

ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ОПТИКА

УДК 621.385.69

РАЗРАБОТКА КОЛЛЕКТОРА С МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ДЛЯ ГИРОТРОНА

© 2020 г. О. И. Лукша^а, *, П. А. Трофимов^а

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251 Российская Федерация

*E-mail: louksha@rphf.spbstu.ru

Поступила в редакцию 19.07.2019 г.

После доработки 19.07.2019 г.

Принята к публикации 21.11.2019 г.

Разработана четырехступенчатая коллекторная система для экспериментального гиротрона СПбПУ, основанная на пространственной сепарации электронов с разной энергией в скрещенных электрическом и магнитном полях. Определены условия использования данной системы для эффективной рекуперации остаточной энергии электронов в отработанном пучке. Произведено численное моделирование рекуператора и выполнен анализ распределений электрического и магнитного полей в коллекторной области гиротрона. В результате теоретических оценок и проведенного траекторного анализа винтового электронного потока показано, что разработанная система обеспечивает рекуперацию остаточной энергии электронов, необходимую для достижения полного КПД гиротрона, превышающего 70%.

DOI: 10.31857/S0033849420080082

ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны в настоящий момент являются наиболее эффективными среди мощных приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Данные приборы занимают особую нишу между традиционными вакуумными и оптическими устройствами, имеющими ограничения по уровню выходной мощности и КПД в указанных диапазонах длин волн. Гиротроны применяются при нагреве плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, спектроскопии высокого разрешения, температурной обработке материалов и в ряде других приложений (например, [1]).

Гиротрон представляет собой мазер на циклотронном резонансе, использующий энергию поперечного движения электронов винтового электронного пучка (ВЭП) для генерации высокочастотного электромагнитного излучения. Электронный КПД гиротрона $\eta_{эл}$, определяемый эффективностью передачи энергии электронов ВЧ-излучению, как правило, не превышает 30...40% [2]. Энергия отработанного потока, оставшаяся после взаимодействия электронов с ВЧ-полем в резонаторе, рассеивается на коллекторе прибора в виде тепла. Перспективным методом повышения полного КПД гиротронов, как и других вакуумных СВЧ-приборов, является реализация коллекторов с рекуперацией остаточной энергии пучка. В таких

устройствах на коллектор подается отрицательное относительно корпуса прибора напряжение, вследствие чего электроны до осаждения на металлических стенках тормозятся в электрическом поле и, как следствие, отдают часть своей энергии обратно в электрическую цепь.

В настоящее время в мощных гиротронах широко внедряются коллекторные системы с многоступенчатой рекуперацией энергии. Полный КПД таких гиротронов достигает 50...55% [1–3]. Дальнейшее увеличение эффективности возможно при реализации коллекторных систем с многоступенчатой рекуперацией энергии. В системах подобного рода происходит пространственная сепарация электронных фракций с различной кинетической энергией и последующее осаждение этих фракций на коллекторные электроды, имеющие различный задерживающий потенциал. В коллекторной области гиротронов индукция магнитного поля заметно меньше, чем в резонаторе. Как следствие, практически вся энергия электронов сосредоточена в их продольном (вдоль силовой линии магнитного поля) движении, что может упростить реализацию многоступенчатой рекуперации. При увеличении числа ступеней торможения, очевидно, возрастает максимальный полный КПД прибора. Однако системы с многоступенчатой рекуперацией пока еще не были реализованы в гиротронах, что обусловлено присущему отработанному ВЭП разбросу элект-

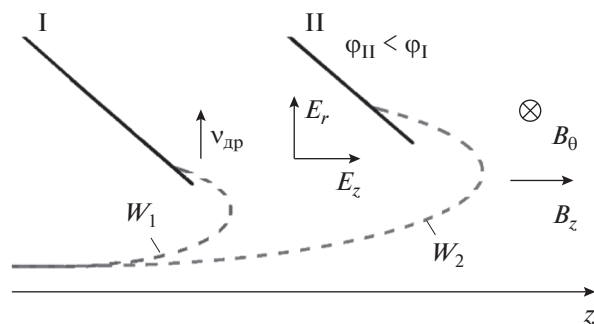


Рис. 1. Траектории электронов с разной начальной энергией W в скрещенных электрическом и магнитном полях: I, II – секции коллектора под различными потенциалами ϕ_I и ϕ_{II} ($\phi_{II} < \phi_I$).

тронов по компонентам скорости и поперечным координатам, а также наличию остаточного магнитного поля в коллекторной области.

На данный момент известен ряд методов пространственной сепарации электронов с разной энергией, которые могут быть использованы в системах многоступенчатой рекуперации. Среди них метод, основанный на радиальном дрейфе заряженных частиц в скрещенных магнитном и электрическом полях, представляется наиболее перспективным и активно исследуется в настоящее время несколькими научными группами. Были предложены и теоретически исследованы несколько конструкций коллекторов, в которых дрейф электронов осуществляется в продольном магнитном и азимутальном электрическом полях [4–6]. Альтернативным подходом, предложенным авторами данной работы, является использование для радиального дрейфа электронов продольного электрического и азимутального магнитного полей [7, 8].

В данной работе выполнен анализ возможностей реализации четырехступенчатой системы рекуперации с азимутальным магнитным полем для экспериментального импульсного гиротрона СПБПУ с рабочей частотой 74.2 ГГц и выходной СВЧ-мощностью ~ 100 кВт [9]. Обсуждаются основные критерии выбора параметров электродов и магнитных катушек для достижения эффективной рекуперации остаточной энергии электронов отрабатанного пучка. Произведен анализ распределений полей в разработанной системе рекуперации, а также конструктивных особенностей, ограничивающих ее возможности, и способов, позволяющих уменьшить негативное влияние этих особенностей. Представлены результаты расчета траекторий электронов отработанного пучка, подтверждающие перспективность предложенного метода пространственной сепарации электронов в скрещенных полях и возможности разработан-

ной системы рекуперации для достижения рекордных значений полного КПД гиротрона.

1. ПРИНЦИП СЕПАРАЦИИ

Метод пространственной сепарации электронов, лежащий в основе разработанной системы рекуперации, предполагает в дополнение к удерживающему пучок продольному магнитному полю B_z и тормозящему продольному электрическому полю E_z введение азимутального магнитного поля B_θ . В основе принципа сепарации лежит радиальный дрейф электронов в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях, скорость которого определяется отношением E_z/B_θ .

На рис. 1 представлены схематически траектории двух электронов с разной начальной энергией при их движении в области, где имеется магнитное поле с компонентами B_z и B_θ , а также электрическое поле, созданное с помощью электродов I и II под различными потенциалами. Вклад в радиальный дрейф в данной конфигурации электродов вносит продольная компонента электрического поля E_z . При этом продольный дрейф под действием полей $E_r \times B_\theta$ не влияет принципиально на сепарацию электронов. Величину напряженности электрического поля E_z можно регулировать наклоном секций-электродов. Скорость дрейфа $v_{др}$ зависит только от величин полей и не зависит от энергии электронов. Следовательно, дрейфовое расстояние определяется исключительно временем, в течение которого электрон находится в области скрещенных полей, а оно, в свою очередь, определяется начальной энергией электрона W (см. рис. 1). При надлежащем выборе величин полей может быть обеспечена пространственная сепарация электронов, достаточная для осаждения фракций пучка с разной энергией на различных секциях коллектора.

При движении электронов в тормозящем электрическом поле возможно изменение направления их продольной скорости на обратное. При наличии ведущего магнитного поля B_z такие отраженные электроны могут выходить из коллекторной области и достигать резонатора, если не обеспечен радиальный дрейф, достаточный для их осаждения на одной из секций коллектора. Взаимодействуя в резонаторе с высокочастотным полем, отраженные электроны могут отбирать от него энергию, что отрицательно влияет на величину выходной СВЧ-мощности. Однако таким влиянием в принципе можно пренебречь, если коэффициент отражении электронов от коллектора не превышает 1...2% [10].

Можно обосновать следующие основные требования к источникам электрического и магнитного полей, которые позволят реализовать эффективную многоступенчатую рекуперацию энергии отра-

ботанного пучка в гиротронах, основанную на описанном выше методе. Во-первых, дрейфовое расстояние, которое проходят электроны в радиальном направлении при их движении в области торможения до осаждения на одном из электродов, должно заметно превышать толщину стенки полого ВЭП. Таким образом будет обеспечено осаждение электронов на секциях коллектора без их отражения в сторону резонатора. Во-вторых, амплитуда электрического и магнитного полей должна изменяться незначительно вдоль продольной координаты z в области рекуперации. Это необходимо для сохранения приемлемых продольных размеров коллекторной системы, а также для более равномерного распределения температурной нагрузки на секции коллектора. В-третьих, в переходной области между резонатором и коллектором магнитное и электрическое поля должны изменяться в пространстве адиабатически. В случае неадиабатически меняющихся полей электроны могут приобретать дополнительную поперечную скорость, что увеличивает вероятность их отражения в сторону резонатора и приводит к снижению эффективности рекуперации, поскольку часть электронов может не достигать секции, потенциал которой соответствует их энергии, и осажаться на предыдущей по порядку секции под более положительным потенциалом.

2. РАЗРАБОТКА ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТОЙ КОЛЛЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГИРОТРОНА СПБПУ

Моделирование коллекторной системы было выполнено для импульсного гиротрона средней мощности 4-миллиметрового диапазона длин волн. Ранее в этом гиротроне были проведены комплексные экспериментальные исследования, направленные на поиск методов повышения качества ВЭП и, как следствие, эффективности работы прибора [9, 11, 12]. Основные параметры рабочего режима экспериментального гиротрона СПБПУ приведены ниже:

Ускоряющее напряжение U_0 , кВ	30
Ток пучка I_n , А	10
Частота генерации f_r , ГГц	74.2
Рабочая мода	$TE_{12,3}$
Длительность импульса тока пучка τ , мкс	30...60
Индукция магнитного поля в резонаторе $B_{рез}$, Тл	2.75

Электронный поток в нем формируется с помощью трехэлектродной магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Магнитная система гиротрона состоит из соленоидов, для питания которых исполь-

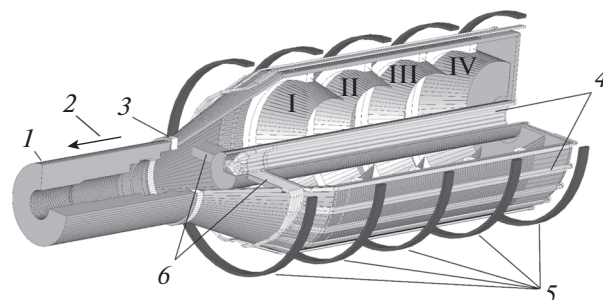


Рис. 2. Схематическое изображение модели коллектора: 1 – корпус гиротрона; 2 – направление к резонатору гиротрона; 3 – изолятор; 4 – тороидальный соленоид; 5 – катушки Гельмгольца; 6 – “жгуты” проводов; I–IV – секции коллектора.

зуется емкостной накопитель, работающий в режиме разовых импульсов.

Были сконструированы элементы коллекторной системы для реализации многоступенчатой рекуперации остаточной энергии пучка, основываясь на требованиях, приведенных в разд. 1. Трехмерное изображение модели коллектора гиротрона представлено на рис. 2. Моделирование коллекторной системы и расчеты траекторий электронов были выполнены с помощью программы трехмерного численного моделирования CST Studio Suite¹.

Для удержания электронного потока в области коллектора используется серия катушек Гельмгольца, создающих в сочетании с катушками магнитной системы гиротрона квазиоднородное распределение магнитного поля B_z вдоль продольной координаты z на длине области рекуперации. Азимутальное магнитное поле B_θ формируется с помощью соленоида с тороидальной намоткой. С входного торца этого соленоида, обращенного к резонатору, провода сгруппированы в два “жгута” для обеспечения доступа электронов в область рекуперации, где имеются скрещенные $E_z \times B_\theta$ поля. Намотка по внешнему радиусу может быть выполнена с помощью проводов с увеличенной площадью поперечного сечения для улучшения однородности распределения азимутального поля по азимуту в области рекуперации.

Четыре конических электрода I–IV являются ступенями рекуператора, служащими для торможения электронов и их осаждения на металлических стенках. Потенциалы секций уменьшаются в сторону от резонатора. Геометрические размеры секций были выбраны, исходя из требований разд. 1 и оценок дрейфовых расстояний электронов с разной энергией при заданных значениях E_z и B_θ . Корректировка размеров секций осуществ-

¹ Электронный ресурс: <http://www.cst.com>.

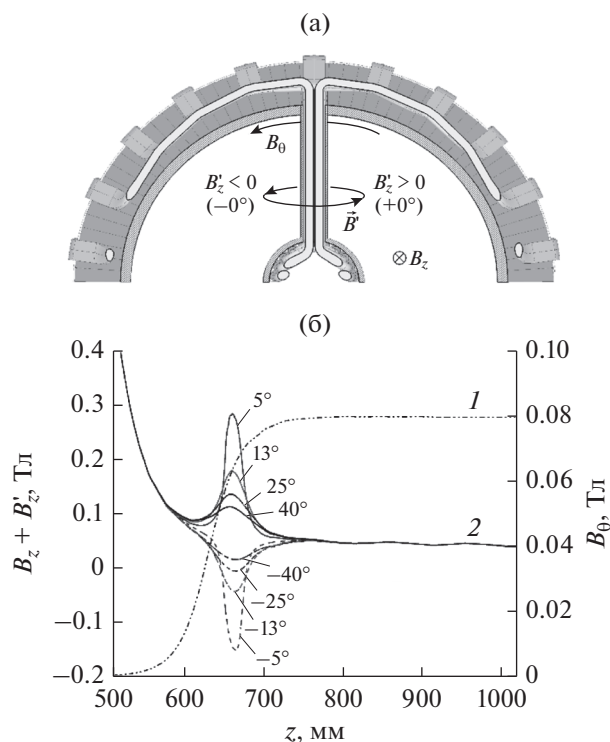


Рис. 3. Схематическое изображение сечения коллектора в плоскости “жгутов” тороидального соленоида (а); распределение индукции магнитного поля вдоль z (б): азимутальной компоненты $B_\theta(z)$ (1), а также суммарной продольной компоненты $B_z(z) + B'_z(z)$ (2) при разных значениях азимутальной координаты, отсчитываемой от центральной плоскости “жгута” в положительную $+\theta$ (сплошные линии) и отрицательную $-\theta$ (пунктирные линии) сторону.

лялась по результатам траекторного анализа (см. далее в разд. 3). Судя по этим результатам, практически все электроны осаждаются на внешних стенках секций (см. рис. 1). Изменяя их угол наклона, можно добиться уменьшения угла падения первичных электронов на поверхность, что дополнительно снижает тепловую нагрузку на коллектор. Эмитированные с коллектора вторичные электроны, в принципе, могут оказывать негативное влияние на работу прибора, если имеется возможность их попадания в резонатор. Однако при наличии скрещенных $E_z \times B_\theta$ полей и конусной форме электродов такая возможность практически исключена, что является одним из преимуществ рассматриваемого метода пространственной сепарации [7].

Рисунок 3 демонстрирует распределение компонент магнитного поля в коллекторной области. Здесь и далее отсчет вдоль продольной координаты z , совпадающей с осью прибора, ведется от центра эмитирующего пояса катода гиротрона. Область вблизи одного из “жгутов” при наблюдении от резонатора показана на рис. 3а. Ток, про-

текающий по проводам в “жгуте”, создает дополнительное магнитное поле B' в его окрестности. Продольная компонента этого поля имеет как попутное ($B'_z > 0$), так и встречное ($B'_z < 0$) направление по отношению к направлению основного поля B_z , создаваемого магнитной системой гиротрона и катушками Гельмгольца. На рис. 3б приведены продольная и азимутальная компоненты суммарного магнитного поля в зависимости от координаты z . Значения B_z , B'_z , B_θ для каждого z определяли при значении радиальной координаты r , совпадающей со средним радиусом ВЭП при его движении в поле магнитной системы гиротрона и катушек Гельмгольца и выключенном тороидальном соленоиде. Электроны, влетающие в рекуператор со стороны “ $+\theta$ ” (см. рис. 3а), могут оказаться в рекуператоре на слишком малых радиусах, когда пройденного ими дрейфового расстояния будет недостаточно, чтобы попасть на одну из секций. Такие электроны, очевидно, повышают коэффициент отражения от коллектора. Если электроны попадают в коллектор со стороны “ $-\theta$ ”, то около “жгута” направление результирующего продольного магнитного поля для таких электронов может меняться на противоположное. Подобный реверс магнитного поля приводит к заметному изменению поперечной скорости и возможному отражению электронов непосредственно на этом участке.

Чтобы уменьшить возмущающее действие магнитного поля “жгутов” на прохождение электронов в область рекуперации, в расчетах был использован секционированный катод. В этом катоде отсутствовала эмиссия с двух секторов эмитирующего пояса, азимутальное положение которых соответствовало положению “жгутов”. Основываясь на результатах траекторного анализа, был выбран оптимальный размер этих секторов в азимутальном направлении, равный 70° . При таком размере секторов отсутствуют электроны, проходящие в области реверса продольного магнитного поля (рис. 3б), и в целом заметно уменьшено отражение электронов от коллектора по сравнению с катодом с однородной эмиссией. В области рекуперации ($z > 750$ мм) продольная компонента индукции магнитного поля B_z слабо меняется вдоль координаты z и равна примерно 0.05 Тл.

Как показал выполненный ранее траекторный анализ [7], при $B_z = 0.05$ Тл средний радиус пучка равен $R_{cp} \approx 55$ мм, а его толщина $\Delta R \approx 3$ мм. В области рекуперации значение B_θ на среднем радиусе пучка равно примерно 0.08 Тл (см. рис. 3б). Оценки, полученные при решении уравнений движения электронов в полях, заданных аналитически [13], показывают, что дрейфовое расстояние для электронов при типичных значениях их начальной энергии заметно превышает ΔR . Например, при $B_z = 0.05$ Тл, $B_\theta = 0.08$ Тл и $E_z = 1$ кВ/см электрон за время до изменения направления

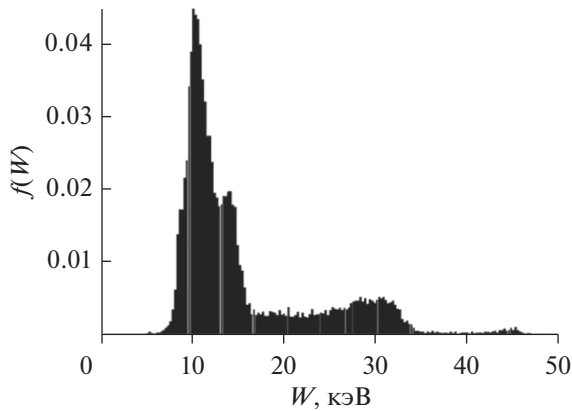


Рис. 4. Распределение электронов отработанного ВЭП по энергии в оптимизированном режиме работы гиротрона (электронный КПД $\eta_{эл} = 45\%$, $U_0 = 30$ кВ). Диапазон энергий электронов разбит на 400 интервалов.

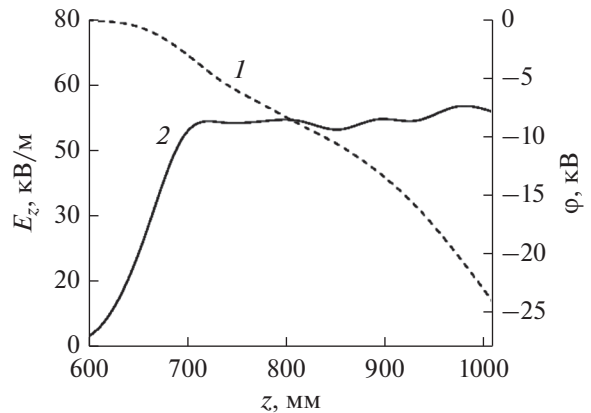


Рис. 5. Потенциал (1) и электрическое поле (2), определенные на радиусе, соответствующем среднему радиусу полого ВЭП, в зависимости от продольной координаты z при оптимизированных потенциалах секций коллектора.

продольной скорости на обратное смещается по радиусу на расстояние $\Delta R_{др}$ от 7 до 14 мм при изменении его начальной энергии от 8 до 38 кэВ. При этом следует учесть, что поскольку основная часть электронов осаждается на внешних стенках секций коллектора (см. рис. 1), то их дрейфовое расстояние превышает величину $\Delta R_{др}$.

3. ТРАЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ОТРАБОТАННОГО ВЭП В КОЛЛЕКТОРНОЙ ОБЛАСТИ ГИРОТРОНА

Для определения характеристик отработанного пучка были проведены расчеты электронных траекторий в электронно-оптической системе гиротрона и затем расчеты взаимодействия ВЭП с высокочастотным полем в резонаторе. В первом случае был использован вычислитель Tracking Solver, а во втором – PIC Solver, входящие в пакет моделирования CST Studio Suite. В качестве источника электронов использовали секционированный катод, описанный в разд. 2. В состав катодного узла МИП входил управляющий электрод, изменением потенциала которого можно было регулировать распределение электрического поля в прикатодной области [14]. Описанные ниже расчеты были выполнены для режима работы гиротрона, в котором за счет оптимизации распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП [9, 11, 14, 15] было обеспечено высокое качество пучка с низкими значениями скоростного и энергетического разбросов и высоким значением пичч-фактора $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$, равным примерно 1.52. В этом режиме вычисленное значение выходной СВЧ-мощности составило 138 кВт, а электронного КПД гиротрона – 46%. Поток, прошедший через резонатор и состоящий из примерно 25×10^3 частиц, служил входным интерфейсом для расчета электронных

траекторий в коллекторе. Энергетический спектр частиц в этом потоке показан на рис. 4.

Дальнейшей целью было достижение минимального значения мощности $P_{расс}$, рассеиваемой на стенках коллекторных секций, при достаточно малом отражении электронов в сторону резонатора, не превышающем 1.5%. Для этого изменяли внутренний радиус конусных секций, расстояние между секциями и их потенциалы ϕ_{I-IV} , а также азимутальное положение катодных секторов, в которых отсутствовала эмиссия электронов. Основное влияние на коэффициент отражения оказывает, очевидно, значение потенциала первой секции ϕ_I . Для обеспечения малого отражения величина $|e\phi_I|$ не должна заметно превышать минимальную энергию электронов в спектре отработанного ВЭП $W_{мин}$. В типичных режимах работы гиротрона $W_{мин}$ составляет 20...30% от eU_0 [3, 16], что позволяет реализовать достаточно эффективную рекуперацию энергии даже в одноступенчатой схеме. Важное влияние на коэффициент отражения электронов от коллектора оказывает также величина внутреннего радиуса первой секции и взаимное положение “жгутов” и катодных секторов с подавленной эмиссией.

В результате проведенной оптимизации были выбраны следующие значения потенциалов секций коллектора: $\phi_I = -7.72$ кВ, $\phi_{II} = -10.72$ кВ, $\phi_{III} = -14.72$ кВ, $\phi_{IV} = -24.72$ кВ. Потенциалы указаны относительно заземленного корпуса коллектора. Продольное распределение электрического поля и потенциала в коллекторе при данных потенциалах секций, определенное на радиусе, соответствующем среднему радиусу полого ВЭП, показано на рис. 5. Для обеспечения квазиоднородного продольного электрического поля в области рекуперации ($z > 750$ мм) у секций коллектора имелись цилиндрические основания (см. ниже на рис. 7),

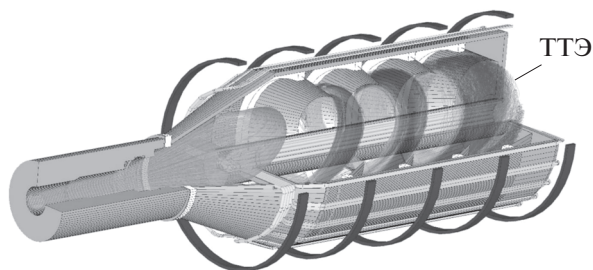


Рис. 6. Распространение обработанного ВЭП в коллекторной системе: ТТЭ – трехмерные траектории электронов; цилиндрические части секций, экранирующие рабочее пространство от заземленного корпуса коллектора, в целях наглядности траекторий не показаны.

экранирующие рабочее пространство от заземленного корпуса коллектора.

В результате расчета траекторий электронов в коллекторе с оптимизированной геометрией секций и указанными выше их значениями потенциалов Φ_{I-IV} было получено значение рассеиваемой на коллекторе мощности $P_{\text{расс}}$, равное 54.19 кВт, при токе отраженных электронов, составляющем 1.37% от $I_{\text{п}}$. На рис. 6 показаны рассчитанные 3D траектории электронов в этом режиме. Видно, что использование секционированного эмиттера обеспечивает прохождение электронов в область рекуперации без их осаждения на соединительных трубках “жгутов”.

Положение электронных траекторий в плоскости $r-z$ приведено на рис. 7. Для лучшей наглядности из всего потока частиц были выбраны траектории электронов, имеющих разные значения энергии, питч-фактора и радиальной координаты во входной плоскости $z = 320$ мм и проходящих примерно на равном удалении от “жгутов”. Входные значения параметров электронных траекторий указаны в табл. 1. Средний питч-фактор электронов во входной плоскости равен примерно 0.59. Поскольку обмен энергией между ВЭП и электромагнитным полем в резонаторе сопровождается изменением поперечной скорости электронов, то можно предположить, что с ростом энергии частиц в

Таблица 1. Входные параметры электронных траекторий

Номер траектории (см. рис. 7)	Энергия, кэВ	Питч-фактор	Радиус, мм
1	8.270	0.45	9.34
2	13.781	0.45	8.7
3	21.264	0.74	9.04
4	28.097	0.83	9.03
5	46.368	1.65	8.63

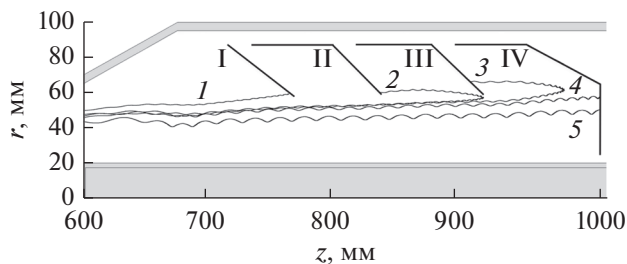


Рис. 7. Траектории электронов 1–5 (см. табл. 1) в плоскости $r-z$; I–IV – секции коллектора. Элементы магнитной системы на рисунке не показаны.

отработанном пучке возрастает и их питч-фактор. Представленные траектории демонстрируют корректную работу метода пространственной сепарации электронов в скрещенных $E_z \times B_\theta$ полях в разработанной коллекторной системе, обеспечивающей осаждение частиц с разной энергией на секциях под соответствующем потенциалом.

В рассмотренном режиме работы гиротрона полный КПД прибора составил

$$\eta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{вч}}}{P_{\text{вч}} + P_{\text{расс}}} = 71.8\%,$$

где $P_{\text{вч}} = 138$ кВт, $P_{\text{расс}} = 54.19$ кВт. Распределение мощности по электродам коллектора было следующим: мощности на секциях $P_I = 36.15$ кВт, $P_{II} = 4.79$ кВт, $P_{III} = 5.24$ кВт, $P_{IV} = 7.58$ кВт, мощность на корпусе коллектора $P_{\text{колл}} = 0.43$ кВт. КПД рекуперации при этом равен 66.5%. Видно, что в разработанной системе основная часть электронов осаждается на первой секции. Это является следствием необходимости уменьшения радиуса внутреннего отверстия этой секции и снижения величины $|e\Phi|$ для того, чтобы обеспечить относительно небольшое отражение электронов в сторону резонатора. Основными причинами отражения электронов и непопадания их на соответствующую секцию являются возмущающее действие магнитного поля “жгутов” и имеющийся разброс электронов по радиальным координатам на входе в рекуператор. Если допустимый порог отражения повысить, то можно добиться увеличения полного КПД.

Отметим, что для спектра обработанного ВЭП, показанного на рис. 4, в случае четырехступенчатого коллектора с идеальной сепарацией, когда любой из электронов попадает на секцию с потенциалом, соответствующим его энергии, максимальный полный КПД равен 81.2% для остаточной энергии электронов при их осаждении на секциях $W_{\text{ост}} > 0.5$ кэВ и 83.6% для $W_{\text{ост}} > 0$ (при отражении от коллектора, равном 1.37% от $I_{\text{п}}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной работы была разработана конструкция четырехступенчатого рекуператора, основанного на методе пространственной сепарации электронов в скрещенных азимутальном магнитном и аксиальном электрическом полях. Проведенное проектирование и численное моделирование показало, что практическая реализация многоступенчатых коллекторов возможна для импульсных гиротронов, таких как экспериментальный гиротрон СПбПУ.

Расчеты траекторий электронов показали возможность достижения необходимого пространственного разделения электронов с различными энергиями при наличии характерных разбросов радиальных координат и скоростей электронов. Недостатки предложенной коллекторной системы в основном связаны с локальными неоднородностями магнитного поля, создаваемыми “жгутами” проводов. Способом снижения негативного влияния этих неоднородностей на эффективность рекуперации может быть использование секционированного катода. В оптимальном режиме работы гиротрона был достигнут полный КПД 71.8% при КПД рекуперации 66.5% и токе отраженных от коллектора электронов, составляющем 1.37% от полного тока ВЭП.

С использованием данных моделирования была спроектирована и изготовлена четырехступенчатая коллекторная системы для гиротрона СПбПУ. Первые экспериментальные результаты показали возможности достижения значений полного КПД, равного 60% в одноступенчатом режиме, что позволяет надеяться на успешную реализацию и многоступенчатой схемы рекуперации. Возможности дальнейшего совершенствования разработанного метода рекуперации связаны, очевидно, с улучшением конструкции магнитной системы, обеспечивающей требуемое распределение азимутального магнитного поля.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-12-10010-П).

Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thumm M.* State-of-the-art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers, update 2017. Karlsruhe: Institute of Technology, 2018.
2. *Заневалов В.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 864.
3. *Morozkin M.V., Glyavin M.Y., Denisov G.G., Luchinin A.G.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2008. V. 29. № 11. P. 1004.
4. *Pagonakis I.Gr., Hogge J.-P., Alberti S. et al.* // IEEE Trans. 2008. V. PS-36. № 2. P. 469.
5. *Wu C., Pagonakis I.G., Avramidis K.A. et al.* // Phys. of Plasmas. 2018. V. 25. № 3. P. 033108.
6. *Wu C., Pagonakis I.G., Albert D. et al.* // Phys. of Plasmas. 2019. V. 26. № 1. P. 013108.
7. *Лукуша О.И., Трофимов П.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 18. С. 38.
8. *Louksha O.I., Trofimov P.A.* // Proc. 18th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2017). London. April 24–26. N.Y.: IEEE, 2017. P. 8289518.
9. *Louksha O.I., Sominski G.G., Arkhipov A.V. et al.* // IEEE Trans. 2016. V. PS-44. № 8. P. 1310.
10. *Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. № 26. P. 3532.
11. *Лукуша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Семен С.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 5. С. 132.
12. *Касьяненко Д.В., Лукуша О.И., Пиосчик Б. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. Вып. 5–6. С. 463.
13. *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991.
14. *Лукуша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Цанов А.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 6. С. 101.
15. *Лукуша О.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 5–6. С. 425.
16. *Manuilov V.N., Morozkin M.V., Luksha O.I., Glyavin M.Y.* // Infrared Phys. and Technol. 2018. V. 91. № 1. P. 46.