

10;12

Магнетронно-инжекторная пушка с экстракцией отраженных электронов

© М.В. Вилков, М.Ю. Глявин, А.Л. Гольденберг, М.И. Петелин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2012 г.

Необратимость дрейфа электронов в скрещенных осесимметричных электрическом и магнитных полях может обеспечить отбор электронов, отраженных от магнитной пробки, если одному из электродов придать винтовую симметрию. Электронные пушки такого рода могут быть рекомендованы для использования в субтерагерцовых гиротронах умеренной мощности.

В субтерагерцовом диапазоне частот одним из перспективных источников непрерывного когерентного излучения мощностью порядка сотни ватт является гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты [1–3]. Однако КПД таких гиротронов быстро снижается с ростом частоты из-за увеличения омических потерь, обусловленного необходимостью увеличения длины резонатора. Эта тенденция может быть значительно ослаблена при увеличении питч-фактора электронов $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$ — отношения их вращательной скорости v_{\perp} к поступательной v_{\parallel} . Ограничением на этом пути является разброс питч-факторов электронов в пучке, формируемом магнетронно-инжекторной пушкой [4,5]. При движении в нарастающем магнитном поле между катодом и резонатором гиротрона электроны с относительно малыми поступательными скоростями отражаются от магнитной пробки и не попадают в резонатор; накопление электронов в пространстве между катодом и резонатором приводит к увеличению разброса питч-факторов и возбуждению паразитных низкочастотных колебаний [6]. Если же обеспечить экстракцию отраженных электронов, то становится возможным увеличение питч-фактора, КПД и выходной мощности. Результаты расчета этих параметров для гиротрона на 2-й гармонике гирочастоты на частоте 0.3 THz при фиксированной длине резонатора в зависимости от экстрагируемой доли электронного пучка приведены на рис. 1, а, б. С учетом того, что увеличение питч-фактора позволяет

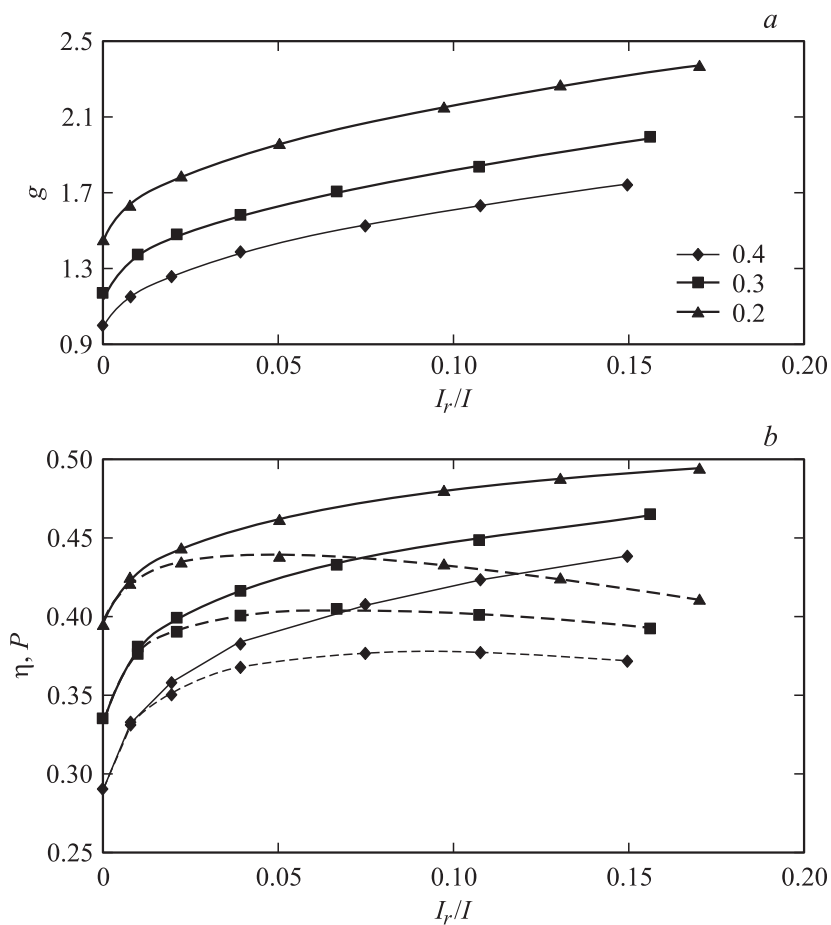


Рис. 1. Зависимости среднего питч-фактора g (а), электронного КПД η (сплошная линия) и нормированной выходной мощности $P = \eta(1 - I_r/I)$ (штриховая линия) (б) от отношения перехватываемого тока к полному току пучка для различных значений относительного разброса осцилляторных скоростей электронов δv_{\perp} ($\delta v_{\perp} = 0.2$ — треугольники, $\delta v_{\perp} = 0.3$ — квадраты, $\delta v_{\perp} = 0.4$ — ромбы).

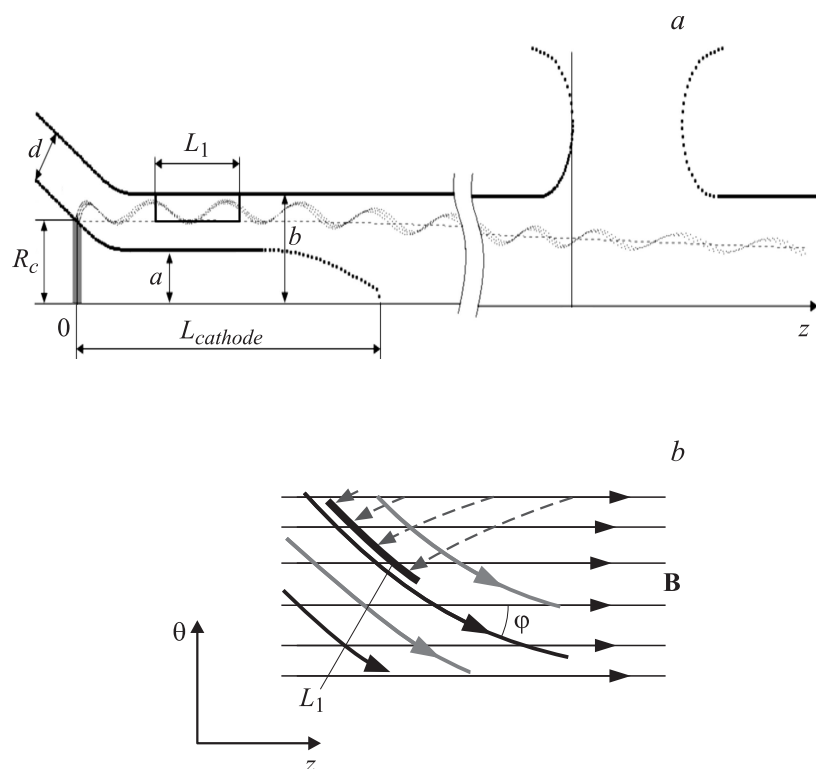


Рис. 2. Схема электронной пушки с экстрактором отраженных электронов (*a*) и проекции ребер и траекторий электронов на поверхность „азимутальный угол θ –продольная координата z “ (*b*).

уменьшить длину резонатора и соответственно уменьшить омические потери, в этом гиротроне при заданной выходной мощности возможно увеличение КПД примерно в два раза. С ростом частоты этот выигрыш возрастает.

В простейшем варианте [4] для экстракции отраженных электронов на участке между катодом и резонатором устанавливаются продольные металлические ребра: из-за невязимного азимутального дрейфа электронов в прикатодной области захваченные в ловушку электроны после

Основные параметры гиротрона и синтезированной электронно-оптической системы (обозначения соответствуют рис. 2)

Питч-фактор, g	2
Магнитное поле в резонаторе B_0 , Т	5.36
Радиус пучка в резонаторе R_0 , mm	0.87
Частота выходного излучения f , GHz	300
Рабочая мода	$TE_{6,5}$
Гармоника, n	2
Ток эмиссии I , А	0.4
Катодное напряжение U , kV	30
Коэффициент перемагничивания $\alpha = B_0/B_{cathode}$	29
Радиус катода R_c , mm	4.6
Расстояние между катодом и центром резонатора, mm	425
Ширина эмитирующего пояса вдоль оси z , mm	0.63
Высота ребра w , mm	4.6
Радиус носика катода a , mm	2.5
Радиус анода b , mm	6.6
Расстояние катод-анод d , mm	4.5
Напряжение между резонатором и анодом U_a , kV	10
Угол сноса электронов $\varphi = \arctg(v_{\perp 0}/v_{\parallel 0})$, deg	14
Количество ребер, s	4
Длина ребра L , mm	10
Длина катода $L_{cathode}$, mm	51

нескольких пролетов садятся на эти ребра и накопление „ловушечных“ электронов прерывается.

В данной статье предлагается модификация описанной в [4] электронно-оптической системы: катод удлиняется цилиндрическим стержнем, а на аноде устанавливаются винтовые ребра, не препятствующие движению электронов от катода к резонатору, но полностью поглощающие электроны, отраженные магнитной пробкой при их первом пролете к катоду (рис. 2, a, b). Если пренебречь неоднородностью электрического поля, имеющей место вблизи ребер, то движение электрона в скрещенном электрическом и магнитном поле представляет собой наложение циклотронного вращения и дрейфового движения по

винтовой линии с продольной скоростью $v_{\parallel 0}$ и поперечной (азимутальной) скоростью $v_{\perp 0} \sim E_{\perp}/B$ (E_{\perp} — компонента электрического поля, перпендикулярная силовой линии магнитного поля, B — индукция магнитного поля). Участки катода, с которых электроны попадали бы на торцы ребер, следует сделать неэмитирующими, чтобы избежать излишней тепловой нагрузки на ребра.

В качестве примера рассмотрим проект модифицированной электронной пушки 0.3 THz гиротрона на 2-й гармонике гирочастоты с рабочей модой $TE_{6,5}$. Для упрощения расчета и изготовления пушки предполагалось, что в ней сформировано однородное магнитное поле и радиальная компонента электрического поля E_r является постоянной от эмиттера до конца экстрактора. Поскольку вращательные скорости электронов существенно зависят от фазы их пролета близи конца удлиненного катода пушки (как и в обычной электронной пушке, являющейся прототипом), длина катода и форма электродов были выбраны так, чтобы обеспечить по возможности плавность изменения электрического поля вдоль траекторий электронов. Длина экстрактора (анодных ребер) определялась с учетом выбранного числа ребер $s = 4$.

Результаты численного синтеза [7] электронной пушки с экстрактором сведены в таблицу. При плотности мощности, рассеиваемой на ребрах, 1 kW/cm^2 , максимальная мощность электронного пучка может достигать нескольких kW, что позволяет рассчитывать на генерацию излучения в непрерывном режиме на уровне 100 W.

Авторы признательны Е.С. Семенову за предоставленную возможность использовать разработанный им комплекс программ ANGEL-2DS [8] для численного моделирования электронных траекторий в магнетронно-инжекционной пушке.

Список литературы

- [1] *Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Goldenberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K.* // *Infrared Phys.* 1978. V. 18. N 6. P. 385–395.
- [2] *Nusinovich G.S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore, MD, Johns Hopkins Univ. Press, 2004. 352 p.
- [3] *Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А.* // *Радиотехника и электроника.* 1974. Т. 19. № 5. С. 1056–1060.

-
- [4] *Гольденберг А.Л., Панкратова Т.Б., Петелин М.И.* Электронная пушка магнетронного типа / А. с. № 226044 от 21.06.1968, СССР, Москва.
- [5] *Гольденберг А.Л., Петелин М.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 1. С. 141–149.
- [6] *Мануилов В.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 872–879.
- [7] *Семенов Е.С.* // Труды XIV научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ННГУ, 2010. С. 54–56.
- [8] *Планкин О.П., Семенов Е.С.* / Препринт ИПФ РАН. Н. Новгород, 2011. 30 с.