

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.14>

УДК: 537.86

## РАЗРАБОТКА ЦИКЛОТРОННО-РЕЗОНАНСНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

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

ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
600950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2024 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность существенного повышения рабочей частоты циклотронно-резонансных выпрямителей для перспективных систем беспроводной передачи энергии. Такие системы, еще называемые циклотронными преобразователями энергии (ЦПЭ), основаны на поглощении микроволнового сигнала с последующей рекуперацией накопленной энергии. Повышение частоты ЦПЭ может быть достигнуто с использованием взаимодействия цилиндрического электронного пучка с развитой поперечной волноводной модой. Этот принцип хорошо известен для гиротронов, по отношению к которым ЦПЭ можно рассматривать как обращенные системы, которые не генерируют, а поглощают излучение. В статье приведены оценки эффективности ЦПЭ с рабочей частотой 35 ГГц, а также расчеты основных узлов прибора, включая систему формирования пучка и двунаправленного квазиоптического преобразователя для ввода/вывода микроволнового излучения.

**Ключевые слова:** беспроводные системы передачи энергии, микроволновое излучение, циклотронно-резонансное поглощение, гиротроны.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-30071 (продолжение).

**Автор для переписки:** Железнов Илья Владимирович, [zheleznoviv@ipfran.ru](mailto:zheleznoviv@ipfran.ru)

## Введение

Развитие технологий беспроводной передачи энергии (БПЭ) на большие расстояния является актуальной задачей современной физики. Одна из современных тенденций в этом направлении связана с использованием узконаправленных пучков микроволнового излучения [1-3]. При этом ключевым элементом микроволновых БПЭ систем является выпрямитель (так называемые ректенны, от английского *rectenna* – *rectifier* и *antenna*), который осуществляет преобразование энергии СВЧ излучения в энергию постоянного тока. На данный момент наиболее распространенные типы микроволновых ректенн используют полупроводниковые диоды Шоттки [4-8]. Однако такие устройства не выдерживают высоких уровней СВЧ-мощности и имеют низкие значения выходного напряжения (несколько вольт), что требует создания сложных последовательно-параллельных систем их соединения. Кроме того, эффективность преобразования полупроводниковых ректенн резко падает с частотой (см., например, работу [8] и список литературы в ней). В то же время, повышение частоты микроволновых БПЭ систем крайне желательно, поскольку это приводит к уменьшению передающих и приемных антенн, увеличивает направленность пучков излучения, а также открывает возможность использования известных окон прозрачности атмосферы.

Альтернативным принципом создания микроволновых ректенн, которые лишены перечисленных выше недостатков, является использование взаимодействия входного излучения с прямолинейным электронным пучком в условиях электронно-циклотронного резонанса. Такие устройства [9-13] известны как циклотронные преобразователи энергии (ЦПЭ). При этом процесс преобразования включает три стадии. Сначала приосевой электронный пучок в резонаторе приобретает поперечную энергию вращения в процессе поглощения

СВЧ излучения, поступающего со стороны катода. Далее в области реверсивного изменения ведущего магнитного поля осуществляется трансформация вращательной энергии частиц в поступательную. И, наконец, приобретенная дополнительная энергия выделяется на нагрузке коллектора, потенциал которого ниже потенциала катода. К настоящему времени ЦПЭ сантиметрового диапазона (рабочая частота 2.45 ГГц) продемонстрировали высокую эффективность преобразования (до 80%) при входной мощности микроволн 10 кВт и выходном напряжении на уровне 15-20 кВ.

В то же время представляет интерес возможность существенного повышения частоты принимаемого излучения ЦПЭ. С этой целью предлагается использовать ряда подходов, апробированных при создании гиротронов [14,15], в которых имеет место циклотронно-резонансное взаимодействие трубчатых пучков электронов, вращающихся в однородном магнитном поле, с развитыми модами цилиндрических резонаторов вблизи их критических частот. Такой принцип действия позволил гиротронам успешно освоить миллиметровый диапазон на мегаваттном уровне мощности и продвинуться далее в субмиллиметровый и терагерцовый диапазоны с мощностью непрерывного генерации, существенно превышающей значения, достижимые на основе других типов электронно-вакуумных устройств. Отметим, что в мощных гиротронах широко используются системы рекуперации остаточной энергии электронов с преобразованием поперечной энергии в продольную в адиабатически спадающем поле основного соленоида. Кроме того, решена задача ввода мощного излучения с коллекторного конца системы при использовании квазиоптических преобразователей нового типа, разделяющих волновые потоки, соответствующие модам с различным направлением вращения [16]. Такие преобразователи были успешно использованы при проведении экспериментов по захвату гиротронов внешним сигналом [17]. Отличием гиротронов от ЦПЭ является использование пучка вращающихся электронов с большими поперечными скоростями. Такой пучок генерирует излучение, тогда как прямолинейный пучок в ЦПЭ должен излучение поглощать. В этом случае

предлагаемая конструкция ЦПЭ фактически представляет собой «обращенный» гиротрон, что и позволяет использовать для разработки ЦПЭ некоторые гиротронные принципы.

В данной статье приведены результаты расчетов, направленных на создание ЦПЭ миллиметрового диапазона длин волн (рабочая частота 35 ГГц). В Разделе 1 приведены расчеты электронно-волнового взаимодействия и оценки КПД преобразования. В Разделе 2 описана электронно-оптическая система формирования пучка с требуемыми параметрами. В Разделе 3 приведены расчеты двунаправленного квазиоптического преобразователя для ввода/вывода излучения.

### 1. Расчет эффективности ЦПЭ с рабочей частотой 35 ГГц

Принципиальная схема разрабатываемого прибора представлена на рис. 1. Мы считаем, что ЦПЭ запитывается электронным пучком, в котором частицы не имеют начальной орбитальной скорости. Однако, в отличие от исходной конфигурации с приосевым пучком (см. работу [11] и приведенный в ней список литературы), в данном случае пучок является цилиндрическим с радиусом инъекции, соответствующим максимуму коэффициента связи с рабочей вращающейся TE модой. Поглощаемая волна с необходимым направлением вращения поступает с коллекторного конца системы. В процессе циклотронно-резонансного взаимодействия в резонаторе, размещенном в магнитном поле соленоида, электроны приобретают поперечную энергию, которая далее преобразуется в продольную в адиабатически спадающем магнитном поле. Здесь также имеет место отличие от исходной конфигурации [11], где для этой цели использован реверс ведущего поля. Далее пучок высаживается на коллектор, где происходит рекуперация всей запасенной энергии частиц. Таким образом, общий КПД преобразования может быть рассчитан как:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, \quad (1)$$

где  $\eta_1$  – эффективность электронно-волнового взаимодействия в резонаторе,  $\eta_2$  – эффективность адиабатической трансформации поперечной энергии в продольную,  $\eta_3$  – эффективность рекуперации.

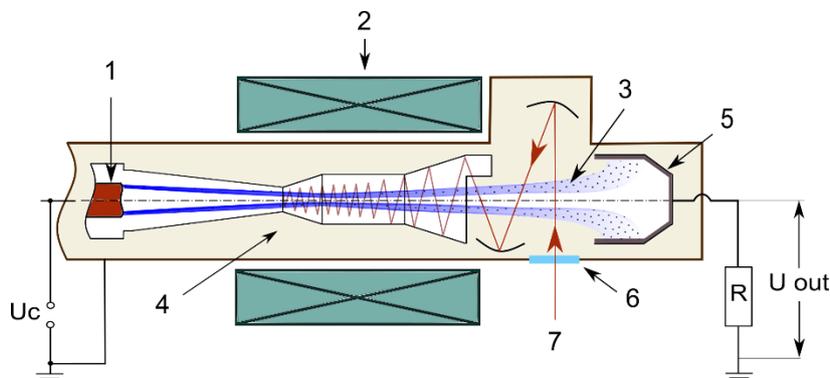


Рис. 1. Принципиальная схема циклотронного преобразователя энергии гиротронного типа. Цифрами обозначены: 1 – электронная пушка, 2 – соленоид, 3 – трубчатый электронный пучок, 4 – резонатор, 5 – коллектор с нагрузкой, 6 – входное окно, 7 – принимаемый сигнал.  $U_c$  – ускоряющее напряжение электронно-оптической системы;  $U_{out}$  – выходное напряжение. Схема не отображает конструкцию квазиоптического преобразователя, описанного в Разделе 3.

Анализ эффективности электронно-волнового взаимодействия в резонаторе далее проведем на основе усредненной самосогласованной системы уравнений с учетом того, что условие циклотронного резонанса имеет вид:

$$\omega \approx \omega_H \approx \omega_c, \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота принимаемого излучения,  $\omega_H$  – релятивистская гирочастота электронов,  $\omega_c$  – критическая частота рабочей моды  $TE_{m,n}$ . Указанная система может быть получена из нестационарных гиротронных уравнений (см., например, [18] с учетом нулевой начальной поперечной скорости частиц ( $V_{\perp 0} = 0$ )) и представлена в виде (ср. с [19]):

$$i \frac{1}{4\beta_{\parallel 0}^2} \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + i\delta(Z)a = Gp, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip(\Delta + |p|^2) = -a.$$

Здесь использованы следующие обозначения:  $Z = \omega_c z / 2V_{||0}$  и  $\tau = \omega_c t / 2$  – нормированные продольная координата и время;  $a = eAJ_{m-1}(v_{mn} R_b / R) / m_e c \omega_c$  – медленная амплитуда поля;  $p = (p_x + ip_y) e^{-i\omega_c t + i(m-1)\varphi} / m_e c \gamma_0$  – нормированный поперечный импульс;  $\varphi$  – азимутальная координата;

$$G = 4\beta_{||0}^{-1} \frac{eI_b}{m_e c^3} \frac{J_{m-1}^2(v_{mn} R_b / R_w)}{J_m^2(v_{mn})(v_{mn} - m^2)}$$

– параметр связи;  $I_b$  – ток цилиндрического пучка с радиусом  $R_b$ ;  $v_{mn}$  – собственное число рабочей моды;  $R_w$  – радиус регулярной части резонатора;  $\beta_{||0} = V_{||0} / c$  – нормированная на скорость света начальная продольная (вдоль ведущего магнитного поля) скорость электронов;  $\Delta = 2(\omega_c - \omega_H) / \omega_c$  – расстройка циклотронного резонанса;  $\delta(Z) = 2(\omega_c - \tilde{\omega}_c(Z)) / \omega_c$  – функция, учитывающая изменение радиуса резонатора (профиль)  $R(Z)$ ,  $\tilde{\omega}_c(Z) = v_{mn} c / R(Z)$ .

Уравнения (3) должны быть дополнены граничными условиями. Для электронов эти условия задаются во входном сечении пространства взаимодействия  $Z=0$  и имеют вид:  $p(Z=0)=0$ . Следует отметить, что, в отличие от гиротронов, в данном случае отсутствует начальное распределение электронов по фазам циклотронного вращения. Соответственно, все электроны в ЦПЭ находятся в одинаковых условиях, а их движение описывается только одним уравнением. Как будет видно далее, это в конечном итоге обеспечивает высокий уровень преобразования ЦПЭ в целом.

Для амплитуды поля в сечении  $Z=0$  будем использовать известное в теории гиротронов [18] «безотражательное» граничное условия вида:

$$a(0, \tau) - \frac{1}{2\beta_{||0} \sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(0, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 0. \quad (4)$$

Отметим здесь, что эти условия соответствуют свободной дифракции поля через границу расчетной области. В тоже время, при задании профиля резонатора

типичной формы с закритическим сужением с катодного конца, рабочая волна на самом деле отражается. В этой ситуации следствием использованного условия является экспоненциальное спадание поля в отрицательном направлении оси  $z$ . На правом конце расчетной области  $Z = L$  будем использовать модифицированное граничное условие, полученное в [20], с учетом подачи внешнего сигнала с амплитудой  $a_0$ . В использованных нормировках оно может быть записано как:

$$a(L, \tau) + \frac{1}{2\beta_{||0}\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 2a_0 e^{i\Omega_0 \tau}, \quad (5)$$

где  $\Omega_0 = 2(\omega - \omega_c)/\omega_c$ ,  $L = \omega_c l / 2V_{||0}$ ,  $l$  – физическая длина расчетной области.

Для дальнейших расчетов были выбраны следующие параметры: рабочие частоты вблизи 35 ГГц, рабочая мода  $TE_{4,2}$ , ток электронного пучка  $I_b = 0.5$  А, ускоряющее напряжение в системе формирования  $U_c = 10$  кВ, радиус инжекции 5.72 мм. На рис. 2а представлен профиль рабочего резонатора с радиусом и длиной однородного участка 12.65 мм и 45 мм. Длина резонатора подбиралась оптимальной для поглощения входного сигнала с мощностью  $P_0 = 10$  кВт. Процесс нарастания поперечного импульса электронов при частоте внешнего сигнала 35 ГГц показан на рис. 2б.

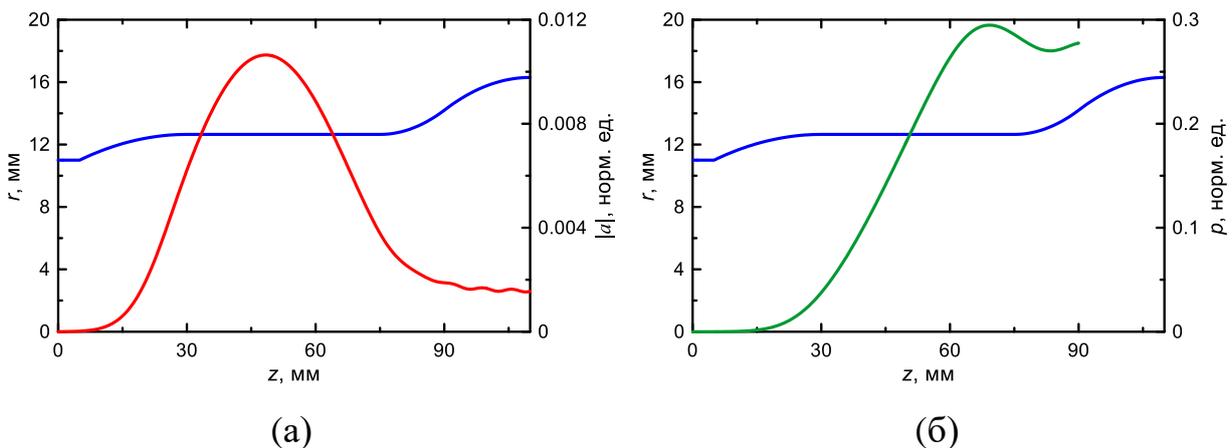


Рис. 2. (а) Профиль резонатора (синяя кривая) и продольная структура поля (красная кривая). (б) Нарастание поперечного импульса электронов в процессе поглощения принимаемой волны (зеленая кривая); синей кривой продублирован профиль резонатора.

На рис. 3 приведены уровни эффективности поглощения (в процентах) внешнего электромагнитного сигнала  $\eta_1 \cdot 100\% = (P_{in} - P_{out}) / P_{in} \cdot 100\%$  на плоскости «ведущее магнитное поле – частота входного сигнала». Видно, что в оптимуме КПД поглощения достигает 100%. Это значение снижается до 98% при учете омических потерь в стенках резонатора, выполненного из меди. При отстройке от оптимальных параметров КПД поглощения снижается. Следует отметить также, что некоторое снижение КПД может иметь место при учете разброса по начальным скоростям электронов, а также позиционного разброса на входе в резонатор. Однако, как показывают результаты расчетов электронно-оптической системы, приведенные в Разделе 2, существует возможность сформировать достаточно качественный электронный пучок, несовершенства которого приведут лишь к небольшому снижению КПД.

Оценим далее полный КПД разрабатываемой ЦПЭ с учетом полученных результатов. Здесь следует отметить, что опыт разработки гиротронов показывает, что при движении в адиабатически спадающем магнитном поле поперечная энергия электронов может быть практически полностью трансформирована в продольную. Таким образом, можно сразу положить  $\eta_2 \approx 1$ . Что касается рекуперации энергии на коллекторе, то для гиротронов известно, что эффективность рекуперации фактически определяется минимальной энергией электронов после взаимодействия. При этом наличие электронов с разной энергией фактически вызвано несколькими факторами, из-за которых электроны по-разному взаимодействуют с электромагнитным полем в резонаторах гиротронов. К этим факторам относятся начальное распределение по фазам циклотронного вращения, а также начальные скоростной и позиционный разброс. В то же время, как уже было отмечено выше, в ЦПЭ с идеальным электронным пучком (без учета скоростного разброса) распределение по фазам циклотронного вращения на входе в пространство взаимодействия отсутствует. Такое распределение может иметь место при наличии паразитной начальной вращательной скорости. Однако, как будет показано далее, эта скорость, определяемая системой формирования

прямолинейного электронного пучка, может быть очень мала. Одновременно, для прямолинейных пучков можно обеспечить существенно меньшие значения позиционного и скоростного разбросов по сравнению с винтовыми пучками, используемыми в гиротронах. Все это позволяет положить  $\eta_3 \approx 1$  и констатировать, что эффективность ЦПЭ фактически определяется КПД поглощения волны в резонаторе.

С учетом сделанных выводов оценим далее выходное напряжение ЦПЭ для оптимальных значений параметров (см. рис. 3). В этом случае после взаимодействия значение нормированного поперечного импульса достигает 0.277, что соответствует полной энергии электронов порядка 30 кэВ. При учете омических потерь это значение несколько снижается. Таким образом, с учетом омических потерь в резонаторе, при рекуперации всей запасенной энергии на коллекторе выходное напряжение составит ~28-29 кВ.

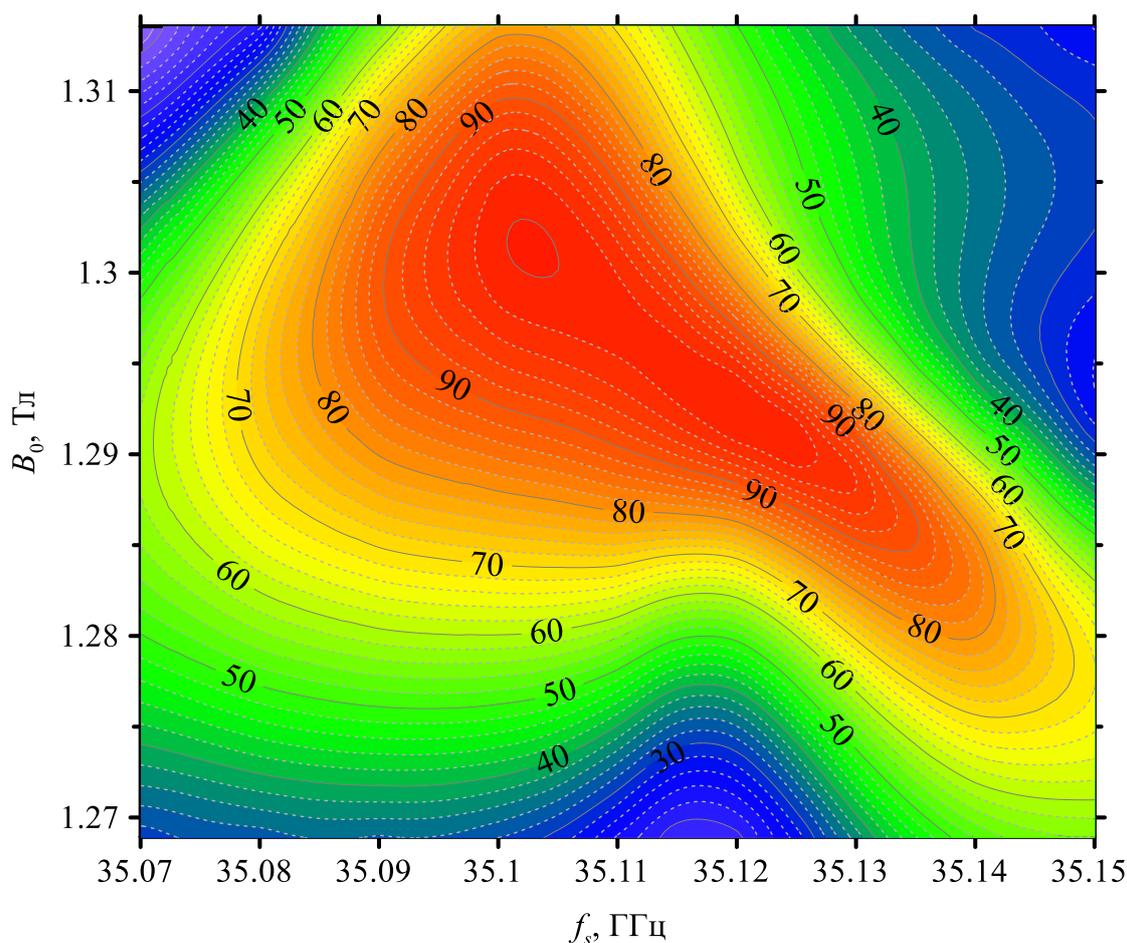


Рис. 3. Уровни эффективности поглощения (в процентах) внешнего электромагнитного сигнала в резонаторе на плоскости «ведущее магнитное поле – частота входного сигнала».

## 2. Электронно-оптическая система формирования трубчатого прямолинейного пучка

Как указано выше, для обеспечения эффективной работы разрабатываемой ЦПЭ необходимо обеспечить формирование прямолинейного электронного пучка с параметрами 10 кВ / 0.5 А и радиусом встрела 5.72 мм. При этом отношение рабочего тока к Ленгмюровскому составляет 0.21 (большой пространственный заряд), а промежуток катод-анод образует рассеивающую линзу-диафрагму. Оба этих фактора могут приводить к появлению значительной паразитной вращательной скорости на входе в резонатор, и, как следствие, – к падению эффективности ЦПЭ.

Выполненный далее анализ позволил преодолеть указанные трудности и разработать электронно-оптическую систему (ЭОС) формирования качественного электронного пучка с требуемыми параметрами. Оптимизация ЭОС проводилась по двумерной численной модели (код ЭПОС [21]) с учетом реального распределения магнитного поля соленоида, поля электродов пушки и собственного кулоновского поля пучка. В процессе оптимизации варьировалась форма катода, прежде всего угол эмиттера, а также положение пушки относительно центра магнитной системы и взаимное расположение катода и анода. В моделировании использовалась конфигурация магнитной системы в виде соленоида с внутренней коррекцией, разработанная ранее для технологического гиротрона с рабочей частотой 24 ГГц [22]. Для обеспечения циклотронного резонанса на частоте 35 ГГц величина магнитного поля пропорционально увеличивалась, что допускается в конструкции магнитной системы. Было также принято во внимание, что электронная пушка должна быть выдвинута из-под обмоток соленоида, чтобы упростить конструкцию прибора и обеспечить некоторую свободу в размещении деталей пушки.

На рис. 4 приведена оптимизированная конфигурация ЭОС, обеспечивающая в области электронно-волнового взаимодействия практически прямолинейный электронный пучок с требуемыми параметрами. Как показало моделирование, для такой системы разброс ведущих центров на входе в

резонатор не превышает 0.35 мм ( $\lambda/22$  в длинах волн), а величина максимального питч-фактора, определяемого как отношение поперечной и продольной скоростей на влете в резонатор, меньше, чем 0.01 (см. также Таблицу 1). Таким образом, в данной конфигурации ЭЦР преобразователя с достаточной степенью точности позиционный разброс электронов пучка можно считать пренебрежимо малым, а пучок – изначально прямолинейным, что оправдывает использование «одноэлектронной» модели (3) в расчетах электронно-волнового взаимодействия. Проведенный анализ также показывает, что указанные свойства разработанной ЭОС сохраняются до токов в 1 А. В этом случае, в принципе, можно вдвое поднять мощность принимаемого излучения разрабатываемого ЦПЭ.

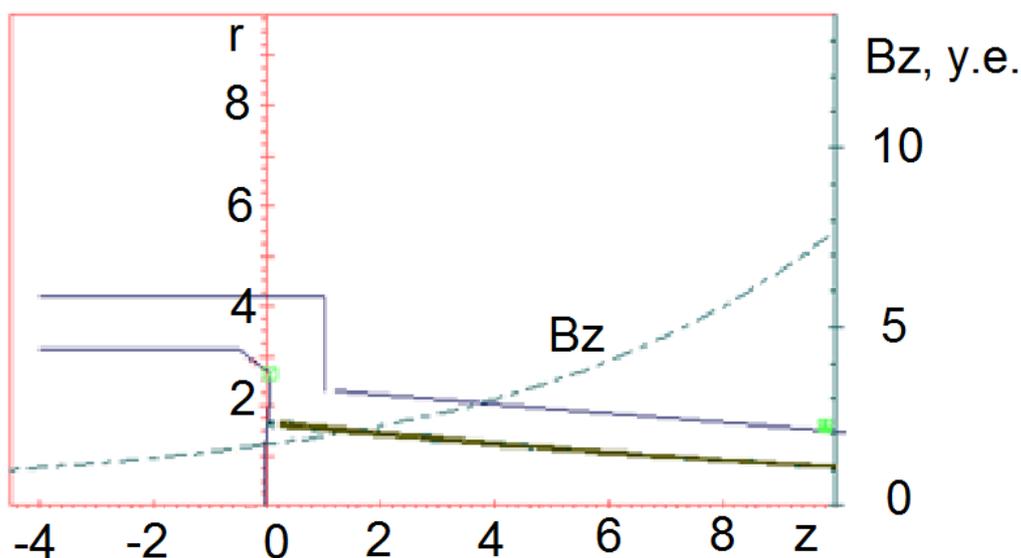


Рис. 4. Геометрия электронно-оптической системы (синие сплошные линии), электронные траектории (желтый) и распределение магнитного поля (штрих-пунктирная линия). Размеры указаны в см.

Дополнительно было проведено исследование чувствительности рассчитанной ЭОС к изменениям взаимного положения электродов, а также к сдвигу всей пушки относительно магнитной системы. Результаты такого анализа представлены в Таблице 1, где для двух токов электронного пучка приведены значения среднего и максимального паразитного питч-фактора на входе в резонатор ЦПЭ. Видно, что исследуемая ЭОС не критична к малому изменению

геометрии и положения пушки, а ее изготовление не выходит за рамки технологической точности.

Таблица 1. Значения среднего и максимального питч-факторов электронов пучка на входе в резонатор для разных токов электронного пучка.

Вид возмущения	$I = 0.5 \text{ A}$		$I = 1.0 \text{ A}$	
	$g_{avr}$	$g_{max}$	$g_{avr}$	$g_{max}$
Номинальный режим	0.0048	0.0076	0.0050	0.0097
Сдвиг соленоида + 2 мм	0.0052	0.0078	0.0057	0.0099
Сдвиг соленоида – 2 мм	0.0034	0.0058	0.0040	0.0079
Сдвиг анода по $z + 1$ мм	0.0042	0.0065	0.0047	0.0084
Сдвиг анода по $z - 1$ мм	0.0063	0.0087	0.0068	0.0107
Сдвиг анода по $r + 0.5$ мм	0.0040	0.0063	0.0045	0.0087
Сдвиг анода по $r - 0.5$ мм	0.0062	0.0093	0.0062	0.0110

### 3. Двухнаправленный квазиоптический преобразователь для ввода / вывода излучения в ЦПЭ

Одним из отличий разрабатываемой ЦПЭ от оригинальной конструкции [11], является ввод излучения со стороны коллектора. Для этого планируется использовать двухнаправленный квазиоптический преобразователь (КП), предложенный в [16] и успешно использованный в экспериментах [17] по захвату гиротрона внешним сигналом от гиротрона-драйвера. Такой КП должен, во-первых, решать задачу ввода излучения в пространство взаимодействия ЦПЭ с его преобразованием в рабочую моду требуемого вращения, которое должно совпадать с вращением электронов в ведущем магнитном поле после приобретения ими поперечной энергии. Во-вторых, этот же преобразователь планируется использовать для вывода из системы остаточной непоглощенной мощности.

Здесь следует пояснить, что квазиоптические преобразователи широко используются в гиротронах для обратной по отношению к ЦПЭ задачи, а именно, – для трансформации рабочей моды в Гауссов волновой пучок. Ключевыми элементами гиротронных КП являются волноводный излучатель в виде

профилированного отрезка волновода со срезом специальной формы и квазипараболическое зеркало, превращающее расходящееся по азимуту излучение на выходе излучателя в параксиальный волновой пучок с фазовым фронтом, близким к плоскому. В случае, когда необходимо одновременно излучать генерируемую гиротроном СВЧ-мощность и заводить в его резонатор сигнал от гиротрона-драйвера, применяется схема, в которой помимо излучателя присутствует пара квазиоптических зеркал. При специальном симметричном профиле излучателя такая система одинаково хорошо излучает рабочую моду, как правого, так и левого вращений, меняется только направление (канал) вывода энергии [16]. Дополнительно, появляется возможность через один канал заводить сигнал драйвера, а через другой выводить генерируемое излучение вместе с отраженным от резонаторной области гиротрона сигналом-драйвером. При использовании аналогичной системы для разрабатываемого ЦПЭ возникает возможность через один канал заводить внешний сигнал, а через другой – выводить остаточное (непоглощенное) излучение. При этом, в отличие от экспериментов по захвату [17], планируется использовать для двух каналов два различных вакуумных окна.

На рис. 5 представлены результаты расчета двунаправленного квазиоптического преобразователя для осуществления ввода-вывода излучения в пространство взаимодействия ЭЦР выпрямителя. Для отыскания профиля излучателя применяется процедура оптимального синтеза [25] совместно с решением интегрального уравнения электрического поля (EFIE – Electric Field Integral Equation) [26]. Итерационная процедура синтеза требует двух расчетов задач распространения поля на каждой итерации: от входа в преобразователь к выходу, и обращенного – от выхода к входу. Произведение полей этих двух решений на стенке волновода определяет поправку на профиль в данной итерации. На основе описанной процедуры синтезирован профиль поверхности волноводного приемника квазиоптического преобразователя для ЦПЭ с частотой 35 ГГц и рабочей модой  $TE_{4,2}$  с расчетной эффективностью 97%.

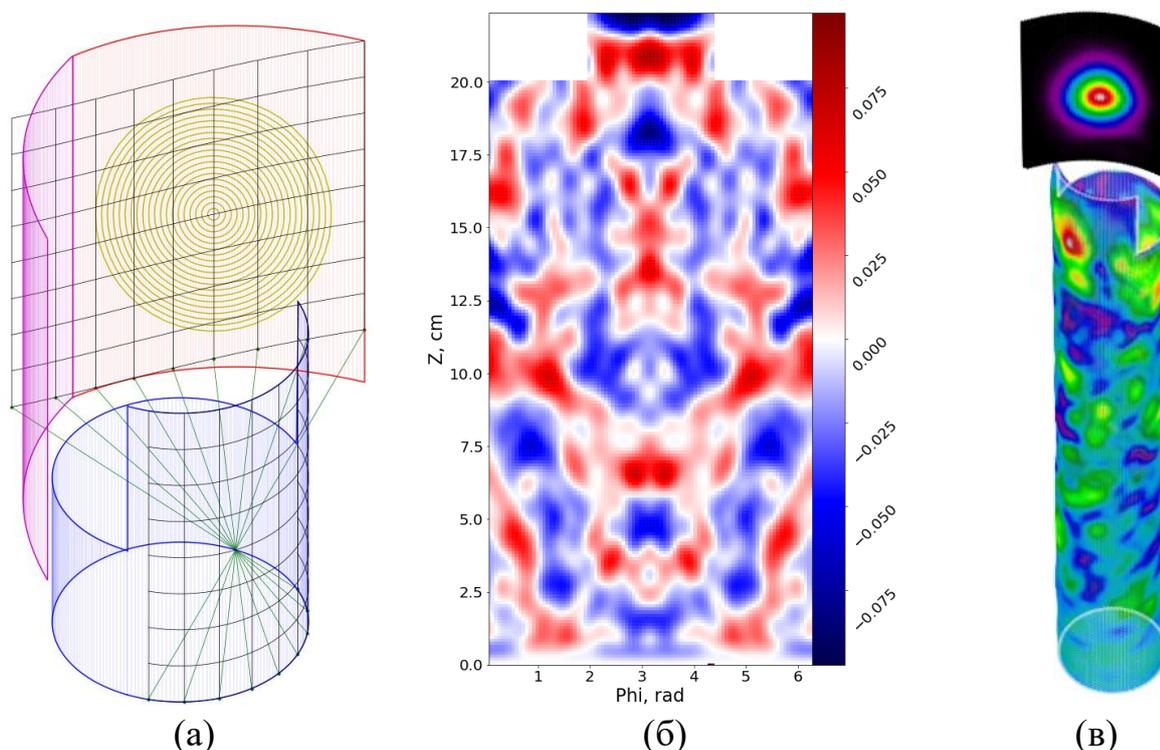


Рис. 5. Результаты расчета двунаправленного квазиоптического преобразователя для ЦПЭ диапазона 35 ГГц: (а) – схема преобразователя и ход лучей (синий – профиль приемника, красный-сиреневый – квазиоптические зеркала); (б) – профиль приемника; (в) – распределение поверхностного тока на поверхности приемника и интенсивности электромагнитного поля на поверхности квазипараболического зеркала.

## Заключение

Таким образом, выполненные расчеты показали реализуемость мощного циклотронного преобразователя энергии с рабочей частотой 35 ГГц. Следует отметить, что с учетом опыта разработки мощных гиротронов, частота и мощность ЦПЭ могут быть далее повышены при использовании более высоких рабочих мод и трубчатых электронных пучков большого диаметра и, соответственно, с большим током. При этом сами гиротроны, которые в настоящее время являются наиболее мощными источниками непрерывного излучения миллиметрового диапазона [14,15], являются перспективными кандидатами на роль излучателей в микроволновых БПЭ системах. Особенно это актуально в связи с уже упомянутыми экспериментами по захвату гиротрона внешним сигналом, что открывает путь к созданию антенных решеток из большого числа таких генераторов.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-30071 (продолжение).

### Литература

1. McSpadden J.O., Mankins J.C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology // IEEE microwave magazine. – 2002. – Т. 3. – №. 4. – С. 46-57.
2. Shinohara N. Power without wires // IEEE Microwave magazine. – 2011. – Т. 12. – №. 7. – С. S64-S73.
3. Zhu X. et al. Long-range wireless microwave power transmission: A review of recent progress // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2020. – Т. 9. – №. 4. – С. 4932-4946.
4. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 123. – №. 12. – С. 633-655.
5. Au N.D. et al. A 5.8-GHz rectifier using diode-connected MESFET for space solar power satellite system // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2022. – Т. 70. – №. 10. – С. 4502-4510.
6. Saito K., Nishiyama E., Toyoda I. A 2.45-and 5.8-GHz dual-band stacked differential rectenna with high conversion efficiency in low power density environment // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. – 2022. – Т. 3. – С. 627-636.
7. Drubin C. NRL Conducts Successful Terrestrial Microwave Power Beaming Demonstration // Microwave Journal. – 2022. – Т. 65. – №. 7.
8. Mizojiri S. et al. Subterahertz wireless power transmission using 303-GHz rectenna and 300-kW-class gyrotron // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Т. 28. – №. 9. – С. 834-836.
9. Барденков В.А. и др. О преобразователе СВЧ-энергии с реверсивным магнитным полем // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21. – №. 4. – С. 821-828.

10. Ванке В.А. и др. К анализу физических процессов в переходной области циклотронного преобразователя энергии // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23. – №. 6. – С. 1217.
11. Ванке В.А. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – №. 9. – С. 957-978.
12. Zhao X. et al. Analysis of the effect of field non-uniformity on energy conversion efficiency in a cyclotron-wave rectifier // Physics of Plasmas. – 2018. – Т. 25. – №. 11.
13. Hu B. et al. A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier // Energy Reports. – 2021. – Т. 7. – С. 1154-1161.
14. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The gyrotron at 50: Historical overview // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2014. – Т. 35. – С. 325-381.
15. Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Y. Russian gyrotrons: Achievements and trends // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Т. 1. – №. 1. – С. 260-268.
16. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. Perspective gyrotron with mode converter for co-and counter-rotation operating modes // Applied Physics Letters. – 2015. – Т. 106. – №. 26.
17. Denisov G.G. et al. Phase-locking of second-harmonic gyrotrons for providing MW-level output power // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – Т. 69. – №. 2. – С. 754-758.
18. Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // International Journal of Electronics Theoretical and Experimental. – 1986. – Т. 61. – №. 6. – С. 881-894.
19. Zotova I.V. et al. Formation of microwave soliton combs under cyclotron resonance interaction of electron beam with counter-propagating waveguide mode // Physics of Plasmas. – 2022. – Т. 29. – №. 10.

20. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Т. 22. – №. 3.
21. Krivosheev P. V. et al. Numerical simulation models of forming systems of intense gyrotron helical electron beams // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 2001. – Т. 22. – С. 1119-1145.
22. Проявин М.Д., Глявин М.Ю., Мануилов В.Н. Магнитно-экранированная электронно-оптическая система непрерывного гиротрона с рабочей частотой 24 ГГц // *Радиотехника и электроника*. – 2017. – Т. 62. – №. 10. – С. 1010-1017.
23. Gashturi A.P. et al. Development of a Two-Channel Quasi-Optical Converter for a Multifrequency Gyrotron in the Range of 176–250 GHz // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2024.
24. Kuftin A.N. et al. First demonstration of frequency-locked operation of a 170 GHz / 1 MW gyrotron // *IEEE Electron Device Letters*. – 2023.
25. Sobolev D.I., Denisov G.G. Principles of synthesis of multimode waveguide units // *IEEE transactions on plasma science*. – 2010. – Т. 38. – №. 10. – С. 2825-2830.
26. Chew W.C. et al. (ed.). *Fast and efficient algorithms in computational electromagnetics*. – Artech House, Inc., 2001.

**Для цитирования:**

Гаштури А.П., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Железнов И.В., Зотова И.В., Мануилов В.Н., Самсонов С.В., Сергеев А.С. Разработка циклотронно-резонансного выпрямителя миллиметрового диапазона для перспективных систем беспроводной передачи энергии // *Журнал радиоэлектроники*. – 2025. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.14>