

Измерения в гиротроне с многоступенчатой системой рекуперации остаточной энергии электронов

О.И. Лукша, А.Г. Малкин, П.А. Трофимов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: коллектор с многоступенчатой рекуперацией нового типа был изготовлен и протестирован в экспериментах с гиротроном 4-мм диапазона длин волн. Представлены результаты первых экспериментов, в которых были достигнуты значения полного КПД $\sim 70\%$ для четырехступенчатой и $\sim 72\%$ для пятиступенчатой систем рекуперации. Обсуждаются возможности дальнейшего увеличения эффективности гиротрона.

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

1. Введение

В настоящее время гиротроны занимают лидирующее положение среди источников мощного СВЧ-излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [1]. Они практически незаменимы в таком важном приложении как нагрев плотной плазмы и управление током в установках с магнитным удержанием, предназначенных для исследования способа получения энергии с помощью управляемого термоядерного синтеза. Повышение эффективности гиротронов – это одна из основных задач, стоящих сегодня перед разработчиками таких устройств. При использовании коллекторов с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов полный КПД гиротронов может быть повышен до 50–60 % [2 – 4]. Дальнейшее повышение эффективности возможно при использовании систем с многоступенчатой рекуперацией. В таких коллекторах требуется обеспечить пространственное разделение фракций отработанного винтового электронного пучка (ВЭП) с разной энергией. Сложности реализации многоступенчатых коллекторов в гиротронах связаны с наличием остаточного магнитного поля в коллекторной области, а также с имеющимся в отработанном ВЭП разбросом электронов по скоростям и координатам [5 – 7].

В СПбПУ был разработан способ пространственной сепарации электронов ВЭП в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях [8]. На базе данного метода были спроектированы многоступенчатые коллекторы для различных гиротронов [9, 10]. В данной статье представлены данные первых экспериментов, которые были выполнены в гиротроне СПбПУ с частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью ~ 100 кВт с 4-х ступенчатым коллектором.

2. Особенности конструкции гиротрона

Гиротрон СПбПУ оснащен набором диагностик, предназначенных для определения параметров ВЭП и характеристик выходного СВЧ-излучения [11, 12]. В частности, имеется возможность определять азимутальное распределение плотности тока эмиссии с катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Для этого измеряется ток электронов, прошедших через малое отверстие диаметром 1 мм в аноде, в зависимости от азимутального положения катода в отсутствие магнитного поля. Расчетный рабочий режим гиротрона характеризуется ускоряющим напряжением $U_0 = 30$ кВ, током пучка $I_n = 10$ А и индукцией магнитного поля в резонаторе $B_0 \approx 2,75$ Тл.

Коллектор гиротрона был спроектирован и изготовлен, основываясь на результатах численного моделирования, описанного в работе [13]. В расчетах и в экспериментах был использован секционированный эмиттер, у которого с двух секторов длиной $\Delta\theta$ отсутствовала эмиссия электронов (см. ниже). Полученный в расчетах [13] оптимальный режим работы гиротрона с максимальным полным КПД характеризуется следующими параметрами: 1) в поступающем в резонатор секционированном ВЭП ($\Delta\theta = 45^\circ$) средний пич-фактор равен 1,55, а СКО-значение разброса поперечной скорости равно 5,26%; 2) выходная СВЧ-мощность на рабочей моде $TE_{12,3}$ равна 135,3 кВт, а электронный КПД равен 45,1% ($B_0 = 2,747$ Тл); 3) при оптимизированных параметрах 4-х ступенчатой коллекторной системы полный КПД гиротрона равен 79,66% при коэффициенте отражения электронов от коллектора 0,99%. Модель коллектора, использованная в расчетах, показана на рис. 1.

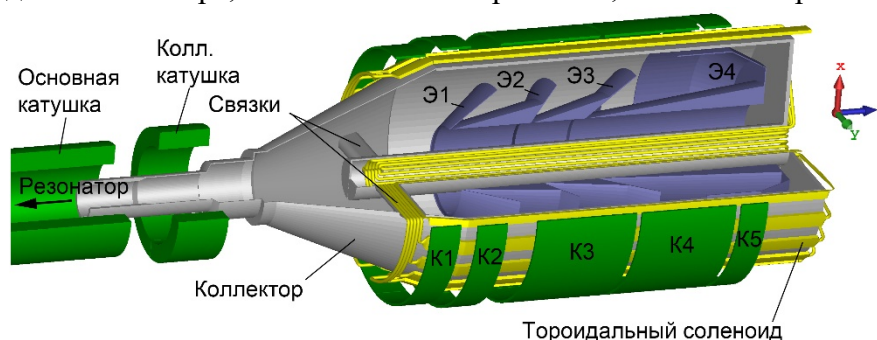


Рисунок 1. Схематическое изображение коллекторной области гиротрона: Э1–Э4 – коллекторные электроды под отрицательными потенциалами; К1–К5 – корректирующие катушки.

Фотография коллекторной области гиротрона приведена на рис. 2(а). Для поглощения выходной СВЧ-мощности используется калориметрическая нагрузка проходного типа, установленная между резонатором и коллектором в области коллекторной катушки. Высоковольтный изолятор отделяет корпус коллектора от заземленного корпуса гиротрона. Это позволяет измерять ток электронов, осаждающихся на корпусе коллекторе, а также подавать на него задерживающее напряжение (не более ~ 3 кВ).

В гиротроне используется импульсная магнитная система. Корректирующие катушки К1–К5 предназначены для оптимизации распределения продольного магнитного поля в коллекторе. Азимутальное магнитное поле создается с помощью соленоида с тороидальной намоткой. Торцевые проводники этого соленоида со стороны, ближней к резонатору, собраны в две связки (рис. 1). При использовании секционированного ВЭП снижается негативное влияние магнитного поля этих связок на траектории электронов в коллекторной области [13].

Электрическое поле в коллекторной области создается с помощью четырех электродов конусной формы, изолированных друг от друга и от корпуса коллектора (рис. 1 и рис. 2). Электроды располагаются в цилиндрической части корпуса с внутренним радиусом 104,5 мм. Радиус основания конуса первого электрода Э1 равен 79,5 мм. Электроды были закреплены на основании из фторопласта, показанном на рис. 2(б). Это основание, в свою очередь, крепилось к внутренней трубе коллектора, внутри которой располагаются проводники внутренней обмотки тороидального соленоида. Напряжения на электродах $U_{Э1}-U_{Э4}$, $U_{колл}$ в проведенных экспериментах создавались за счет протекания токов через электроды $I_{Э1}-I_{Э4}$, $I_{колл}$ и резисторы с известным сопротивлением $R_{Э1}-R_{Э4}$, $R_{колл}$, подключенные последовательно. В этом случае на электродах коллектора создается отрицательный потенциал относительно заземленного корпуса гиротрона.

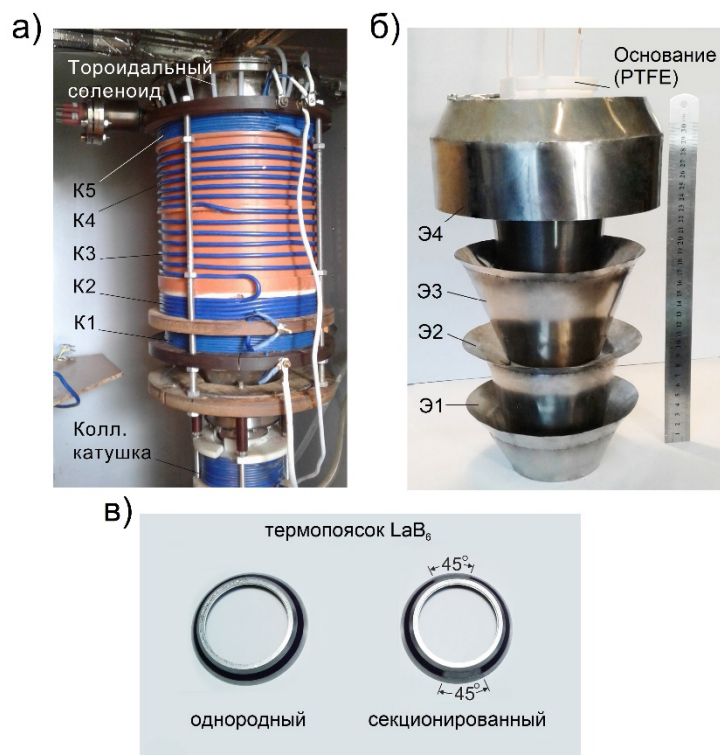


Рисунок 2. Фотографии а) коллектора гиротрона, б) коллекторных электродов, в) однородного и секционированного эмитирующих поясков.

На рис. 2(в) показаны фотографии стандартного гексаборид лантанового эмиссионного пояска с однородным покрытием и использованного в проведенных экспериментах секционированного пояска с длиной секторов без эмиссионного покрытия $\Delta\theta = 45^\circ$. Гиротрон эксплуатировался в режиме разовых импульсов длительностью десятки микросекунд с паузой между импульсами ~ 1 минута.

3. Экспериментальные результаты

Тестовые эксперименты были выполнены в режиме, когда отсутствовала выходная СВЧ-мощность ($I_n < 3$ А) и не подавались напряжения на электроды коллектора ($R_{Э1-R_{Э4}}, R_{колл} = 0$). Было выбрано азимутальное положение катодного блока, при котором достигается максимальное прохождение электронов в область рекуперации, где расположены электроды коллектора. В этом случае реализуется оптимальное положение секторов ВЭП, в которых отсутствуют электроны, по отношению к положению связей тороидального соленоида. Регулирование распределения продольного магнитного поля $B_z(z)$ с помощью корректирующих катушек К1–К5 было выполнено с целью обеспечить максимальное прохождение частиц до последнего электрода Э4 с учетом того, что в спектре отработанного ВЭП присутствуют электроны с энергией в широком диапазоне. Измерения показали, что основная часть электронов достигает последнего четвертого электрода ($I_{Э4} = (0,5–0,6) \cdot I_n$), однако имеется заметный ток на первый электрод $I_{Э1}$ и на корпус $I_{колл}$. Для сравнения в расчетах примерно 95% тока пучка достигает четвертого электрода [13]. Важно при этом, что расстояние между границей пучка и ближайшим электродом может быть довольно малым. Можно предположить, что заметный ток на первый электрод и на корпус, зафиксированный в экспериментах, связан с нарушением соосности элементов электронно-оптической системы гиротрона. В первую очередь, по-видимому, это касается отклонения оси катодного блока относительно оси

магнитной системы. Наблюдаемое в экспериментах увеличение $I_{колл}$ и уменьшение $I_{Э1}$ с ростом напряжения U_0 можно объяснить тем, что с ростом энергии электронов в среднем повышается радиус их траекторий в коллекторной области [13]. После проведенной оптимизации индукция продольной компоненты магнитного поля B_z в области рекуперации была равна примерно 0,03 Тл, а азимутальной компоненты B_θ – примерно 0,044 Тл.

Дальнейшие измерения были выполнены при генерации выходной СВЧ-мощности в зоне возбуждения рабочей моды $TE_{12,3}$, включая режимы с высоким электронным КПД $\eta_{эл}$ (более 40%), полученным в результате повышения качества ВЭП при оптимизированных распределениях электрического и магнитного полей в области формирования пучка [11, 12]. С ростом выходной мощности уменьшается в среднем энергия электронов в отработанном ВЭП, что приводило к увеличению тока $I_{Э1}$ и к снижению тока $I_{колл}$.

При включенных сопротивлениях $R_{E1}-R_{E4}$ с повышением тока пучка I_n происходило перераспределение токов на электроды коллектора. Соответствующие зависимости, которые были измерены при $R_{колл} = 0$ и значении B_0 , соответствующем максимуму выходной мощности, приведены на рис. 3. При токе I_n , равном $\sim 4,3$ А, фиксировалось появление СВЧ-генерации, что сопровождалось увеличением $I_{Э1}$ и падением $I_{колл}$. В дальнейшем с ростом тока I_n наблюдается возрастание токов $I_{Э2}$ и $I_{Э3}$ при снижении тока $I_{Э4}$. Данные результаты свидетельствуют о радиальном смещении электронов в сторону меньших радиусов и попадании их на электроды Э2 и Э3 по мере увеличения амплитуды электрического поля в коллекторе, которое происходит с ростом тока I_n при постоянных $R_{Э1}-R_{Э4}$.

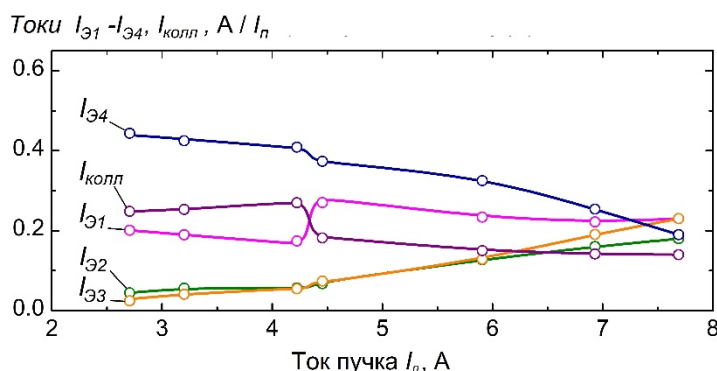


Рисунок 3. Зависимости токов на электроды коллектора $I_{Э1}-I_{Э4}$, $I_{колл}$ от тока пучка I_n ($U_0 = 30$ кВ, $R_{Э1} = 0,82$ кОм, $R_{Э2} = 0,80$ кОм, $R_{Э3} = 1,26$ кОм, $R_{Э4} = 8,45$ кОм, $R_{колл} = 0$).

Таблица 1. Электрические параметры коллекторных электродов

Электрод	Сопротивление	Ток	Напряжение
Э1	$R_{Э1} = 0,82$ кОм	$I_{Э1} = 1,8$ А	$U_{Э1} = -8,0$ кВ
Э2	$R_{Э2} = 0,80$ кОм	$I_{Э2} = 1,4$ А	$U_{Э2} = -11,5$ кВ
Э3	$R_{Э3} = 1,26$ кОм	$I_{Э3} = 1,8$ А	$U_{Э3} = -15,2$ кВ
Э4	$R_{Э4} = 8,45$ кОм	$I_{Э4} = 1,4$ А	$U_{Э4} = -25,0$ кВ
корпус	$R_{колл} = 0,82$ кОм	$I_{колл} = 1,1$ А	$U_{колл} = -3,0$ кВ

Заключительные эксперименты были выполнены в режимах, когда на корпус коллектора подавалось дополнительное тормозящее напряжение. При $U_0 = 30$ кВ, $I_n = 7,7$ А, $\eta_{эл} = 42\%$ максимальный полный КПД, равный $\sim 72\%$, был зафиксирован при значениях сопротивлений, приведенных в таблице 1. Здесь же указаны значения токов и напряжений на электродах коллектора. При $R_{колл} \neq 0$ реализуется 5-ти ступенчатый

режим рекуперации. Для сравнения при $R_{колл} = 0$ максимальный полный КПД был равен $\sim 70\%$.

5. Заключение

Моделирование и эксперименты, выполненные в гиротроне СПБПУ показали преимущества метода сепарации электронов ВЭП с разной энергией, основанного на дрейфе частиц в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях. Потенциал дальнейшего увеличения полного КПД гиротрона, очевидно, связан с улучшением соосности его элементов, что может обеспечить большее прохождение электронов в область рекуперации. Следовательно, можно полагать, что имеются возможности достижения в гиротроне СПБПУ высокого полного КПД (более 75%), приближающегося к значению, полученному в расчетах [13].

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00136)**. Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра СПБПУ (<http://www.scc.spbstu.ru>).

Список литературы

1. Thumm M. K. A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive //Nuclear Fusion. – 2019. – Т. 59. – №. 7. – С. 073001.
2. Sakamoto K. et al. Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery //Physical review letters. – 1994. – Т. 73. – №. 26. – С. 3532.
3. 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.
4. Manuilov V. N. et al. Gyrotron collector systems: Types and capabilities //Infrared Physics & Technology. – 2018. – Т. 91. – С. 46-54.
5. Read M. E. et al. Depressed collectors for high-power gyrotrons //IEEE Transactions on Electron Devices. – 1990. – Т. 37. – №. 6. – С. 1579-1589.
6. Ling G., Piosczyk B., Thumm M. K. A new approach for a multistage depressed collector for gyrotrons //IEEE transactions on plasma science. – 2000. – Т. 28. – №. 3. – С. 606-613.
7. 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.
8. 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.
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 ДЕМО. Ч. III. Влияние параметров отработанного электронного потока //Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – №.5. – С. 718-723.
11. Louksha O. I. et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron //IEEE transactions on plasma science. – 2006. – Т. 34. – №. 3. – С. 502-511.
12. Лукша О. И. и др. Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов //Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 5. – С. 132-140.
13. Louksha Oleg I., Trofimov Pavel A., Malkin Alexander G. Enhancement of the 4-mm wavelength gyrotron efficiency by multistage energy recovery //St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Т. 70. – №. 4. – С. 118-133.