

УДК 621.385

Влияние распределения электрического поля в области электростатического зеркала на бомбардировку катода отраженными электронами в МИП гиротронов

П. В. Кривошеев, В. Н. Мануилов

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия

Дано описание электронно-оптических систем (ЭОС) с задним электродом, в которых высота заднего электрода h заметно превышает ларморовский диаметр D_L электронной орбиты над эмиттером ($h > D_L$). Приведены основные результаты моделирования соответствующих ЭОС по динамической модели с учетом вторичной эмиссии. Показано, что наличие в системах формирования заднего электрода приводит к уменьшению влияния вторичной эмиссии на параметры пучков всех типов.

Одна из характерных особенностей магнетронно-инжекторных пушек (МИП) [1], формирующих винтовые электронные пучки (ВЭП), — пробочная конфигурация магнитного поля. Это приводит при большой доле колебательной энергии к тому, что часть электронов с наибольшими вращательными скоростями отражается от магнитного зеркала и затем захватывается в адиабатическую ловушку между катодом и рабочим пространством [2]. Величина захваченного заряда в значительной степени определяется вторичной эмиссией с катода, возникающей при его бомбардировке отраженными электронами. Захваченные электроны ухудшают параметры пучков и при большой доле захваченного заряда способствуют возникновению неустойчивости в ВЭП [3]. Как было показано в [4, 5], сильное влияние вторичной эмиссии на процесс захвата частиц в ловушку связано с тем, что зона бомбардировки катода в традиционных МИП существенно больше поверхности эмиттера и смещена в область более слабого магнитного поля. Для уменьшения ширины зоны бомбардировки можно увеличить продольную компоненту электрического поля E_{\parallel} , тормозящую захваченные частицы в области электростатического зеркала. В результате захваченным электронам труднее попасть левее эмиттера, и зона бомбардировки должна сократиться. При уменьшении последней следует ожидать снижения числа захваченных в ловушку электронов.

Увеличение E_{\parallel} достигается при установке за эмиттером заднего электрода (рис. 1). Ниже на основе метода крупных частиц [6] проанализирована возможность использования указанного подхода для снижения роли вторичной эмиссии на процесс формирования ВЭП.

Для численного моделирования были выбраны ЭОС, формирующие ВЭП трех, наиболее часто используемых на практике типов: ламинарный, пограничный и регулярно пересекающийся [3]. Рассматривался диодный вариант МИП с ускоряющим напряжением $U_0 = 60$ кВ.

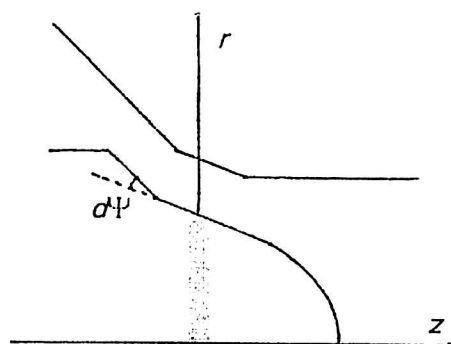


Рис. 1. Схематический вид катодного узла систем формирования ВЭП с задним электродом

Величина тока пучка задавалась такой, чтобы отношение тока I к ленгмюровскому току пушки I_L составляло величину $t_j = I/I_L \approx 0,1-0,2$. Дисперсия начального скоростного распределения подбиралась с помощью статической модели [6] таким образом, чтобы в "холодной" системе ($I = 0$) скоростной разброс $\delta v_L \approx 20\%$ в рабочем пространстве, а питч-фактор — $g = 1,9$. Анализировались ЭОС, где высота заднего электрода h заметно превышает ларморовский диаметр электронной орбиты над эмиттером D_L , т. е. $h > D_L$ (системы с $h < D_L$ рассмотрены в [7]). Моделирование проводилось по двум динамическим моделям ВЭП [4]: без учета вторичной эмиссии и с учетом ее.

Угол наклона заднего электрода $d\psi$ подбирался таким образом, чтобы этот электрод значительно изменял величину E_{\parallel} и характер переходных процессов в электронном пучке по сравнению с традиционной МИП с гладким катодом. Задний электрод устанавливался за эмиттером на расстоянии порядка ларморовского диаметра электрона над эмиттером D_L . Такое расположение было подобрано на основе статической модели пучка [3] исходя из условия наименьшего влияния заднего электрода на параметры и топологию первичного потока. На рис. 2, а—в приведены конфигурации электродов в системах формирования ламинарного, пограничного и ре-

гулярно пересекающегося пучков и электронные траектории, рассчитанные по статической моноскоростной модели [6] при параметре пространственного заряда $t_j = 0,1$.

Согласно рис. 3, *a–в* задний электрод почти не подвергается бомбардировке, и основная часть бомбардирующих катод электронов попадает на эмиттер как при учете вторичной эмиссии, так и в случае $\sigma = 0$. Уменьшение площади бомбардировки, очевидно, связано с увеличением продольной (вдоль магнитного поля) компоненты электрического поля, которая тормозит электроны и не дает им пролетать далеко за эмиттер. В отличие от традиционных МИП распределения заряда бомбардировки при учете

вторичной эмиссии в системах формирования с задним электродом очень незначительно отличаются от случая $\sigma = 0$ (см. рис. 3, *a–в*). Соответственно, и ширина зоны бомбардировки катода при расчетах по обеим указанным моделям оказывается практически одинаковой.

Таким образом, вторичная эмиссия в рассмотренных ЭОС слабо влияет на процесс бомбардировки катода отраженными электронами. Сравнение данных графиков с результатами моделирования систем с гладким катодом [5] показывает, что наличие заднего электрода приводит к уменьшению ширины зоны бомбардировки при учете вторичной эмиссии в два раза для всех типов пучков.

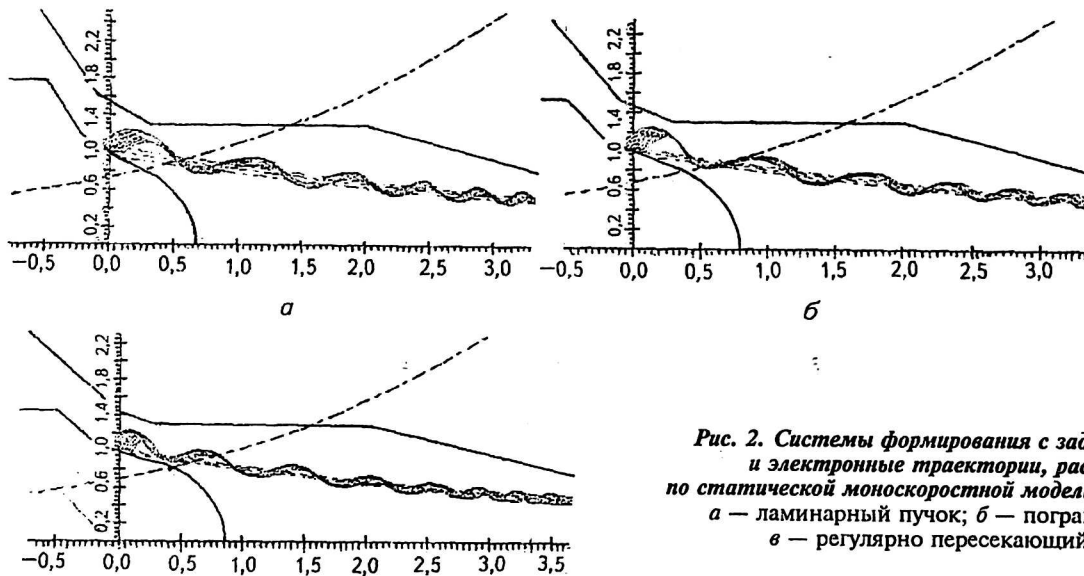


Рис. 2. Системы формирования с задним электродом и электронные траектории, рассчитанные по статической моноскоростной модели при токе $t_j = 0,1$: *a* — ламинарный пучок; *б* — пограничный пучок; *в* — регулярно пересекающийся пучок

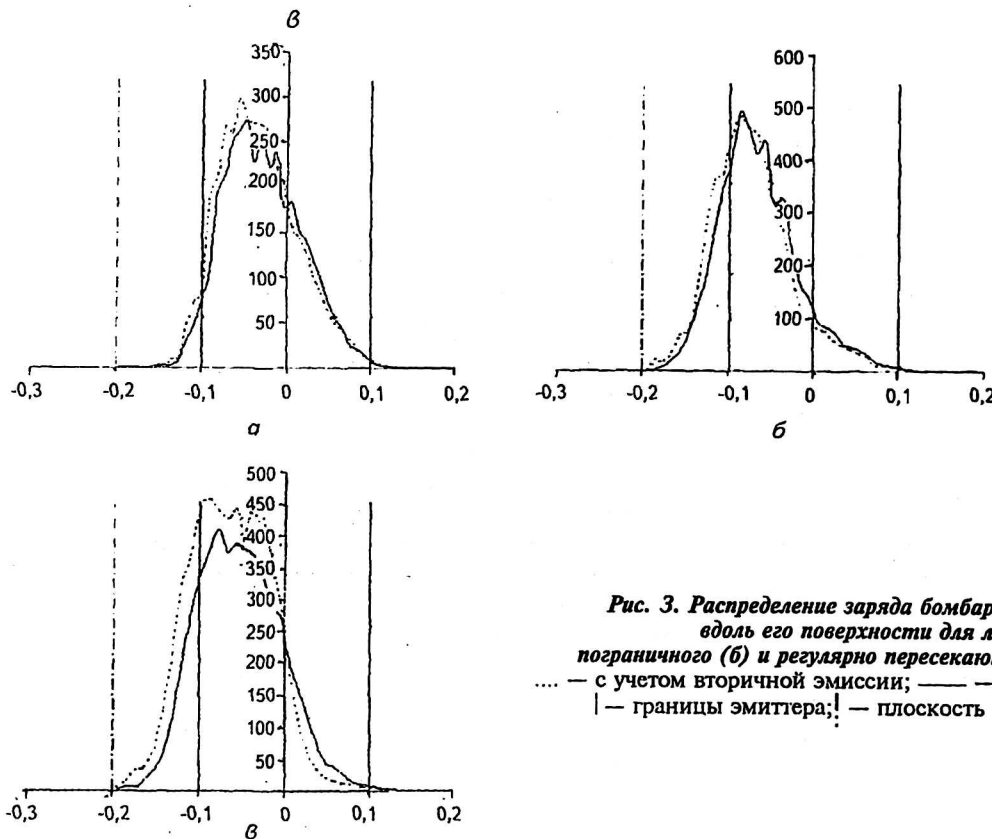


Рис. 3. Распределение заряда бомбардирующих катод частиц вдоль его поверхности для ламинарного (*a*), пограничного (*б*) и регулярно пересекающегося (*в*) пучков ($t_j = 0,2$): — с учетом вторичной эмиссии; — — без учета вторичной эмиссии; | — границы эмиттера; | — плоскость начала заднего электрода

Частицы, попадающие в область между левой границей эмиттера и началом заднего электрода, будут порождать вторичные электроны, которые окажутся в малом электрическом поле, образованном металлическим уголком "катод—задний электрод", и, следовательно, пройдут магнитную пробку, а вторичные электроны, стартующие с поверхности эмиттера, имеют при вылете такие же условия, как и первичные, значит, вероятность их захвата в ловушку должна быть не выше, чем у первичных. В связи с изложенным следует ожидать, что в системах с задним электродом в адиабатическую ловушку будет захвачено меньшее число вторичных электронов. Отмеченное выше предположение подтверждается рис. 4, а—в, на которых приведены зависимости захваченного в ловушку заряда Q_r от времени $t/T_{||}$ в системах формирования с задним электродом для разных типов пучков при различных значениях тока в ВЭП ($T_{||}$ — среднее время пролета электрона от катода до пространства взаимодей-

ствия). Сравнение приведенных выше данных с аналогичными величинами для электронно-оптических систем традиционного типа [5] показывает, что при учете вторичной эмиссии захваченный заряд Q_r становится примерно в 1,5 раза меньше, чем в системах с гладким катодом.

Следует отметить, что время T_r установления стационарного состояния в электронном потоке при учете вторичной эмиссии в системе с задним электродом уменьшается по сравнению с пучкой традиционного типа. Для ламинарного пучка с учетом вторичных электронов время T_r составило величину порядка 10—12 $T_{||}$, а в аналогичной системе с гладким катодом 14—16 $T_{||}$. Для пограничного потока время установления стационарного состояния электронного облака T_r при учете вторичной уменьшилось с 16—20 $T_{||}$ в системе формирования с гладким катодом до 12—14 $T_{||}$. Такая же тенденция наблюдается и для регулярно пересекающегося пучка, где время T_r уменьшается с 16—20 $T_{||}$ до 10—12 $T_{||}$.

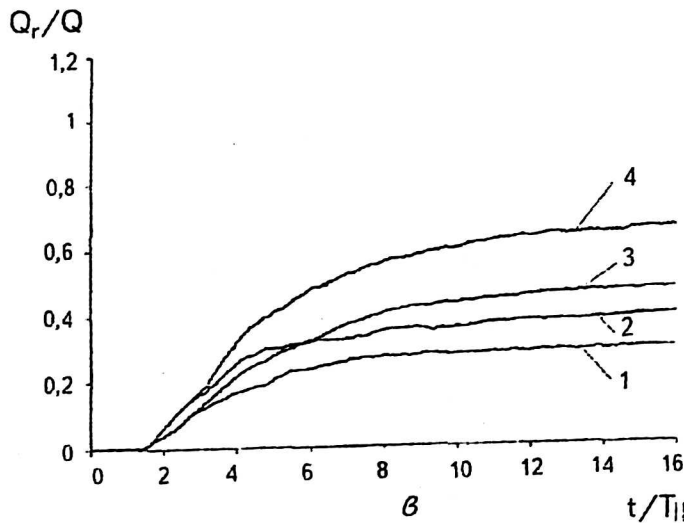
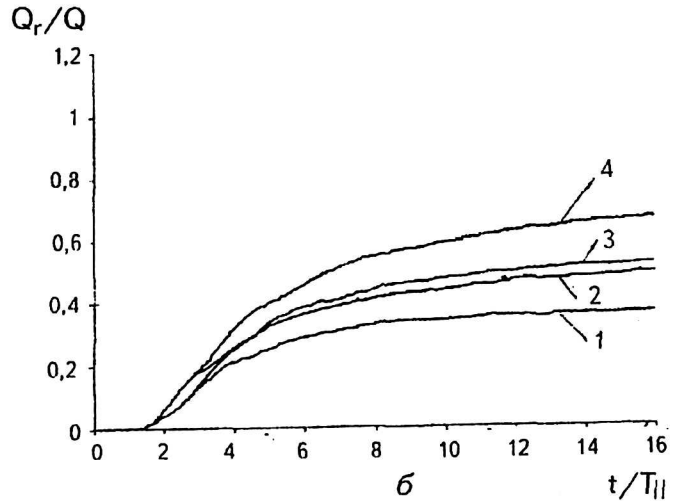
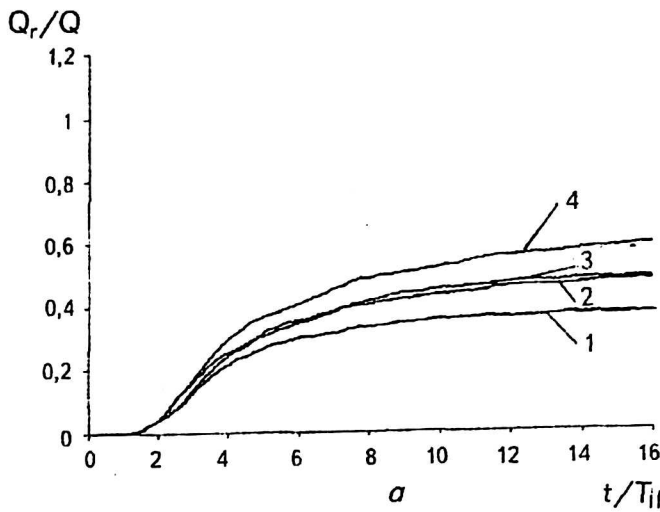


Рис. 4. Зависимость захваченного в ловушку заряда от времени в системах формирования с задним электродом: (1, 2 — без вторичной эмиссии — $t_j = 0,1$ и $t_j = 0,2$, соответственно; 3, 4 — с учетом вторичной эмиссии — $t_j = 0,1$ и $t_j = 0,2$, соответственно; Q — заряд первичного (не успевшего отразиться) пучка; а — ламинарный пучок; б — пограничный; в — регулярно пересекающийся пучок

Анализ распределений электронов по осцилляторным скоростям в системах с задним электродом при учете вторичной эмиссии показал, что имеется тенденция к уменьшению разброса вращательных скоростей электронов δv_L (таблица) по сравнению с системами формирования с гладким катодом, к более медленному снижению пичт-фактора с ростом тока и, следовательно, к некоторому улучшению качества ВЭП.

Показатели	$\sigma = 0$		$\sigma = 1,25$	
	$t_i = 0,1$	$t_i = 0,2$	$t_i = 0,1$	$t_i = 0,2$
g	1,61 (1,53)	1,29 (1,28)	1,6 (1,46)	1,29 (1,14)
$\delta v_L, \%$	25,5 (27)	33,9 (40)	24,3 (29,6)	36,6 (42,3)

Пограничный пучок, $d\psi = 26^\circ$, в скобках указаны величины g и δv_L для традиционной системы с гладким катодом [5].

Таким образом, наличие в системах формирования заднего электрода приводит к уменьшению влияния вторичной эмиссии на основные параметры ВЭП всех типов. Системы формирования с задним электродом можно рекомендовать как метод борьбы со вторичной эмиссией.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ №02-02-17105.

Литература

1. Гольденберг А. Л., Петелин М. И. Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке// Известия вузов. Сер. Радиофизика, 1973. Т. 16. № 1. С. 141—149.
2. Цимринг Ш. Е. Формирование винтовых электронных пучков. — В кн.: Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). Кн. 4. — Саратов: СГУ, 1974. С. 3—94.
3. Запелов В. Е., Куфтин А. Н., Лыгин В. К., Цимринг Ш. Е. Численное моделирование и экспериментальное исследование магнетронно-инжекторных пушек гиротронов// Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 11—12. С. 999.
4. Кривошеев П. В., Мануилов В. Н. Учет вторичных электронов при численном моделировании интенсивных винтовых пучков гиротронов// Прикладная физика. 2002. № 3. С. 80—87.
5. Кривошеев П. В., Мануилов В. Н. Влияние вторичной эмиссии на процесс захвата электронов в адиабатическую ловушку гиротрона (в печати).
6. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams// International Journal of Infrared and Millimeter waves. 2001. V. 22. № 8. P. 1119—1146.
7. Зайцев Н. И., Иляков Е. В. и др. Магнетронно-инжекторные пушки для релятивистских гиротронов сантиметрового диапазона длин волн// Прикладная физика. 2003. № 1. С. 27—34.

Influence of electric field allocation in the area of an electrostatic mirror on bombardment of the cathode by reflected electrons in gyrotrons

P. V. Krivosheev, V. N. Manuilov

Nizhniy Novgorod State University, Nizhniy Novgorod, Russia

Circumscribed are electron-optical systems (EOS) with a back electrode, in which a height of a back electrode h exceeds Larmor diameter D_L of an electron orbit above the emitter ($h > D_L$) noticeably. Given are the basic results of model operation for the relevant EOS on a dynamic mock-up in view of secondary emission. It is shown that the presence of a back electrode in forming systems gives in diminution of influence of secondary emission on parameters of beams of all types.