

Разработка ЭЦР ректенн миллиметрового диапазона с высокой мощностью принимаемого излучения

Г.Г. Денисов, И.В. Зотова, И.В. Железнов, Р.М. Розенталь, С.В. Самсонов, В.Н. Мануилов, А.С. Сергеев, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: представлены результаты теоретических исследований возможности создания систем беспроводной передачи энергии мегаваттного уровня мощности на базе приборов, основанных на принципе резонансного взаимодействия электронного потока, движущегося в магнитном поле, с одной из собственных мод сверхразмерного цилиндрического резонатора - гиротронов. В этом случае традиционный гиротрон используется как источник излучения, а ректенной служит прибор с первоначально прямолинейным электронным потоком, в котором энергия электромагнитной волны переходит в энергию вращательного движения электронов, что можно условно назвать «обращенным гиротроном». Использование таких систем приводит к существенному изменению конструкции ректенны по сравнению с низкочастотными аналогами. В частности, ввод микроволнового излучения в может осуществляться с коллекторной части прибора с использованием оригинальных двунаправленных квазиоптических преобразователей излучения. Преобразование накопленной вследствие поглощения поступающего излучения поперечной энергии частиц в продольную происходит в адиабатически спадающем магнитном поле. При этом может достигаться практически полное преобразование, что обеспечивает высокий КПД прибора при мегаваттной мощности поступающего излучения.

Ключевые слова: гиротрон, мощность, частота генерации, ректенна, квазиоптический преобразователь, передача энергии

1. Введение

В данной работе представлены результаты, полученные в ходе выполнения проекта РФФИ «Принципы построения сверхмощных субтерагерцовых комплексов». Проведен теоретический анализ возможности реализации нового типа электронно-циклотронных преобразователей СВЧ излучения в постоянный ток (ЭЦР ректенн), отличающихся высокой частотой и мощностью принимаемого излучения. Предполагается продвижение таких устройств в коротковолновую часть миллиметрового диапазона с уровнем мощности до 1 МВт. Повышение частоты позволит существенно увеличить направленность волновых пучков и дальность передачи энергии. Для этих целей предложено использовать ряд подходов, апробированных ранее при создании мощных гиротронов для плазменных приложений [1,2]. Основным отличием от существующих длинноволновых приборов этого класса с низким уровнем мощности [3,4] является использование взаимодействия трубчатого электронного пучка большого радиуса с развитой модой сверхразмерного резонатора, тогда как ранее в ЭЦР ректеннах использовались приосевые тонкие электронные пучки (в виде одной тонкой струи), поглощающие излучение в резонаторах с размерами порядка длины волны. Фактически, разрабатываемый класс ЭЦР ректенн представляет собой «обращенный гиротрон», поскольку используется циклотронно-резонансное поглощение излучения изначально прямолинейными «многоструйными» электронными пучками, тогда как в гиротронах реализуется генерация излучения электронами, вращающимися в однородном магнитном поле. Таким образом, важным отличием от гиротронов является отсутствие

разброса электронов по начальным фазам циклотронного вращения на влете в пространство взаимодействия, в результате чего все электроны трубчатого «многоструйного» пучка одинаково взаимодействуют с электромагнитным полем, что обеспечивает высокую эффективность поглощения поступающего излучения, а также упрощает дальнейшее преобразование энергии частиц в энергию постоянного тока. Отличия могут возникать из-за начального позиционного разброса и/или наличия малой начальной закрутки, что выдвигает определенные требования к формированию электронных пучков для ЭЦР ректенн.

Использование систем типа «обращенный гиротрон» приводит к существенному изменению конструкции ректенны. В частности, запитка внешним сигналом может осуществляться с коллекторной части прибора с использованием новых двунаправленных квазиоптических преобразователей [5], которые применялись для захвата мощного гиротрона внешним сигналом [6-9]. Еще одно отличие связано с системой преобразования накопленной (вследствие поглощения поступающего излучения) поперечной энергии частиц в продольную в адиабатически спадающем магнитном поле (а не в системе с каспом, как это было ранее), что широко используется в коллекторных системах мощных гиротронов. При этом может достигаться практически полное преобразование, что обеспечивает высокий КПД системы.

2. Оценки эффективности ректенны W диапазона

В данном разделе представлен расчет циклотронной ректенны с рабочей частотой ~ 95 ГГц и принимаемой мощностью 1 МВт, что представляет интерес для создания систем дистанционной передачи энергии в соответствующем окне прозрачности атмосферы. Численное моделирование выполнено как на основе специально разработанных моделей электронно-волнового взаимодействия, использующих усредненный подход [9], так и с использованием PIC-кода KARAT [10,11].

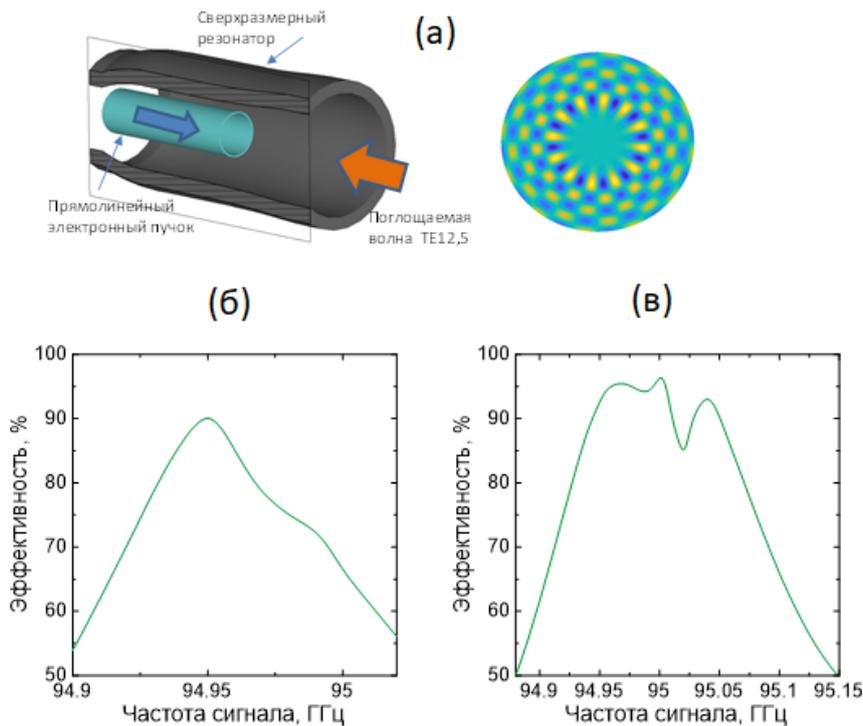


Рисунок 1. (а) Вид резонатора мегаваттной ЭЦР ректенны с рабочей модой $TE_{12,5}$. (б) Расчетная зависимость КПД ректенны от частоты подаваемого сигнала для токов 10 А (слева) и 20 А (справа). Результаты получены в рамках усредненной модели.

На основе усредненного подхода проведена оптимизация параметров резонатора ректенны и запитывающего прямолинейного электронного пучка при взаимодействии с рабочей модой $TE_{12,5}$. На Рис.1а приведена схема резонатора ректенны (слева) и поперечная структура моды $TE_{12,5}$ (справа). Полный КПД ректенны определялся как произведение КПД в трех основных секциях прибора [3], а именно – секции электронно-волнового взаимодействия, секции преобразования накопленной поперечной энергии частиц в продольную и секции рекуперации. В расчетах была принята во внимание неидеальность электронного пучка, проявляющаяся в наличии позиционного разброса и ненулевого (порядка 0.1) начального питч-фактора. На Рис.1б-в приведены расчеты КПД ректенны в зависимости от частоты подаваемого сигнала. Получено, что при токе 10 А максимальный КПД ректенны может составлять свыше 80% при длине резонатора 25 мм, а при токе 20 А – свыше 90% при длине резонатора 21 мм.

Полученные в рамках усредненного подхода результаты были подтверждены моделированием с использованием метода крупных частиц на базе PIC-кода KARAT. С целью уменьшения времени расчетов была использована аксиально-симметричная версия кода. В качестве рабочей была выбрана мода $TE_{0,7}$, которая имеет близкий к моде $TE_{12,5}$ коэффициент связи с электронным пучком. В моделировании прямолинейный электронный пучок с энергией 50 кэВ и током 10 - 20 А инжектировался с правой границы расчетной области, тогда как внешний сигнал поступал с левой границы (Рис.2а). Длина однородного участка резонатора составляла 20.2 мм.

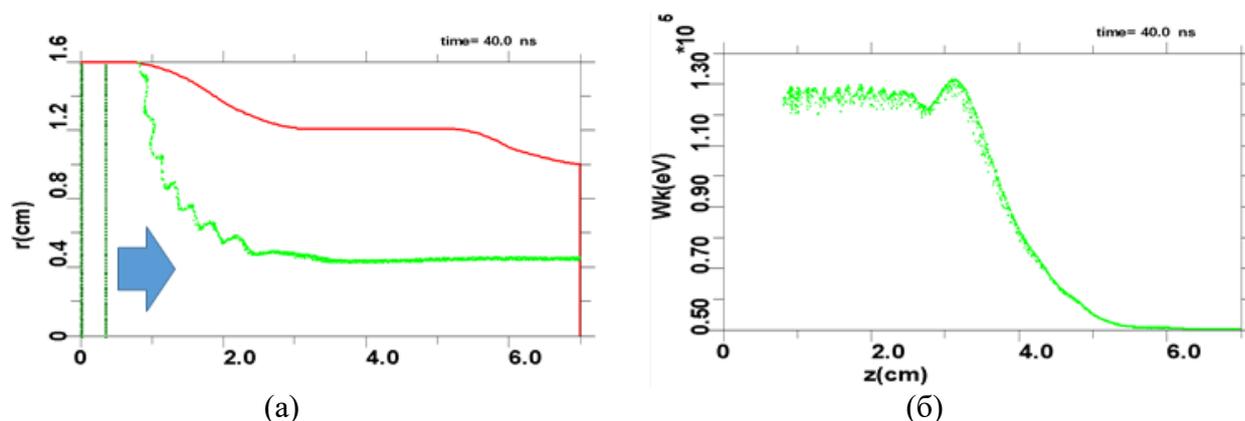
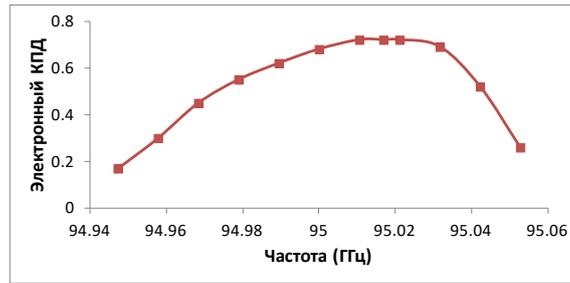
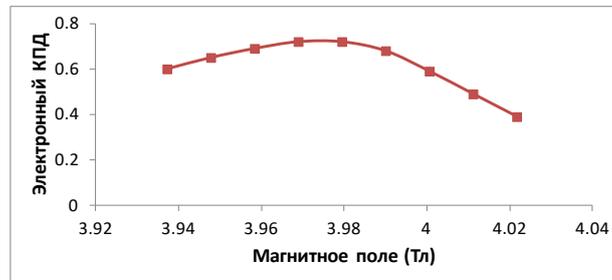


Рисунок 2. (а) Геометрия ректенны, используемая в PIC моделировании. (б) Зависимость энергии электронов от продольной координаты.

Эффективность преобразования определялась на основе приращения энергии электронного потока в процессе взаимодействия. При поглощении сигнала с мощностью 2 МВт продемонстрировано приращение энергии частиц до 130 кэВ (Рис.2б), что соответствует эффективности на уровне 70%. Согласно расчетам, уровень КПД 70% сохраняется в полосе частот внешнего сигнала порядка 30 МГц и 60% - в полосе 60 МГц (Рис.3а). При изменении ведущего магнитного поля те же значения КПД могут быть обеспечены в пределах 0.4% и 1.6%, соответственно (Рис.3б).



(а)



(б)

Рисунок 3. Зависимости эффективности ректенны от частоты падающего излучения (слева) и от величины резонансного магнитного поля (справа).

3. Принципиальный дизайн электронно-оптической системы

Для реализации ректенны необходимо сформировать пучок с минимально возможным питч-фактором. Выполненные расчеты взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем показали, что для обеспечения эффективности ректенны 80-90% желательно иметь паразитный питч-фактор в электронном пучке не выше 0.1. При превышении указанной величины КПД может значительно снижаться, а при величинах выше 0.5 возможно развитие генерации.

На основе адиабатической теории движения электронов в электрическом и магнитном полях получены аналитические оценки паразитной величины питч-фактора в электронно-оптической системе для ректенны [12]. Исследованы две основные причины возникновения паразитного вращения электронов, а именно, наличие радиального электрического поля электродов системы формирования и радиальное кулоновское поле сил пространственного заряда. Показано, что наибольшее влияние на возникновение паразитной закрутки оказывает первый из перечисленных факторов, который может приводить к возникновению питч-фактора до значений 0.2-0.3. Уменьшение этих значений до приемлемого уровня может быть обеспечено за счет оптимизации формы электродов.

С учетом сделанных аналитических оценок был разработан принципиальный дизайн электронно-оптической системы для формирования прямолинейного электронного пучка мегаваттной ЭЦР ректенны с рабочей частотой ~ 95 ГГц и рабочей модой $TE_{12,5}$. Соответственно, требовалось обеспечить следующие параметры электронного пучка: энергия частиц 50 кэВ, ток пучка 10 А, радиус пучка в резонаторе 6.43 мм, питч-фактор $g < 0.1$. Поскольку частота ректенны близка к частоте одного из промышленных гиротронов, работавшего на частоте 83 ГГц, для расчетов в качестве прототипа магнитной системы был взят 2х-секционный криомагнит, использовавшийся в этом приборе. Ректенна предназначена для работы в непрерывном режиме. Поэтому для долговременной надежной работы прибора было принято ограничение, что плотность тока эмиссии j_k не должна существенно превышать 3 А/см^2 . Электронно-оптическая система должна обеспечивать формирование пучка с минимально возможным питч-фактором. Поэтому электроны должны стартовать

вдоль магнитных силовых линий. Соответственно, для обеспечения этого условия эмиттер должен быть наклонен к вертикальной оси под углом порядка 6 градусов (Рис.4). Далее считалось, что формирование пучка происходит в плавно нарастающем адиабатическом магнитном поле и принималось во внимание, что разброс ведущих центров электронов в рабочем пространстве не должен быть больше, чем длина волны, деленная на 5. С учетом этих требований на основании адиабатической теории движения частиц в магнитном поле при заданной плотности тока было получено, что система формирования должна характеризоваться следующими параметрами: компрессия магнитного поля 12, магнитное поле на эмиттере 3.12 кГс, радиус катода 23.5 мм, ширина эмиттера 2.1 мм. Дальнейшая оптимизация требует проведения траекторного анализа.

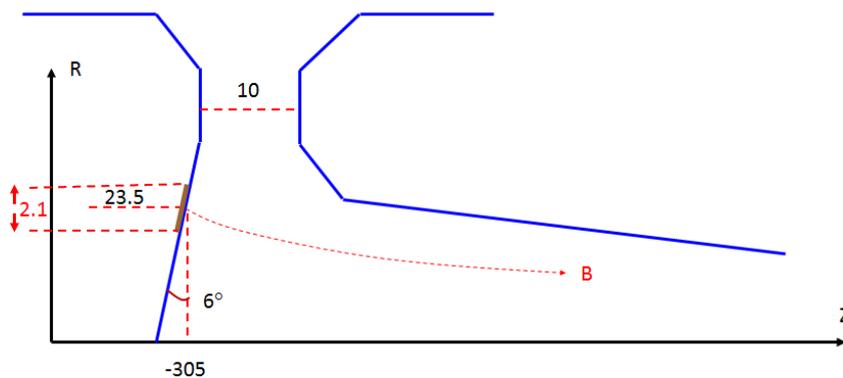


Рисунок 4. Конфигурация электронно-оптической системы формирования прямолинейного электронного пучка для ректенны с частотой 95 ГГц. Размеры указаны в миллиметрах.

Работа выполнена при поддержке **Российского научного фонда (проект № 19-79-30071 П)**.

Список литературы

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov and M. Y. Glyavin, "Russian Gyrotrons: Achievements and Trends", IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 260-268, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
2. M.Glyavin, *et al.* "Novel and Emerging Applications of the Gyrotrons Worldwide: Current Status and Prospects". Journal of Infrared, MM and THz Waves 42, 7, 715–741 (2021) doi: 10.1007/s10762-021-00804-8
3. V. Vanke, H. Matsumoto, N. Shinohara, A. Kita, "High power Converter of Microwaves into DC," J. Radioelectronics, vol. 9 (1999).
4. Biao Hu, Hao Li, Tianming Li, Haiyang Wang, Yihong Zhou, et al., "A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier," Energy Reports, Vol. 7, P. 1154-1161 (2021), doi: 10.1016/j.egy.2020.12.026.
5. A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.N.Kuftin. "Perspective gyrotron with mode converter for co-and counter-rotation operating mode" Applied Physics Letters **106** (26), 263501 (2015) doi: 10.1063/1.4923269.
6. V.L.Bakunin, G.G.Denisov, Yu.V.Novozhilova. "Frequency and phase stabilization of a multi-mode gyrotron with megawatt power by an external signal". Tech. Phys. Lett. 40, 382-385 (2014) doi:10.1134/S1063785014050034.
7. S.P. Sabchevski, M.Yu. Glyavin, G.S. Nusinovich. "The Progress in the Studies of Mode Interaction in Gyrotrons". Journal of Infrared, MM, and THz Waves 43, 1–47 (2022) doi: 10.1007/s10762-022-00845-7
8. G.G.Denisov, *et al* "Development of master oscillator for frequency locking of a complex of megawatt level microwave sources" Microwave and Optical Technology Letters **62**, 6, 2137-2143 (2020) doi: 10.1002/mop.32330.
9. Denisov G.G., Zotova I.V., Zheleznov I.V., Malkin A.M., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Semenov E.S., Glyavin M.Yu., "Phase-Locking of Second-Harmonic Gyrotrons for Providing MW-Level Output Power," IEEE Trans. Electron Dev., v. 69, no. 2, p.754-758 (2022), doi: 10.1109/TED.2021.3134187.

10. V.P. Tarakanov, "Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc.," Proc. EPJ Web Conf., vol. 149, Art. no. 04024, (2017), doi: 10.1051/epjconf/201714904024.
11. R.M. Rozental, V.P. Tarakanov, "Potential for Acceleration of Simulation of Dynamic Processes in Oversized Gyrotrons by Means of Using 2.5D Particle-in-Cell Method," J. Infrared Milli Terahz Waves 43, 479–492 (2022), doi: 10.1007/s10762-022-00862-6.
12. P.V. Krivosheev, V.K. Lygin, V.N. Manuilov, Sh.E. Tsimring, "Numerical simulation models of forming systems of intense gyrotron helical electron beams," Int. J. IR MM waves, v.22, no.8, p.1119-1145 (2001), doi: 10.1023/A:1015006230396.