

Проблемы коллекторных систем современных гиротронов высокой мощности

В.Е. Запевалов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: обсуждаются проблемы коллекторов современных гиротронов высокого уровня мощности, анализируются причины, ограничивающие их срок службы. Описаны варианты конструктивных решений, способствующие повышению надежности и срока службы

Ключевые слова: УТС, микроволновое излучение, гиротрон, коллектор, электронные пучки

1. Введение

Гиротроны [1] являются электронными приборами с наибольшей средней мощностью в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. На современных установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) в настоящее время используются гиротроны [2-4] мегаваттного класса для электронного циклотронного нагрева и управления током. Типичные примеры таких гиротронов показаны на рисунке 1. На раннем этапе проектирования гиротронов три подсистемы были отмечены как области повышенного риска при высокой мощности: выходное окно из синтетического (CVD) алмаза, резонатор (область взаимодействия) и коллектор электронного пучка. Проблемы с окнами [2-4], были решены на ранних этапах разработки. Как правило не наблюдалось отказов резонаторов, где имеются самые высокие плотности мощности. Однако часто возникали трудности с коллекторами гиротронов, которые указывают на то, что надежная и долговременная работа приборов требует их усовершенствования. Высокий уровень энергии отработанного электронного пучка на коллекторе после генерации СВЧ-излучения остается серьезной проблемой мощных гиротронов. В типичном мощном гиротроне непрерывного режима с мощностью электронного пучка 3 МВт после генерации СВЧ-излучения мощностью 1 МВт (что соответствует эффективности 33%) мощность 2 МВт сосредоточена в отработанном электронном пучке и должна быть рассеяна коллектором [2-4]. Без применения специальных мероприятий по увеличению площади токооседания плотность мощности на коллекторе оказывается избыточной и приводит к его быстрому выходу из строя. Использование коллекторов с рекуперацией (CPD – collector potential depression) несколько улучшает ситуацию [1-4]. Типичный КПД гиротрона без CPD составляет 30-35%, а с CPD - около 50%. Помимо весьма заметного увеличения КПД, использование CPD значительно снижает мощность, рассеиваемую на коллекторе. Так, при увеличении КПД с 33% до 50% в мегаваттном гиротроне мощность на коллекторе снижается вдвое. Коллектор — самая массивная, крупногабаритная и очень дорогая подсистема мощных гиротронов (см. рис.1), но он остается одной из наиболее часто повреждаемых частей. Помимо самого коллектора, система гиротронного комплекса включает в себя магнитную систему, систему высоковольтного электропитания, систему охлаждения, обеспечивающую интенсивные потоки охлаждающей воды (около 1 м³/с на 1 МВт мощности), и т.д. Обзор вариантов коллекторных систем с точки зрения электронной оптики дан в [5]. Далее мы остановимся на простейших системах, близких к практической реализации или используемых в настоящее время.

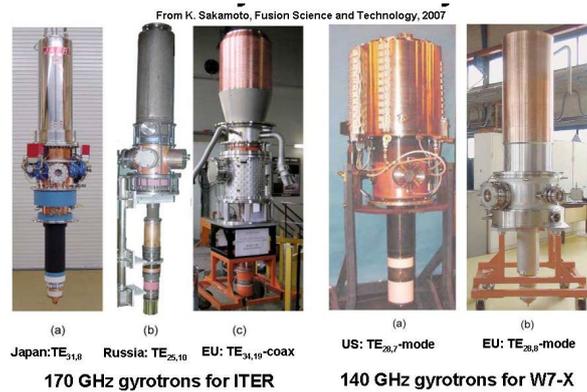


Рисунок 1. Фотография мощных гиротронов

2. Коллекторы с продольным сканированием

В большинстве мощных гиротронов непрерывного или длинноимпульсного режима используются коллекторы с продольным сканированием электронного пучка [6]. Такой гиротрон, как показано на рисунке 2, содержит электронную пушку и электродинамическую систему (на схеме не приведены), коллектор - 1 с аксиально симметричной токоприемной поверхностью (ТК) -2, вакуумный корпус - 8, магнитная система - 9 для транспортировки электронного пучка и дополнительный соленоид - 3, питаемый периодически меняющимся током. Электронный пучок 4 в области коллектора 1 при минимальном поле дополнительного соленоида движется по траектории 5, при отрицательном поле дополнительного соленоида – по траектории 6, а при максимальном значении поля – по траектории 7. Таким образом, электронный пучок 4 сканирует за счет действия переменного магнитного поля дополнительного соленоида 3 по ТК. В результате зона сканирования электронного пучка 4 может значительно превышать зону осаждения пучка при отсутствии переменного поля дополнительного соленоида 3. Уменьшение плотности теплового потока на токоприемной поверхности коллектора и, следовательно, ее температура достигается путем распределения пучка по большей площади поверхности коллектора изменяющимся во времени магнитным полем, а также профилированием токоприемной поверхности. Аналогом этого технического решения является устройство [7], где равномерность плотности теплового потока на поверхности коллектора достигается профилированием обмотки дополнительного соленоида.

Качественная зависимость температуры произвольной точки токопринимающей поверхности коллектора в установившемся непрерывном режиме от времени представлена на рисунке 3. Видно, что этот метод имеет существенный недостаток: максимальная температура этой поверхности существенно выше той, которую можно было бы получить при статическом распределении теплового потока по всей зоне осаждения, сам принцип сканирования подразумевает периодическое воздействие пучка на токоприемной поверхности коллектора и, следовательно, наличие колебаний температуры во времени с частотой сканирования. Очевидно, что размах этих колебаний уменьшается с увеличением частоты сканирования (см. рис. 3). Но частота сканирования ограничена из-за экранирования переменного магнитного поля проводящим коллектором. На практике частота сканирования составляет не более нескольких Герц, чего явно недостаточно для устранения колебаний температуры.

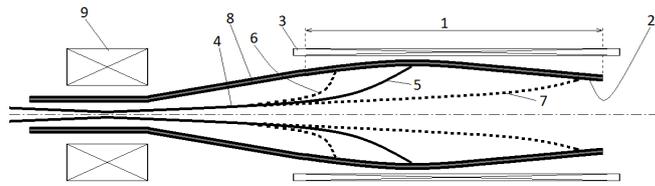


Рисунок 2. Типовая схема коллекторной системы мощного гиротрона.

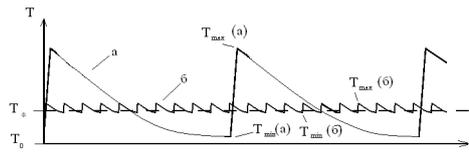


Рисунок 3. Изменение температуры участка поверхности коллектора во времени при медленной и быстрой частоте сканирования

Для коллектора, близкого по форме к длинной тонкой немагнитной цилиндрической оболочке, характерная частота в начале значительного экранирования равна [8]: $f_{shield} = \frac{1}{\pi\sigma\mu_0 R h}$, где, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, σ - проводимость материала коллектора 1, в $\text{Ом}^{-1}\text{м}$, R - радиус коллектора 1, в м, h - толщина коллектора 1, в м. Заметим, что частота снижается с увеличением радиуса коллектора и толщины. а обеспечение механической прочности требуют увеличения толщины с увеличением радиуса [9].

3. Поперечное и комбинированное сканирование

Другим подходом является использование поперечного или комбинированного [9] сканирования, что позволяет существенно повысить частоту перемещения электронного пучка по поверхности и равномерность токооседания. Однако при этом требуется наличие участка с низкой проводимостью между системой вывода микроволнового излучения и коллектором. На этом участке размещается магнитная система, создающая переменное магнитное поле для поперечного смещения электронного пучка.

4. Перспективные варианты коллекторных систем

Рассмотрим возможности повышения частоты продольного сканирования. В [10] предложен коллектор в виде изолированного одно- или многозаходного спирального змеевика, выполненного из трубы, по которой течет охлаждающая жидкость. Указанная конструкция приведена на рисунке 4. Для такой спирали, в которой замкнутые круговые токи невозможны, характерная круговая частота начала существенного экранирования совпадает с частотой скин-эффекта

$$f_{skin} = \frac{1}{\pi\sigma\mu_0 h^2} \quad (2)$$

Таким образом, данное решение позволяет увеличить частоту сканирования в $\frac{f_{skin}}{f_{shield}} = \frac{R}{h}$ раз по сравнению с описанным выше коллектором (при прочих равных условиях). Для типичного медного коллектора гиротрона ($R_{coll} = 10$ см и толщины $h = 5$ мм) выигрыш по частоте составит 20 раз. Заметный выигрыш в допустимой частоте сканирования позволяет кардинально снизить максимальную температуру

поверхности коллектора при той же мощности отработанного пучка и существенно увеличить срок службы прибора.

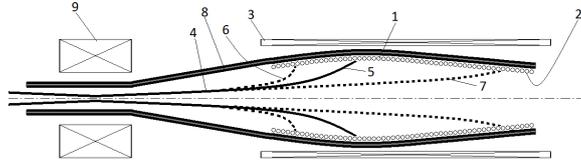


Рисунок 4. Схема мощного гиротрона со спиральным коллектором, использующего продольное сканирование.

Другой вариант — использование коллектора, в котором для посадки пучка используется внешняя поверхность симметричного тела (см. рис. 5) [11]. В этом случае корпус электронного устройства может быть изготовлен из материала с низкой электропроводностью (например, нержавеющей стали) и экранирование существенно ослаблено.

$f_{corp} = \frac{1}{\pi \sigma_{corp} \mu_0 R_{corp} h_{corp}}$, где σ_{corp} - проводимость материала вакуумного корпуса 1 СВЧ-прибора, R_{corp} - его радиус в м, h_{corp} - его толщина в м. Таким образом, можно увеличить частоту сканирования в $\frac{f_{corp}}{f_{coll}} = \frac{\sigma_{coll} R_{coll} h_{coll}}{\sigma_{corp} R_{corp} h_{corp}}$ раз по сравнению с

вариантом рис. 2 (при прочих равных условиях). Например, для типичного мощного гиротрона, коллектор из меди ($\sigma_{coll} = 60 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}$) имеет радиус 100 мм и толщину 5 мм. Пусть устройство будет иметь такой же внутренний коллектор. Тогда, для $R_{corp} = 110 \text{ мм}$ (материал нержавеющая сталь 12Х18Н10Т ($\sigma_{corp} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}$)), а $h_{corp} = 2 \text{ мм}$. Выигрыш в максимально допустимой частоте сканирования составит почти два порядка.

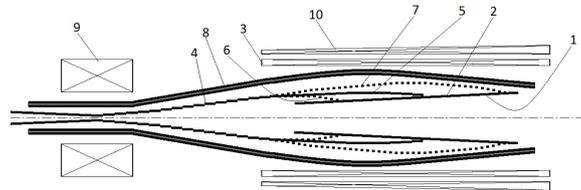


Рисунок 5. Схема коллектора мощного гиротрона внутри электронного пучка.

5. Заключение

Таким образом, предложенные варианты конструкции коллекторов могут способствовать повышению мощности гиротронов и срока их службы. Указанные технические решения могут представлять интерес и для других электронных приборов высокой мощности пролетного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИПФ РАН № FFUF-2022-0007.

Список литературы

1. Гапонов А.В. и др., Авторское свидетельство № 223931 «Устройство для генерации электромагнитных колебаний сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн».
2. Denisov G.G., et al. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion. // Nuclear Fusion, 48, №5, 2008, 5 pp.1-5.

3. 3. Thumm M., State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers, Update 2015 (KIT Scientific Reports; 7717), 2016. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000055471>
4. 4 Litvak A.G. et al., Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion, // J. Infrared Millim. Terahertz Waves 32 (3) (2011) 337-342, <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9743-8>.
5. 5. Manuilov V.N. et al, Gyrotron collector systems: Types and capabilities // Infrared Physics and Technology, 91 (2018) 46-54. doi:10.1016/j.infrared.2018.03.024
6. 6. Ларичев Ю.Д., Фикс А.Ш. Устройство СВЧ. Авторское свидетельство СССР, SU 1238617 А.
7. 7. Faillon F, Mourier G., et al. Electron collector for electron tubes. U S Patent Number 4,933,594. Date June 12, 1990.
8. 8. Васильев В.В., др. Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле. М., // Энергоатомиздат, 1982, с.879
9. 9. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М., Наука, 1967. 984 с.
10. 10. Erckmann V., Dammertz G., Schmid M.. Patent EP2150965A1 - Method and apparatus for collector sweeping control of an electron beam 2010-02-10
11. 11. Запечалов В.Е., Фикс А.Ш. ИПФ РАН, Электронное СВЧ устройство, Патент № 2576391, Заявка: 2014146356/07, 18.11.2014, (приоритет 18 ноября 2014 г.), Опубликовано: 10.03.2016 Бюл. № 7
12. 12. Запечалов В.Е., Фикс А.Ш, ИПФ РАН, Электронное СВЧ устройство, Патент № 2630251, Заявка № 2016113110, дата приоритета 04.05.2016. Дата государственной регистрации в Государственном реестре 6 сентября 2017 года.