды $TE_{1,4}$ на основном циклотронном резонансе приведены на рис. 2.

В ходе разработки гиротрона применялся традиционный подход, когда оптимизация условий взаимодействия (т. е. выбор положений электронных пучков, профиля резонатора, величины рабочего магнитного поля для максимизации КПД) выполнялась для внутреннего пучка (с меньшим радиусом ведущих центров) как обладающего наибольшей связью с рабочим типом колебаний. Результаты численных расчётов энергетических спектров, выполненных с помощью пакета CST Studio Suite методом крупных частиц, для модели существующего гиротрона представлены на рис. 3. Из них следует, что минимальная энергия внутреннего пучка после взаимодействия с высокочастотным полем оказывается меньше минимальной энергии электронов во внешнем пучке. При таком соотношении минимальных энергий дальнейшее торможение внутреннего пучка по отношению к внешнему неосуществимо из-за отражения внутреннего пучка от электростатического зеркала. Это делает невозможным применение двухступенчатой рекуперации при традиционном методе разработки двухлучевых гиротронов, т. к. в силу пространственного положения первым тормозить и осаждать на первую ступень коллектора необходимо внешний пучок.

2. ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

Следует отметить, что при традиционном подходе к разработке двухлучевых гиротронов возможности простых одноступенчатых систем рекуперации энергии весьма велики. Вследствие невысокого электронного КПД η_e , типичного для субмиллиметровых гиротронов (порядка 10%), минимальная энергия электронов в пучках составляет $W_{\min} \sim 0,7W_0$. Поэтому, как легко оценить, даже при одноступенчатой рекуперации оба пучка можно затормозить на практически 2/3 исходной кинетической энергии W_0 . Тем самым полный КПД $\eta_r = \eta_e(U_0/U_r)$, где U_0 — ускоряющее напряжение, U_r — потенциал коллектора, может быть увеличен до 3 раз [20]. Поскольку для субмиллиметровых гиротронов очень велика величина омических потерь $P_\Omega/P_{\text{rad}} = Q_d/Q_\Omega$, где Q_d — дифракционная добротность,

$$Q_\Omega = \frac{R}{\delta_{\text{skin}}} \left(1 - \frac{m^2}{\nu_{m,p}^2} \right)$$



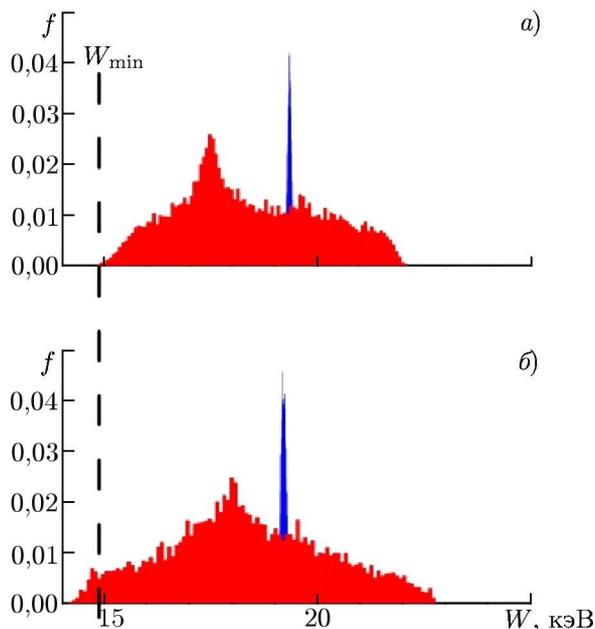


Рис. 3. Энергетические спектры $f(W)$ внешнего (а) и внутреннего (б) пучков на входе в резонатор ($Z = 0$ мм, синий цвет) и после взаимодействия с полем рабочей моды ($Z = 12$ мм, красный цвет). Штриховой линией отмечена минимальная энергия частиц W_{\min} во внешнем электронном пучке

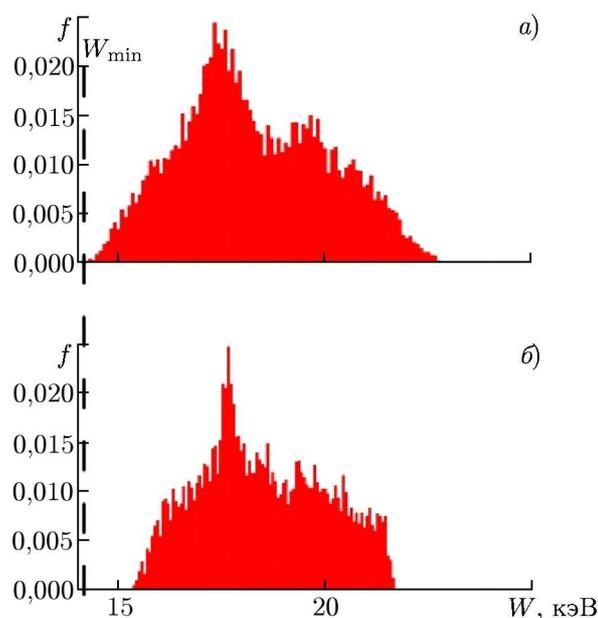


Рис. 4. Энергетические спектры внешнего (а) и внутреннего (б) пучков после взаимодействия при изменённом радиусе ведущих центров внутреннего пучка. Штриховой линией отмечена минимальная энергия частиц во внешнем электронном пучке

— омическая добротность, P_{rad} — мощность излучения, δ_{skin} — толщина скин-слоя, то выходной КПД без рекуперации составляет всего 1%. Это означает, что уже за счёт одноступенчатой рекуперации КПД может быть увеличен до уровня 3%. Важным является также возможность резко (в 3 раза) снизить тепловую нагрузку коллектора. Без рекуперации на коллекторе рассеивается мощность порядка 18 кВт, а при использовании даже одноступенчатой рекуперации она может быть уменьшена до 6 кВт. Это существенно снижает тепловую нагрузку на его поверхность и позволяет использовать коллектор малого диаметра в непрерывном режиме. Оценки, проведённые по методике, описанной в [11], показывают, что при радиусе коллектора 20 мм и допустимой средней плотности мощности $0,4 \text{ кВт/см}^2$ суммарная длина двух следов парциальных пучков не должна превышать 15 мм. Данное требование может быть выполнено даже в обычном адиабатическом коллекторе со статическим магнитным полем. Это упрощает проектирование и техническую реализацию двухлучевого гиротрона с системой рекуперации, т. к. позволяет вставить гиротрон в криомагнит с тёплым отверстием диаметра 52 мм коллекторным концом.

Новые возможности по применению двухступенчатых схем открываются при изменении подхода к оптимизации гиротрона. Указанное выше соотношение между минимальными энергиями электронов в различных пучках не является универсальным и может быть изменено. Для этого оптимизация условий взаимодействия должна проводиться для внешнего пучка (особенно принимая во внимание его больший достижимый ток), а внутренний пучок должен способствовать дополнительной селекции колебаний. При этом последний может быть либо смещён относительно максимума связи с волной, либо длина резонатора может быть не оптимальна. Тогда внутренний пучок оказывается либо недогруппированным (электроны ещё не успели выйти из тормозящей фазы поля и отдали не всю энергию, которую могли бы отдать), либо перегруппированным (электронный сгусток уже переместился в ускоряющую фазу поля, т. е. уже начал забирать обратно

энергию электромагнитного поля), что приводит к увеличению минимальной энергии частиц во внутреннем пучке. Таким образом, энергетические спектры внутреннего и внешнего пучков могут быть смещены друг относительно друга в нужную сторону.

Для демонстрации принципиальной возможности сдвига энергетических спектров электронов был проведён расчёт двухлучевого гиротрона, в котором радиус внутреннего пучка был уменьшен до $R_1 = 0,35$ мм при сохранении всех остальных параметров. Как видно из полученных спектров, представленных на рис. 4, изменение положения внутреннего пучка позволяет реализовать двухступенчатую схему рекуперации, при этом электронный КПД внутреннего пучка η_e^{int} уменьшается с 5,1% до 3,7%, а электронный КПД внешнего пучка η_e^{ext} остаётся равен 5,5%. Суммарный электронный КПД для данного случая уменьшается на 0,5%, однако конечная эффективность гиротрона будет зависеть от возможностей системы рекуперации энергии.

Эффективность гиротрона с многоступенчатой системой рекуперации рассчитывается по формуле

$$\eta_r = \eta_e \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^N \chi_i (1 - U_i/U_0)},$$

где χ_i — доля тока, осаждаемого на i -ую ступень коллектора с потенциалом U_i , и зависит от величины взаимного смещения спектров. В рассмотренном примере двухлучевого гиротрона с рабочей частотой 0,78 ТГц система рекуперации с одной ступенью позволяет увеличить КПД в 3,3 раза, в то время как двухступенчатая схема (см. рис. 5), в которой потенциал первой ступени равен $U_1 = 5,8$ кВ, а второй $U_2 = 4,3$ кВ, позволяет поднять КПД в 3,85 раз при сохранении уровня мощности выходного излучения. Расчёты плотности мощности осаждаемых электронных пучков для такой схемы дают средние величины до 0,4 кВт/см² для первой ступени рекуперации и до 0,2 кВт/см² для второй ступени при радиусе коллектора 20 мм, что удовлетворяет современным возможностям систем охлаждения в непрерывном режиме.

Даже такой демонстрационный пример, в котором было изменено лишь положение одного электронного пучка, показывает перспективность модифицированного подхода к проектированию двухлучевых субтерагерцовых гиротронов, основанного на оптимизации условий взаимодействия пучков с полем с учётом дальнейшей рекуперации их энергий.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для двухлучевого гиротрона с частотой генерации 0,78 ТГц, работающего на второй гармонике циклотронной частоты на моде TE_{8,5}, найдены энергетические спектры электронов двух излучающих пучков. Исходя из полученных спектров, сделаны оценки эффективности систем рекуперации остаточной энергии электронного пучка с одной и двумя ступенями. Для традиционной методики оптимизации параметров электронно-волнового взаимодействия показана возможность использования только одноступенчатой схемы рекуперации. Для гиротрона с изменённым положением ведущих центров внутреннего электронного пучка или увеличенной длиной резонатора возможно использование двухступенчатой рекуперации и дальнейшее увеличение КПД. В частности, в рассмотренном примере двухлучевого гиротрона со смещённым положением ведущих центров за счёт применения двухступенчатой системы рекуперации удастся увеличить КПД прибора в 3,8 раза. Таким образом, в субмиллиметровых двухлучевых гиротронах при использовании на этапе проектирования модифицированного подхода к оптимизации параметров

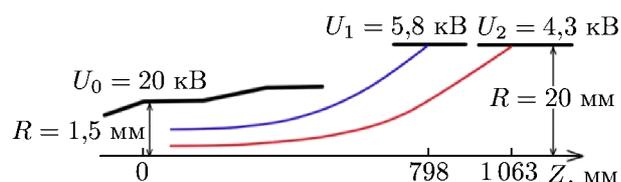


Рис. 5. Схема двухступенчатой системы рекуперации энергии для двухлучевого гиротрона с рабочей частотой 0,78 ТГц

электронно-волнового взаимодействия, учитывающего возможности многоступенчатой рекуперации, возможно увеличение КПД в несколько раз.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-32-00132-мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghann W., Uddin J. // Terahertz (THz) Spectroscopy: A Cutting-Edge Technology / ed. by J. Uddin. Rijeka: Intech, 2017. P. 3.
2. Sun Q., He Y., Liu K., et al. // Quant. Imaging Med. Surg. 2017. V. 7, No. 3. P. 345.
3. Luukanen A., Appleby R., Kemp M., Salmon N. // Terahertz Spectroscopy and Imaging. Springer Series in Optical Sciences. Berlin: Springer, 2012. P. 491.
4. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2014. V. 35, No. 4. P. 325.
5. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 8. С. 745.
6. Kumar N., Singh U., Bera A., Sinha A. K. // Infrared Phys. Technol. 2016. V. 76. P. 38.
7. Fokin A., Glyavin M., Golubiatnikov G., et al. // Sci. Rep. 2018. V. 8, No. 1. P. 4317.
8. Fedotov A. E., Rozental R. M., Zotova I. V., et al. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2018. V. 39, No. 10. P. 975.
9. Bratman V. L., Bogdashov A. A., Denisov G. G., et al. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2012. V. 33, No. 7. P. 715.
10. Read M. E., Lawson W. G., Dudas A. J., Singh A. // IEEE Trans. Electron Devices. 1990. V. 37, No. 6. P. 1579.
11. Manuilov V. N., Morozkin M. V., Luksha O. I., Glyavin M. Y. // Infrared Phys. Technol. 2018. V. 91. P. 46.
12. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73, No. 26. P. 3532.
13. Thumm M. K., Piosczyk B., Ling G. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 606.
14. Запевалов В. Е., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, № 11. С. 1288.
15. Manuilov V. N., Glyavin M. Y., Sedov A. S., et al. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2015. V. 36, No. 12. P. 1164.
16. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88, No. 9. Art. no. 094708.
17. Запевалов В. Е., Мануилов В. Н., Мальгин О. В., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 3. С. 387.
18. Ginzburg N. S., Glyavin M. Y., Malkin A. M., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44, No. 8. P. 1303.
19. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. 335 p.
20. Goldenberg A. L., Manuilov V. N., Moiseev M. A., Zavolsky N. A. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. V. 18, No. 1. P. 43.

Поступила в редакцию 22 марта 2019 г.; принята в печать 31 мая 2019 г.

**ENERGY SPECTRA OF ELECTRON BEAMS AND THE POSSIBILITY
OF DOUBLE-STAGE ENERGY RECUPERATION IN A DOUBLE-BEAM
TERAHERTZ GYROTRON**

M. Yu. Glyavin, V. Yu. Zaslavsky, I. V. Zotova, V. N. Manuilov, and A. P. Fokin

We study theoretically the possibilities of double-stage energy recuperation in a double-beam terahertz gyrotron. Numerical modeling, which was performed for a gyrotron producing radiation with a frequency of 0.78 THz and operating at the second cyclotron-frequency harmonic at the $TE_{8,5}$ mode, demonstrates the possibility of spatial and energy separation of electron beams. This makes it possible to implement a double-stage recuperation scheme. The found energy spectra of electrons suggest an increase in the gyrotron efficiency by 3.5–4 times.