

12;15

Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах

© О.И. Лукша, П.А. Трофимов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: louksha@rphf.spbstu.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2015 г.

Разработан новый метод пространственной сепарации электронов с разной начальной энергией в винтовых электронных потоках гиротронов, основанный на дрейфе электронов в скрещенных азимутальном магнитном и аксиальном электрическом полях. Проведенные аналитические расчеты и численное моделирование показали возможность применения данного метода сепарации для построения эффективных схем многоступенчатой рекуперации для типичных параметров электронного потока, реализуемых в мощных устройствах гиротронного типа.

Современные гиротроны, работающие в длинноимпульсном и квазинепрерывном режимах, обеспечивают рекордные уровни выходной СВЧ-мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн излучения (например, [1]). Однако электронный КПД мощных гиротронов, определяемый эффективностью передачи энергии электронов высокочастотному полю в резонаторе, как правило, не превышает 30–35%. Повышение полного КПД гиротронов, как и других электровакуумных СВЧ-приборов, может быть достигнуто за счет рекуперации — возвращения в электрическую сеть части энергии электронного потока, не израсходованной при его взаимодействии с высокочастотным полем. Практически все современные длинноимпульсные гиротроны мегаваттного уровня мощности оснащены системами одноступенчатой рекуперации, в которых торможение электронов осуществляется в зазоре между корпусом лампы и изолированным от него коллектором. Такие системы позволяют повысить полный КПД мощных гироприборов до ~ 50%. Возможность дальнейшего увеличения КПД связана с переходом к использованию систем многоступенчатой рекуперации, которые предполагают разделение в пространстве фракций пучка

с разными энергиями электронов и осаждение этих фракций на секции коллектора, имеющие различные потенциалы. Рядом научных групп предпринимались попытки разработки коллекторов с многоступенчатой рекуперацией применительно к гиротронам [2-4]. Эти исследования активно ведутся и в настоящее время. Однако на практике, насколько нам известно, такие системы не были реализованы. Во многом это связано с тем, что предложенные способы не обеспечивают требуемой пространственной сепарации электронов с разными энергиями в условиях, когда имеется разброс электронов по компонентам скорости и по координатам при влете в коллекторную область, либо разработанные на их основе коллекторные системы довольно сложны в изготовлении. Новый метод сепарации электронов описан в данной работе.

В коллекторной области мощных гиротронов магнитное поле заметно уменьшено по сравнению с полем в резонаторе, что необходимо для увеличения поперечных размеров винтового электронного потока (ВЭП) и снижения тепловой нагрузки на коллектор. При этом значительная доля энергии электронов сосредоточена в их продольном (вдоль силовой линии магнитного поля) движении. Предлагаемый новый метод сепарации предполагает введение азимутальной компоненты магнитного поля B_θ в дополнение к имеющейся аксиальной компоненте B_z , а также продольного тормозящего электрического поля E_z . Попадая в область действия этих полей, электроны тормозятся в электрическом поле и одновременно дрейфуют в радиальном направлении с одинаковой скоростью $v_{dr} = E_z/B_\theta$. Смещение ведущего центра электронной траектории в радиальном направлении определяется, очевидно, временем пребывания электрона в области действия скрещенных полей E_z и B_θ , которое зависит от его начальной энергии при влете в область торможения. Таким образом, в данной схеме возможно разделение траекторий электронов, имеющих разные начальные энергии W , в радиальном направлении, что при соответствующем выборе геометрии и напряжений U_i секций коллектора ($i = 1, 2, \dots, N, |U_i| < |U_{i+1}|$) может обеспечить осаждение на i -й секции электронов с энергией в диапазоне примерно от $|eU_i|$ до $|eU_{i+1}|$. Здесь и далее рассматриваем случай, когда на секции коллектора подаются отрицательные напряжения относительно заземленного корпуса прибора.

Принципиальные возможности данной схемы сепарации были определены на примере экспериментального гиротрона СПбПУ с частотой 74.2 GHz и выходной мощностью 100 kW [5]. Выполненные ранее

расчеты и эксперименты показали, что в рабочем режиме этого гиротрона при ускоряющем напряжении $U_0 = 30 \text{ kV}$ спектр энергий электронов в отработанном пучке довольно широк и лежит в диапазоне примерно от 8 до 38 keV [6]. Траекторный анализ электронно-оптической системы (например, с помощью кода EGUN) позволяет оценить параметры ВЭП при движении электронов в области коллектора в спадающем магнитном поле, создаваемом основным соленоидом гиротрона. Например, при величине индукции магнитного поля $B_z = 0.04 \text{ T}$ получим, что средний радиус полого пучка $R_0 \approx 68 \text{ mm}$, а разброс ведущих центров электронных орбит $\Delta R \approx 3 \text{ mm}$. Соотношение поперечной и продольной компонент скорости электронов ВЭП принято характеризовать величиной питч-фактора $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$. Для случая, когда не учитывается взаимодействие электронов с электромагнитным полем, при $B_z = 2.75 \text{ T}$ (область резонатора) средний питч-фактор, рассчитанный для рабочего режима гиротрона, равен примерно 1.3, а при $B_z = 0.04 \text{ T}$ — примерно 0.09.

Вид траекторий одиночного электрона в полях E_z , B_z и B_{θ} , заданных аналитически, был получен в результате решения соответствующих уравнений движения [7]. Предполагалось, что продольное магнитное поле B_z не меняется вдоль координаты z , а поля E_z и B_{θ} плавно нарастают, достигая своего максимума примерно при $z = 0$ (рис. 1, *a*). Вид распределений $E_z(z)$ и $B_{\theta}(z)$ был выбран исходя из геометрии коллекторной области гиротрона, в предположении, что эти поля могут быть сформированы в области $z > 0$ с помощью системы электродов и магнитных катушек. Максимальные значения компонент полей в этой области: $E_z = 1 \text{ kV/cm}$, $B_{\theta} = -0.12 \text{ T}$, $B_z = 0.04 \text{ T}$. Отрицательные значения азимутального магнитного поля B_{θ} при наличии тормозящего электрического поля E_z обеспечивают дрейф электронов в сторону больших радиусов. Проекция траекторий на плоскость $r - z$ для электронов, имеющих начальные координаты влета $z_0 = -0.8 \text{ m}$, $r_0 = 68 \text{ mm}$, начальный питч-фактор $\alpha_0 = 0.09$ и начальные энергии W , равные 8, 18, 28 и 38 keV, показаны на рис. 1, *b*.

Возможность реализации многоступенчатой схемы рекуперации продемонстрирована на рис. 2. Здесь для начальных энергий $W_k = 8, 16, 24, 32 \text{ keV}$ показаны траектории электронов при радиусах влета $r_0 = 66.5$ и 69.5 mm ($z_0 = -0.8 \text{ m}$) и начальных питч-факторах $\alpha_0 = 0.075$ и 0.105 . Такие значения питч-фактора имеют электроны с минимальной и максимальной поперечной энергией в потоке, где

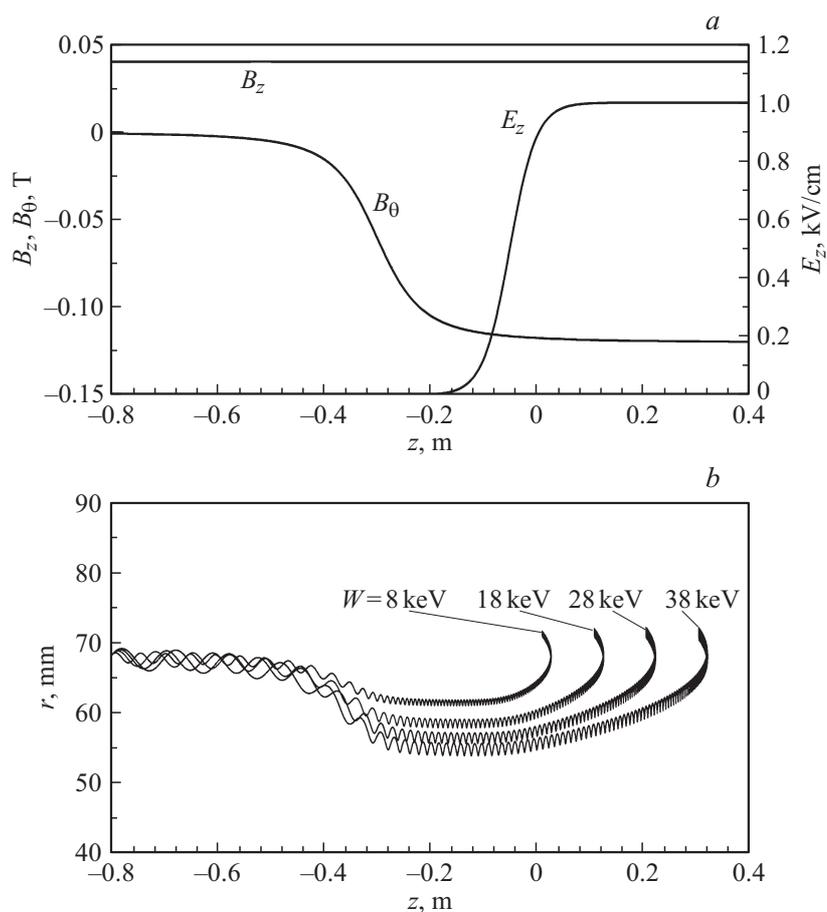


Рис. 1. Распределения компонент электрического E_z и магнитного B_z и B_θ полей (а), траектории электронов с различными значениями начальной энергии W (б).

полный разброс поперечных скоростей $\delta v_\perp \approx 30\%$. Распределения полей в данном случае были аналогичны приведенным на рис. 1, а. Пунктирными линиями на рис. 2 показано возможное расположение секций коллектора, на которые подаются отрицательные напряжения U_k .

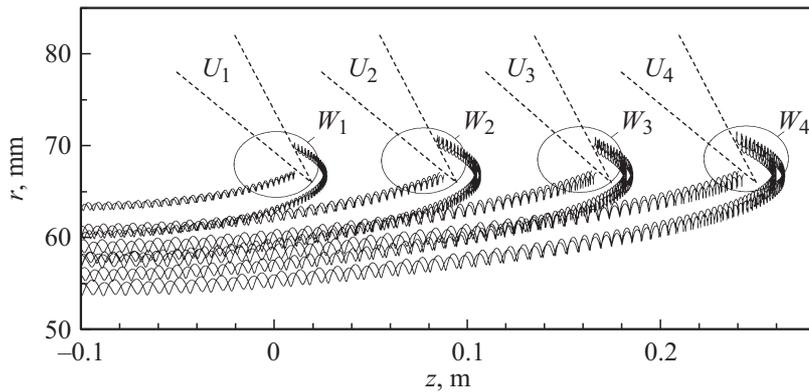


Рис. 2. Траектории электронов с различными значениями начальной энергии $W_1 = 8 \text{ keV}$, $W_2 = 16 \text{ keV}$, $W_3 = 24 \text{ keV}$, $W_4 = 32 \text{ keV}$, радиуса влета $r_0 = 66.5$ и 69.5 mm и начального пичч-фактора $\alpha_0 = 0.075$ и 0.105 . Обозначены области оседания групп электронов с энергией W_k на секциях рекуператора (показаны пунктирными линиями) с потенциалами U_k .

Предположим, что электроны, имеющие начальную энергию W_k , попадают на соответствующую секцию коллектора под потенциалом U_k (области осаждения электронов выделены на рисунке) с минимальной остаточной энергией ΔW_k , где $\Delta W_k = W_k - |e(U_k - \Delta U_k)|$. Малая добавка ΔU_k учитывает долю энергии электронов, оставшуюся в их поперечном движении. Тогда, как можно судить по рис. 2, основная часть электронов с энергией $W_{k-1} < W < W_k$ осаждается на секции коллектора под потенциалом U_{k-1} , обеспечивая тем самым корректную работу схемы рекуперации. При выбранных значениях амплитуды полей E_z , B_z и B_θ радиальное смещение электронов достаточно велико, что позволяет реализовать данную схему рекуперации при типичных значениях скоростного разброса и толщины стенки пучка, которые имеют место в мощных гиротронах.

При разработке систем рекуперации важно предусмотреть меры по подавлению паразитного влияния электронов первичного пучка, отражающихся в тормозящем электрическом поле рекуператора, а также вторичных электронов, эмитированных с поверхности коллекторных секций. Электроны обеих групп двигаются в сторону резонатора и, до-

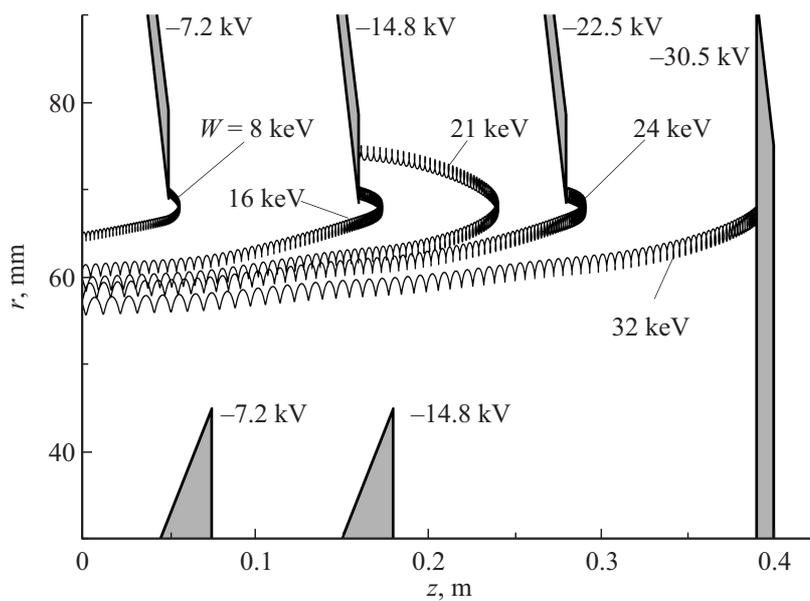


Рис. 3. Пример 4-секционной системы рекуперации экспериментального гиротрона. Показаны секции коллектора с различными потенциалами и траектории электронов с начальными энергиями $W = 8, 16, 21, 24, 32$ keV.

стигнув его, могут привести к ухудшению энергообмена электронного потока с электромагнитным полем и к падению выходной мощности. В предложенной схеме рекуператора вследствие радиального дрейфа электронов практически исключается возможность выхода отраженных частиц из коллекторной области в сторону резонатора. Кроме этого, в данной схеме большая часть электронов осаждаются на задней стенке секций коллектора после изменения направления продольной скорости (рис. 2). Электрическое же поле, имеющееся в этой области, препятствует эмиссии вторичных электронов с бомбардируемой поверхности электродов.

Для подтверждения работоспособности разработанного метода сепарации электронов был выполнен траекторный анализ коллекторной системы гиротрона в рамках трехмерного численного моделирования. Геометрия и потенциалы секций коллектора были выбраны таким

образом, чтобы вид распределения потенциала вдоль продольной координаты на радиусе пучка R_0 был близок к линейному. Все коллекторные секции были аксиально симметричны. Распределение магнитного поля задавалось, как и раньше, аналитически (рис. 1, *a*). На рис. 3 изображены секции коллектора, указаны их потенциалы, а также показаны рассчитанные траектории электронов с начальными энергиями $W = 8, 16, 21, 24, 32$ keV при $z_0 = -0.8$ m, $r_0 = 68$ mm, $\alpha_0 = 0.09$. Электроды с потенциалами -7.2 и -14.8 kV, расположенные внутри полого пучка, используются здесь для выравнивания продольного распределения электрического поля.

Приведенный пример реализации 4-ступенчатого рекуператора для гиротрона СПБПУ подтверждает возможности предложенного метода сепарации электронов при их движении в скрещенных азимутальном магнитном и продольном электрическом полях. Для точного расчета КПД гиротрона с рекуперацией необходима детальная информация о распределениях электронов по компонентам скорости и по координатам при влете в коллекторную область, которые определяются процессами взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем в резонаторе. Однако приближенные расчеты, выполненные для предложенной схемы 4-ступенчатой рекуперации по оценочным соотношениям (например, [4]), показывают возможность достижения в ней полного КПД порядка 70–80%. Следует отметить, что достаточно большие размеры секций коллектора (рис. 3) позволяют обеспечить их эффективное охлаждение при работе мощных гиротронов в длинноимпульсном или квазинепрерывном режимах. Дополнительно уменьшить тепловую нагрузку на коллектор возможно за счет уменьшения угла падения электронов на поверхность секций, что позволит увеличить площадь области осаждения пучка. За счет изменения положения внутренних электродов, которые не подвергаются электронной бомбардировке, можно добиться необходимого распределения электрического поля. Важной технической проблемой, которую следует решить при разработке такой системы рекуперации, является конструирование магнитной системы, обеспечивающей требуемое распределение магнитного поля. Для этого можно воспользоваться опытом создания магнитного поля с винтообразными силовыми линиями, накопленным при разработке магнитных систем для стеллараторов, либо другими техническими решениями, основанными на применении соленоидов для формирования азимутального магнитного поля (например, [8]).

Авторы благодарны проф. Г.Г. Соминскому и доц. К.В. Соловьеву за полезные дискуссии.

Список литературы

- [1] *Запелалов В.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. В. 8. С. 559.
- [2] *Singh A., Rajapatirana S., Men Y., Granatstein V.L., Ives R.L., Antolak A.J.* // IEEE Trans. Plasma Science. 1999. V. 27. N 2. P. 490.
- [3] *Pagonakis I.Gr., Hogge J.-P., Alberti S., Avramides K.A., Vomvouridis J.L.* // IEEE Trans. Plasma Science. 2008. V. 36. N 2. P. 469.
- [4] *Глявин М.Ю., Мануилов В.Н., Морозкин М.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 5. С. 127.
- [5] *Лукина О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Семин С.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 5. С. 132.
- [6] *Kas'yanenko D., Louksha O., Sominski G., Piosczyk B., Thumm M.* // Proc. 10th Conference on Displays and Vacuum Electronics. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2004. ITG-Fachbericht. N 183. P. 81.
- [7] *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
- [8] *Sass A.R., Stoll J.C.* Magnetic field of a finite helical solenoid. NASA Technical Note D-1993, 1963. 43 p.