УДК 621.385

Разработка коллекторов с многоступенчатой рекуперацией для гиротронов

О.И. Лукша, П.А. Трофимов, Б.Д. Ушеренко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: в данной работе выполнено сравнение результатов моделирования коллекторов с 4-х ступенчатой рекуперацией для гиротрона СПбПУ с частотой 74,2 ГГц и прототипа гиротрона с частотой 250 ГГц, разрабатываемого для проекта DEMO. Для пространственной сепарации электронов с разной энергией используется азимутальное магнитное поле, создаваемое тороидальным соленоидом. Показана возможность достижения полного КПД более 80 %, близкого к максимальному КПД при идеальной сепарации фракций электронного пучка с разной энергией, за счет выбора оптимальных параметров тороидального соленоида.

Ключевые слова: СВЧ электроника, гиротрон, винтовой электронный поток, коллектор, рекуперация

1. Введение

Гиротроны являются наиболее эффективными генераторами СВЧ излучения большой мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Электронный КПД мощных гиротронов, который характеризует эффективность передачи энергии от винтового электронного потока (ВЭП) к высокочастотному полю в резонаторе, как правило, не превышает 30 – 40 % (например, [1, 2]). Однако полный КПД гиротрона может быть повышен при использовании коллектора с системой рекуперации энергии отработанного электронного потока. В таком коллекторе электроны тормозятся электрическим полем, тем самым "возвращая" часть остаточной энергии, не переданной электромагнитному полю, обратно в электрическую сеть. Системы одноступенчатой рекуперации широко применяются в гиротронах мегаваттного уровня мощности, используемых для нагрева плазмы и управления током в установках управляемого термоядерного синтеза. Это позволяет увеличить их полный КПД до 1,5 раз по сравнению с электронным КПД в отсутствии рекуперации [3-5]. Дальнейшее повышение эффективности работы гиротрона возможно за счет использования коллектора с многоступенчатой рекуперацией, в котором происходит раздельное торможение фракций электронного потока с разной энергией. Показано, что пространственное разделение электронов с разной энергией может быть достигнуто в результате их радиального дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях [6-8]. В последнее время в СПбПУ были проведены исследования, в которых для такого дрейфа используется азимутальное магнитное поле [7, 9, 10].

В данной работе обсуждаются результаты моделирования коллекторов с четырехступенчатой рекуперацией для гиротрона СПбПУ с частотой 74,2 ГГц (например, [11, 12]) и гиротрона с частотой 250 ГГц, разработанного как прототип гиротрона для проекта DEMO [13]. Все расчеты были выполнены с помощью программного пакета 3*D*-моделирования CST Studio Suite [14].

2. Особенности конструкций коллекторов с рекуперацией

В коллекторной области гиротронов присутствует относительно сильное магнитное поле, что затрудняет реализацию систем многоступенчатой рекуперации, опробованных в вакуумных СВЧ приборах типа клистронов, ламп бегущей и обратной

волны и др. Для гиротронов перспективным является применение метода, основанного на использовании скрещенных продольного электрического и азимутального магнитного полей, который позволяет обеспечить разделение в пространстве электронов с разной энергией и осаждение их на секции коллектора под различными потенциалами [7].

На рисунке 1 изображена модель коллектора для гиротрона СПбПУ. Рекуперация осуществляется в цилиндрической части корпуса коллектора 1, где расположены электроды-секции I-IV под тормозящими потенциалами. В этой области корректирующие катушки 2 в комбинации с основной магнитной системой гиротрона (не показана на рисунке) создают близкое к однородному продольное магнитное поле. Тороидальный соленоид 3 используется для формирования азимутального магнитного поля, которое концентрируется в области, ограниченной наружной и внутренней обмотками и торцевыми проводниками. Торцевые проводники, расположенные со стороны, ближней к резонатору, препятствуют прохождению электронов в область рекуперации. В данной конструкции эти проводники собраны в две радиальные связки 4. Это повышает долю электронов, прошедших в область рекуперации. Однако при этом в прилегающей к связкам области увеличивается амплитуда паразитного магнитного поля, которое негативно влияет на проходящие там траектории электронов. Из-за действия этого поля возникает разброс радиального положения ведущих центров электронных траекторий в области рекуперации. Такой разброс приводит к снижению эффективности рекуперации, поскольку часть электронов после изменения направления продольной скорости могут не попасть на секцию, потенциал которой соответствует их энергии, а осесть на секциях под более положительным потенциалом. Имеется также вероятность выхода этих электронов из коллекторной области и попадания в резонатор.

Новые решения по снижению паразитного влияния связок были найдены при моделировании коллектора для прототипа гиротрона DEMO (рисунок 2). В этом гиротроне индукция продольного магнитного поля в области рекуперации в 2,5 раза меньше по сравнению с гиротроном СПбПУ при одинаковой индукции азимутального поля (см. таблицу 1). Это приводит к более заметному разбросу радиального положения электронных траекторий. Анализ сил, действующих на электроны в области связок, показал, что положительного результата можно добиться при смене направления азимутального магнитного поля с положительного B_{0+} , как в гиротроне СПбПУ, на отрицательное B_{0-} . В этом случае меняется направление силы Лоренца,



Рисунок 1. Схематическое изображение коллектора гиротрона СПбПУ: 1 – корпус коллектора; 2 – корректирующие катушки; 3 – тороидальный соленоид; 4 – связки торцевых проводников; I-IV – секции коллектора.



Рисунок 2. Схематическое изображение коллектора прототипа гиротрона DEMO: 1 – корпус коллектора; 2 – корректирующие катушки; 3 – тороидальный соленоид; 4 – связки торцевых проводников; I-IV – секции коллектора.

которая действует на электроны, двигающиеся в продольном направлении, при влете в область с азимутальным магнитным полем. Эта сила будет смещать электроны в сторону бо́льших радиусов при отрицательном поле B_{θ} . Радиальное смещение электронов происходит также в результате действия силы, связанной с изменением продольного магнитного поля вдоль координаты z. При отрицательном поле B_{θ} одна из сил частично компенсирует другую, что приводит к уменьшению разброса радиального положения электронных траекторий. Дополнительного снижения этого разброса можно добиться в результате выбора оптимальных значений длины конусной части тороидального соленоида L и угла наклона этой конусной части γ (см. рисунок 2).

Смена направления азимутального поля неизбежно приводит к необходимости изменения геометрии секций коллектора, поскольку при положительном поле B_{θ_+} электроны дрейфуют в сторону бо́льших радиусов, а при отрицательном поле B_{θ_-} – в сторону меньших (ср. рисунки 1 и 2). При конусной форме секций амплитуда продольной компоненты электрического поля E_z меняется незначительно вдоль координаты *z* в области рекуперации.

Выбор геометрии секций, их потенциалов, амплитуд компонент магнитного поля определяется параметрами отработанного электронного пучка, прошедшего через резонатор. В гиротроне СПбПУ в качестве входного интерфейса для выполнения траекторного анализа в коллекторной области были использованы данные о примерно $25 \cdot 10^3$ частиц, полученные после *PIC*-моделирования взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем в резонаторе [9]. В гиротроне DEMO параметры отработанного пучка задавались "вручную" – в центральной плоскости резонатора располагались 936 центров эмиссии, каждый из которых являлся источником 76 частиц с различными значениями начальной энергии, заряда, питч-фактора и фазы циклотронного вращения [10]. Энергии частиц задавались по типичному энергетическому спектру отработанного пучка в мощных гиротронах.

Несмотря на предпринятые меры по снижению влияния паразитного магнитного поля связок, еще остается возможность для электронов, двигающихся в непосредственной близости от связок, изменить в этой области направление продольной скорости и отразиться от коллектора в сторону резонатора. Для того, чтобы исключить заметное отражение электронов от коллектора, в обоих гиротронах было выполнено секционирование электронного пучка. В гиротроне СПбПУ для этого применялся секционированный катод, у которого отсутствовала эмиссия электронов с двух (по числу связок тороидального соленоида) азимутальных секторов эмитирующего пояска [9]. В гиротроне DEMO секционирование пучка было выполнено в плоскости расположения центров эмиссии.

3. Результаты траекторного анализа в коллекторной области гиротронов

Основные рабочие параметры гиротронов, а также результаты траекторного анализа, выполненного в их коллекторной области, представлены в таблице 1. Для получения высокого электронного КПД в гиротроне СПбПУ были предприняты меры по повышению качества ВЭП при регулировании распределений электрического и магнитного полей в области формирования пучка [9]. Уменьшенное значение продольного магнитного поля в коллекторной области гиротрона DEMO связано с увеличения радиуса цилиндрической части необходимостью коллектора $R_{\text{колл}} = 160$ мм с тем, чтобы в перспективе перейти на более мощные режимы работы этого гиротрона с большой длительностью импульса. Указанные в таблице 1 значения напряжений U_I-U_{IV}, подаваемых на секции коллектора, были определены после обработки энергетических спектров отработанного ВЭП. При этих значениях достигает максимума полный КПД гиротрона в случае идеальной сепарации, при которой каждая энергетическая фракция пучка осаждается на соответствующей ее энергии секции коллектора. Корпус коллектора был соединен с корпусом гиротрона.

Видно, что меры по оптимизации параметров тороидального соленоида, предпринятые в гиротроне DEMO, привели к заметному улучшению качества работы рекуператора по сравнению с гиротроном СПбПУ: увеличены КПД рекуперации и полный КПД гиротрона, тепловая нагрузка более равномерно распределена по секциям коллектора, снижено отражение от коллектора, уменьшен размер секторов ВЭП, в которых отсутствует эмиссия. Следует при этом отметить, что некоторого

Параметр		СПбПУ	DEMO
Ускоряющее напряжение U, кВ		30	55
Ток пучка I _п , А		10	10
Индукция магнитного поля в области резонатора В ₀ , Тл		2,75	9,57
Выходная СВЧ мощность Р _{вых} , кВт		138	198
Электронный КПД _{дэл} , %		46	36
Индукция продольного магнитного поля в рекуператоре B_z , Тл		0,04	0,016
Индукция азимутального магнитного поля в рекуператоре $B_{ heta}$, Тл		0,08	0,08
Направление азимутального магнитного поля в рекуператоре		$B_{ heta+}$	$m{B}_{ heta-}$
Потенциалы секций коллектора,	первой U _I , кВ	-7,72	-23,6
	второй U_{II} , к B	-10,72	-29,1
	третьей $U_{\rm III}$, кВ	-14,72	-32,4
	четвертой $U_{\rm IV}$, кВ	-24,72	-37,8
Протяженность секторов, в которых отсутствует эмиссия, град.		70	45
Мощность, рассеиваемая на секциях,	первой <i>Р</i> і, кВт	36,15	9,03
	второй Р _{ІІ} , кВт	4,79	5,61
	третьей $P_{\rm III}$, кВт	5,24	11,50
	четвертой <i>Р</i> _{IV} , кВт	7,58	12,84
Мощность, рассеиваемая на корпусе коллектора <i>Р</i> корп, кВт		0,43	0,42
Суммарная мощность, рассеиваемая на коллекторе $P_{\text{колл}}$, кВт		54,19	39,4
Коэффициент отражения от коллектора $K_{ m orp} = I_{ m orp}/I_{ m n}$, %		1,37	0,35
КПД рекуперации, $\eta_{\text{колл}}$, %		66,5	88,8
Полный КПД η _п , %		71,8	83,4

Таблица 1. Параметры рабочего режима и данные траекторного анализа в коллектора	ax c
4-х ступенчатой рекуперацией для гиротрона СПбПУ и прототипа гиротрона DE	MO

снижения полного КПД гиротрона DEMO можно ожидать, если в расчетах вместо ВЭП с упрощенным энергетическим спектром будет использоваться электронный поток, полученный в результате численного моделирования процессов в резонаторе данного гиротрона. В рамках такого моделирования может быть использован первичный ВЭП, сформированный В электронно-оптической системе с секционированным эмиттером. Однако, если принять во внимание результаты подобного моделирования в гиротроне СПбПУ [9], то возможное снижение электронного КПД и эффективности рекуперации при переходе к ВЭП с параметрами, в большей степени приближенным к реальным условиям, будет не велико и не сможет заметно ослабить положительный эффект, достигнутый в результате оптимизации параметров тороидального соленоида.

4. Заключение

Выполненное моделирование подтверждает перспективы нового метода пространственной сепарации электронов отработанного пучка, основанного на их дрейфе в скрещенных аксиальном электрическом и азимутальном магнитном полях, для построения систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах. Сравнение результатов моделирования коллекторов с 4-х ступенчатой рекуперацией, выполненное для гиротрона СПбПУ и прототипа гиротрона DEMO, показало, что найденные решения по оптимизации параметров тороидального соленоида позволяют добиться заметного повышения эффективности работы рекуператора.

Список литературы

- 1. Litvak A. G. et al. Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion //J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2011. T. 32. №. 3. C. 337-342.
- 2. Запевалов В. Е. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД //Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. №. 10. С. 864-871.
- 3. Sakamoto K. et al. Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery //Phys. Rev. Lett. 1994. T. 73. №. 26. C. 3532-3535.
- 4. Glyavin M. Y. et al. Experimental investigation of a 110 GHz/1 MW gyrotron with the one-step depressed collector //Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. T. 18. №. 11. C. 2129-2136.
- 5. Manuilov V. N. et al. Gyrotron collector systems: Types and capabilities // Infrared Physics & Technology. 2018. T. 91. C. 46-54.
- 6. Pagonakis I. et al. A new concept for the collection of an electron beam configured by an externally applied axial magnetic field //IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. T. 36. №. 2. C. 469-480.
- 7. Лукша О. И., Трофимов П. А. Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах //Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. №. 18. С. 38-45.
- 8. Wu C. et al. Gyrotron multistage depressed collector based on E × B drift concept using azimuthal electric field. I. Basic design //Phys. Plasmas. 2018. T. 25. №. 3. C. 033108.
- 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. и др. Траекторный анализ в коллекторе с многоступенчатой рекуперацией энергии для прототипа гиротрона DEMO. Часть І. Идеализированное распределение магнитного поля //Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 1. С. 125-130.
- 11. Лукша О. И. и др. Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 5. С. 132-140.
- 12. Louksha O. I. et al. Experimental study of gyrotron efficiency enhancement by improvement of electron beam quality // Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, IRMMW-THz2007. Cardiff, UK. 2007. C. 880-881.
- 13. Glyavin M. et al Two-stage energy recovery system for DEMO gyrotron //Proc. 43rd Int. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Nagoya, Japan. 2018. C. 8510139.
- 14.Электронный ресурс.Режим доступа:https://www.3ds.com/products-
services/simulia/products/cststudio-suite/