

Моделирование в гиротроне 4-мм диапазона длин волн с многоступенчатой рекуперацией

О.И. Лукша¹, П.А. Трофимов¹, А.Г. Малкин¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого (СПбПУ)

Аннотация: представлены результаты моделирования физических процессов в гиротроне средней мощности 4-мм диапазона длин волн излучения с секционированным электронным потоком. Оптимизированы характеристики электродов и магнитных катушек в коллекторе с четырехступенчатой рекуперацией с учетом распределения электронов по координатам и скоростям, полученного в результате траекторного анализа в электронно-оптической системе и расчета электронно-волнового взаимодействия в резонаторе. Показана возможность достижения полного КПД гиротрона равного примерно 79%, при токе отраженных от коллектора электронов, не превышающем 1% от полного тока электронного пучка.

Ключевые слова: СВЧ электроника, гиротрон, винтовой электронный поток, рекуперация энергии.

1. Введение

Рекуперация энергии отработанного электронного потока в коллекторе является одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности гиротронов. Системы одноступенчатой рекуперации активно используются в мегаваттных гиротронах (например, [1–3]). Дальнейшее повышение эффективности возможно в результате перехода к системам многоступенчатой рекуперации энергии, в которых за счет использования нескольких ступеней торможения частиц можно возвращать в электрическую сеть большую энергию. Для реализации многоступенчатой рекуперации необходимо обеспечить сепарацию в пространстве фракций электронного пучка с различной энергией электронов. Имеются определенные сложности в реализации подобной сепарации в гиротронах из-за наличия в коллекторе остаточного магнитного поля, удерживающего винтовой электронный поток (ВЭП). Развита подход к использованию азимутального электрического поля для осуществления многоступенчатой рекуперации в гиротронах [4,5]. В СПбПУ была предложена и теоретически исследована возможность сепарации электронов в продольном электрическом и азимутальном магнитном полях для реализации коллекторов с многоступенчатой рекуперацией в гиротронах [6]. В данной работе представлены новые результаты оптимизации модели коллектора с четырехступенчатой рекуперацией для гиротрона СПбПУ с частотой 74.2 ГГц и выходной мощностью примерно 100 кВт.

2. Экспериментальный гиротрон СПбПУ

Параметры расчетного рабочего режима гиротрона приведены в Табл. 1. В гиротроне СПбПУ электронный поток формируется с помощью трехэлектродной магнетронно-инжекторной пушки (МИП), что позволяет регулировать параметры ВЭП за счет изменения напряжения U_a между анодом и корпусом прибора. В состав катодного узла прибора также входит управляющий электрод, расположенный за термопояском катода, регулированием напряжения U_{cont} на котором можно оптимизировать распределение электрического поля в прикатодной области и уменьшать таким образом скоростной разброс электронов [10 – пока не по порядку].

Все расчеты были выполнены с помощью программы трехмерного моделирования CST Studio Suite [7]. Для получения подробной информации об отработанном ВЭП гиротрона и проведения на его основе траекторного анализа в коллекторной области гиротрона был выполнен анализ формирования ВЭП в электронно-оптической системе (ЭОС) гиротрона, а также проведена симуляция взаимодействия сформированного электронного потока с высокочастотным полем в резонаторе методом крупных частиц. Особенности использованных расчетных моделей описаны в [8, 9].

Таблица 1. Основные геометрические параметры гиротрона и характеристики его рабочего режима

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение	$U_0 = 30$ кВ
Ток пучка	$I_b = 10$ А
Индукция магнитного поля в области резонатора	$B_0 = 2.75$ Тл
Индукция магнитного поля у катода	$B_c = 0.152$ Тл
Рабочая мода	$TE_{12,3}$
Рабочая частота	$f_0 = 74.2$ ГГц
Радиус резонатора	$R_0 = 14.45$ мм
Средний радиус эмитирующего пояса катода	$R_c = 35$ мм
Средний питч-фактор	$\alpha = 1.3$

В рамках траекторного анализа в ЭОС гиротрона был произведен учет разброса начальных скоростей электронов, вызванного шероховатостью поверхности катода и разбросом тепловых скоростей, что отличает данную работу от выполненной ранее [9]. Как было показано в [11], скоростные характеристики электронов в ВЭП могут примерно совпадать для двух моделей катода: (а) шероховатого катода с неоднородностями на его поверхности в виде полусфер микронного размера с радиусом r_0 и (б) гладкого катода с максвелловским распределением начальных скоростей при повышенной эффективной температуре катода T^* и разбросе углов направления вектора начальной скорости $\Delta\varphi$. Для данных расчетов были выбраны значения $T^* = 67000$ К и $\Delta\varphi = \pm 90^\circ$, при которых разброс поперечных скоростей в ВЭП примерно соответствует разбросу, определенному в экспериментах с LaV₆ катодом в гиротроне СПбПУ [11]. Отметим, что дополнительный разброс энергии, равный примерно 2 эВ при $T^* = 67000$ К, заметно меньше разброса энергии, вызванного провисанием потенциала пучка [9]. Все значения скоростного и энергетического разброса, приведенные в данной работе, были определены как среднеквадратичные отклонения от среднего значения соответствующей величины. Поскольку эффективная температура T^* много больше реальной температуры термо катода, то разброс начальных скоростей, задаваемый в рамках данной модели, можно считать вызванным суммарным действием шероховатости поверхности катода и разбросом начальных тепловых скоростей.

Важной особенностью ЭОС данного гиротрона является использование секционированного катода. На эмитирующем пояске были выбраны два расположенных симметрично азимутальных сектора, с которых отсутствовала эмиссия электронов. Секционирование катода позволяет заметно уменьшить паразитное влияние связок тороидального соленоида, используемого для создания азимутального магнитного поля, на эффективность рекуперации остаточной энергии электронов и на отражение электронов от коллектора [9]. В рамках данного расчета протяженность этих секторов в азимутальном направлении $\Delta\theta = 45^\circ$.

В результате траекторного анализа в ЭОС гиротрона при оптимизированных напряжениях U_a и U_{cont} был реализован режим работы с высоким пич-фактором $\alpha = 1.56$ и разбросом поперечных скоростей $\delta v_{\perp} = 5.32$. В данном режиме коэффициент отражения электронов от магнитной пробки был равен примерно $4 \cdot 10^{-4}$, что меньше порогового значения, при котором в пространственном заряде, захваченном в ловушку между катодом и резонатором, могут развиваться паразитные низкочастотные колебания [13].

Расчеты взаимодействия электромагнитного поля с секционированным ВЭП в резонаторе, выполненные при различной индукции магнитного поля в резонаторе B_0 , показали, что максимальная выходная СВЧ-мощность достигается при $B_0 = 2.747$ Тл. Суммарная высокочастотная мощность при генерации на рабочей моде $TE_{12,3}$ составляла 134.8 кВт, что соответствует электронному КПД $\eta_{el} = 44.9\%$ при $U_0 = 30$ кВ, $I_b = 10$ А. Данные о координатах, скоростях и зарядах крупных частиц в отработанном ВЭП, необходимые для выполнения траекторного анализа в коллекторной области, регистрировались с помощью монитора частиц, установленного в выходной плоскости резонаторной области. Полученный массив данных содержал информацию о примерно $2 \cdot 10^4$ частицах.

3. Конструкция коллектора

Работа рекуператора в гиротроне СПБПУ основана на пространственной сепарации электронных фракций ВЭП с разной энергией в скрещенных продольном электрическом E_z и азимутальном магнитном B_{θ} полях [6, 9]. Преимуществом коллекторов на базе данного метода сепарации, отличающих их от многоступенчатых коллекторов с азимутальным электрическим полем (например, [5]) или с неадиабатическими полями (например, [12]), является довольно протяженная область, в которой частицы двигаются в скрещенных полях. Это позволяет уменьшить негативное влияние скоростного и позиционного разброса электронов, а также неконтролируемых нарушений юстировки электродов и магнитных катушек на работу рекуператора, в частности на увеличение потока частиц, отраженных от коллектора в сторону резонатора, и на снижение эффективности рекуперации из-за того, что электроны не попадают на нужную секцию, а оседают на секции под более положительным потенциалом.

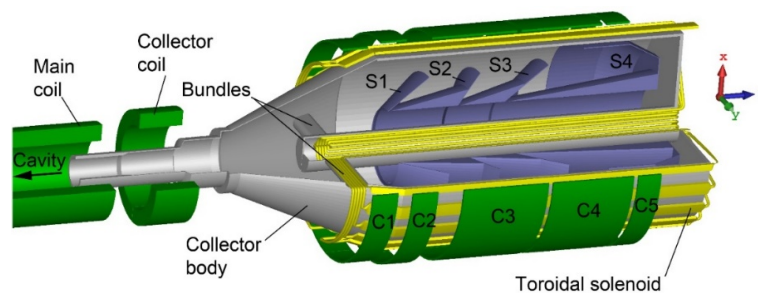


Рисунок 1. Схематическое изображение коллекторной области гиротрона

Модернизированный коллектор, описанный в настоящей работе, отличается от его первоначальной версии [9] измененной геометрией магнитных катушек и секций рекуператора. Основные элементы коллектора для гиротрона СПБПУ схематически показаны на рисунке 1. В цилиндрической части корпуса коллектора расположены секции S1–S4 под отрицательными потенциалами, используемые для создания электрического поля. Дрейф электронов в скрещенных E_z и B_{θ} полях направлен в сторону меньших радиусов вследствие положительного направления поля B_{θ} . Наружные радиусы секций выбраны таким образом, чтобы при отсутствии

напряжений на секциях частицы беспрепятственно осаждались на секции S4.

Корректирующие катушки C1-C5 в комбинации с магнитной системой гиротрона, включающей основную, катодную и коллекторную катушки, обеспечивают требуемое распределение продольного магнитного поля. Для создания азимутального магнитного поля применяется соленоид с тороидальной намоткой. Торцевые проводники этого соленоида со стороны, ближней к резонатору, собраны в две радиальные связки, располагающиеся в соединительных трубках. Внутренний радиус цилиндрической части корпуса коллектора равен 104.5 мм, продольная координата z , соответствующая переходу от конусной к цилиндрической части коллектора, равна $z = 667$ мм, а координата z , соответствующая середине соединительных трубок со связками, $-z = 619$ мм ($z = 0$ мм соответствует центру катода МИП гиротрона).

В процессе поиска оптимального распределения магнитного поля регулировались геометрия и ток корректирующих катушек C1-C5, а также ток тороидального соленоида. Траектории электронов, двигающихся рядом со связками тороидального соленоида, могут искривляться под действием локальных магнитных полей, связанных с протеканием тока в этих связках [14]. Такие электроны могут не достичь секции с потенциалом, соответствующим их энергии, а осесть на других электродах коллектора, либо отразиться от коллектора в сторону резонатора. Для уменьшения влияния локальных полей на электроны было произведено секционирование электронного потока, описанное выше. Азимутальное положение связок коллектора в модели корректировалось для достижения минимума отражения частиц от коллектора.

4. Траекторный анализ в коллекторе с 4-ступенчатой рекуперацией

На рисунке 2 показано положение частиц в плоскости $x-z$, полученное как результат пересечения винтообразных электронных траекторий с этой плоскостью. Можно видеть, что, двигаясь в тормозящем электрическом поле в области рекуперации, электроны смещаются под действием скрещенных E_z и B_θ полей в радиальном направлении. Часть электронов осаждаются на задних стенках секций после изменения направления их продольного движения. С ростом начальной энергии электронов они проходят большее расстояние вдоль оси z и осаждаются на секции под более отрицательным потенциалом.

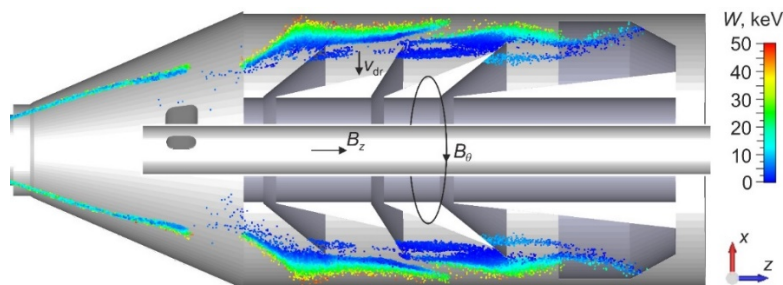


Рисунок 2. Положение частиц на плоскости $x-z$ (цвет соответствует энергии частиц W).

В результате серии расчетов электронных траекторий отработанного ВЭП в коллекторе были получены оптимизированные значения потенциалов секций, при которых достигается максимальный полный КПД гиротрона при коэффициенте отражения электронов от коллектора менее 1%. При $U_{S1} = -7,1$ кВ, $U_{S2} = -10,7$ кВ, $U_{S3} = -14,3$ кВ, $U_{S4} = -25,2$ кВ (потенциал корпуса коллектора $U_{coll} = 0$) значения мощности, рассеиваемой на секциях и корпусе, составили соответственно $P_{S1} = 6,2$ кВт, $P_{S2} = 6,2$ кВт, $P_{S3} = 11,7$ кВт, $P_{S4} = 10,2$ кВт, $P_{coll} = 1,2$ кВт при коэффициенте отражения от коллектора 0.99%. Суммарная мощность P_{diss} , рассеиваемая на коллекторе, таким образом равняется 35,5 кВт. При выходной СВЧ-мощности 134.8 кВт полный КПД

гиротрона равен 79,2%, а КПД коллектора (рекуперации) – 78,5%. Таким образом проведенная оптимизация модели коллектора позволила добиться полного КПД более 79%, что значительно улучшило показатели первоначальной версии коллектора для гиротрона СПбПУ [9], в которой полный КПД был равен 71.8%.

5. Заключение

Выполненное в данной работе комплексное моделирование показало возможность достижения рекордных значений полного КПД гиротрона средней мощности 4-мм диапазона длин волн, достигнутое в результате повышения качества ВЭП в электронно-оптической системе и рекуперации остаточной энергии электронов в многоступенчатой коллекторной системе.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00136)**.

Список литературы

1. Sakamoto K. et al. Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery //Physical review letters. – 1994. – Т. 73. – №. 26. – С. 3532.
2. Glyavin M. Y. et al. Experimental investigation of a 110 GHz/1 MW gyrotron with the one-step depressed collector //International journal of infrared and millimeter waves. – 1997. – Т. 18. – С. 2129-2136.
3. Manuilov V. N. et al. Gyrotron collector systems: Types and capabilities //Infrared Physics & Technology. – 2018. – Т. 91. – С. 46-54.
4. Pagonakis I. G. et al. A new concept for the collection of an electron beam configured by an externally applied axial magnetic field //IEEE transactions on plasma science. – 2008. – Т. 36. – №. 2. – С. 469-480.
5. Ell B. F. et al. Toward the First Continuous Wave Compatible Multistage Depressed Collector Design for High Power Gyrotrons //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2023. – Т. 70. – №. 3. – С. 1299-1305.
6. Лукша О. И., Трофимов П. А. Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах //Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. – №. 18. – С. 38-45.
7. CST Studio Suite. Electromagnetic field simulation software [Электронный ресурс] Режим доступа:<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
8. Лукша О. И., Трофимов П. А. Моделирование неоднородных электронных потоков в электронно-оптической системе гиротрона //Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88. – №. 4. – С. 614-620.
9. Лукша О. И., Трофимов П. А. Высокоэффективный гиротрон с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов //Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – №. 12. – С. 1988-1996.
10. Лукша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Цапов А.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 101–105.
11. Лукша О.И, Трофимов П.А, Малкин А.Г. Траекторный анализ в электронно-оптической системе гиротрона с учётом шероховатости поверхности катода // Известия высших учебных заведений. – 2022. – Т. 65. – №. 3. – С. 226-237.
12. Read M. E. et al. Depressed collectors for high-power gyrotrons //IEEE Transactions on Electron Devices. – 1990. – Т. 37. – №. 6. – С. 1579-1589.
13. Лукша О. И, Самсонов Д.Б, Соминский Г.Г, Семин С.В. Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов //Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 5. – С. 132-140.
14. Лукша О. И, Трофимов П. А, Мануилов, В. Н, Глявин М. Ю. Траекторный анализ в коллекторе с многоступенчатой рекуперацией энергии для прототипа гиротрона ДЕМО. Часть I. Идеализированное распределение магнитного поля //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 1. – С. 125-130.