

УДК 621.384.6

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ВО ВТОРИЧНОЭМИССИОННОМ ИСТОЧНИКЕ КОАКСИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ С СЕГМЕНТИРОВАННЫМ КАТОДОМ

Н.И. Айзацкий¹, А.Н. Довбня¹, В.В. Закутин¹, Н.Г. Решетняк¹, Н.А. Довбня¹,
В.В. Митроченко¹, Т.А. Коваленко²

¹НИК «Ускоритель» ННЦ «ХФТИ»

1, Академическая, Харьков, 61108, Украина

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

4, пл. Свободы, 61077, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 19 ноября 2005 г.

Показана возможность генерации электронных пучков в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами с неоднородным распределением электрического поля по азимуту. Источником электронов является электронное облако вблизи наружной поверхности сегментов, где происходит вторичноэмиссионное размножение и накопление электронов. Обнаружен эффект накопления электронов в областях пониженного электрического поля при генерации вторичноэмиссионных электронов в ограниченных областях сегментов катода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электронный пучок, вторичноэмиссионный источник, магнетронная пушка, сегментированный катод

В последние годы широко исследуются источники электронов с холодными вторичноэмиссионными катодами [1, 2], которые имеют простую конструкцию, не теряют эмиссию после напуска атмосферы и т.д. В таких источниках со скрещенными электрическим и магнитным полями, при подаче импульса напряжения на катод, за счёт автоэмиссии появляются первичные электроны, которые при движении в электрическом и магнитном полях бомбардируют поверхность такого катода, за счёт вторичноэмиссионного размножения и накопления электронов вблизи поверхности катода образуется электронное облако, из которого формируется электронный пучок. Следует отметить, что вторичноэмиссионный механизм генерации пучка, вследствие его неразрушающего действия, обуславливает сохранение эмиссионных свойств катода в течение длительного времени, по оценкам до 100 тыс. часов.

В работе [3] рассмотрена возможность оптимизации накопления электронов вблизи цилиндрического вторичноэмиссионного катода за счёт создания магнитной ловушки на катоде и увеличения тока пучка. Результаты экспериментов показывают, что наличие «провала» магнитного поля $\sim 10\%$ позволяет значительно увеличить ток пучка. Ловушка электронов может быть образована при создании на катоде области пространства с пониженным значением электрического поля. При этом дрейфовая скорость электронов уменьшается, они большее время находятся в этой области, что эквивалентно накоплению электронов. В настоящей работе проведено исследование формирования электронного пучка в коаксиальной магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом, в которой имеется азимутальная неоднородность электрического поля.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Проведено моделирование движения электронов в системе с неоднородным электрическим полем на катоде в конструкции, изображенной на рис. 1 в поперечном сечении. В этой конструкции вторичноэмиссионный катод состоит из четырёх цилиндрических штырей, наружная поверхность (1) которого имеет цилиндрические сегменты (так называемый сегментированный катод). В продольном направлении катод имеет продольные пазы, образованные в местах сочленения штырей, вблизи мест соединения штырей друг с другом (2) образуется область пониженного значения электрического поля и, таким образом, в ней возможно накопление электронов.

Проведен расчёт распределения радиального электрического поля в промежутке сегментированный катод – анод (рис. 2) методом компьютерного моделирования. На рисунке показана 1/8 часть поперечного сечения пушки. Из рисунка видно, что наибольшее электрическое поле расположено у наружной поверхности катода (1) и уменьшается при движении вдоль катода к нижней точке соприкосновения катодных штырей (2). При движении от наружной поверхности катода к аноду, неравномерное по азимуту электрическое поле, вблизи анода становится практически однородным по азимуту.

Проведен расчёт траекторий электронов, выходящих из различных точек верхнего сегмента катода в реальном случае генерации пучка. При расчёте решалась плоская задача с учётом пространственного заряда электронного облака. На рис. 3 приведены траектории электронов, которые выходят из различных точек сегмента. Видно, что при выходе электрона из верхней части сегмента катода и при выходе из нижней части сегмента катода траектории электронов существенно изменяются. В первом случае амплитуда циклоиды

достаточно велика и траектория электронов между вершинами сегментов приближается к прямой линии. Во втором случае амплитуда циклоиды значительно уменьшается и траектория электронов практически повторяет огибающую катода. Это может быть связано с тем, что как видно из рис. 2, в верхней части сегмента сильнее электрическое поле, и при выходе в промежуток катод-анод электроны набирают большую энергию, чем при выходе из нижней части сегмента катода, вблизи места соединения штырей. Это подтверждается тем, что радиус циклоиды (пропорциональный энергии электрона) вблизи места соединения штырей больше при выходе из наружной части катода, чем при выходе из нижней части сегмента катода, вблизи места соединения штырей. Количество периодов циклоиды при движении электрона в этих областях также различно. При выходе из нижней части сегмента период циклоиды меньше, а их количество больше и в процессе движения по азимуту вдоль штырей изменяется слабо. Это также подтверждает приведенный выше вывод.

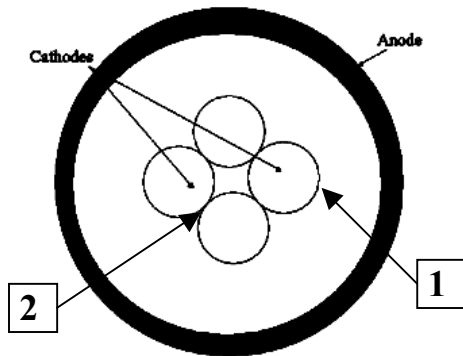


Рис. 1. Вторичноэмиссионная электронная пушка с сегментированным катодом (поперечный разрез). 1 – наружная область катода, 2 – места соединения штырей друг с другом

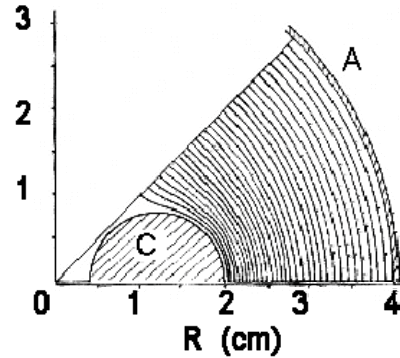
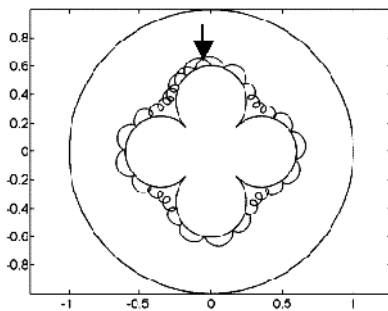
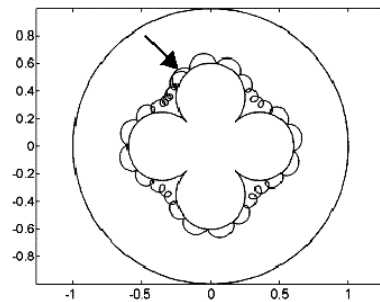


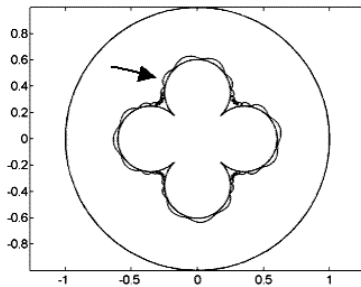
Рис. 2. Эквипотенциальные линии в промежутке катод (С) – анод (А).



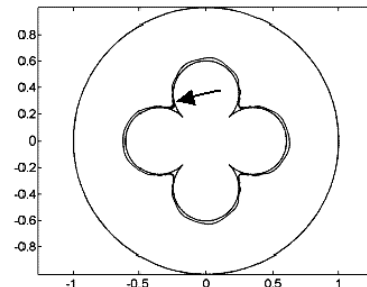
а



б



в



г

Рис. 3. Траектории электронов, стартующих с различных точек верхнего катода. Стрелками показано место выхода электрона. $y = R_0 \sin(\varphi_0) + R_1 \sin(\varphi_1)$, $x = R_0 \cos(\varphi_0) + R_1 \cos(\varphi_1)$.

На рисунке показаны следующие варианты: а) $\varphi_0 = 0,5\pi$; $\varphi_1 = 0,5\pi$; б) $\varphi_0 = 0,5\pi$; $\varphi_1 = 0,75\pi$; в) $\varphi_0 = 0,5\pi$; $\varphi_1 = \pi$; г) $\varphi_0 = 0,5\pi$; $\varphi_1 = 1,1\pi$. $U_c = -40 kV$, $B = 0,15 T$

С другой стороны, большее количество периодов обращения электронов с малой энергией говорит о том, что при выходе из нижней части сегмента, время нахождения электрона в области пониженного значения электрического поля увеличивается, что эквивалентно накоплению электронов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование параметров пучка проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 4. Импульс напряжения специальной формы от импульсного генератора [4], с выбросом на начальной части вершины и дальнейшей плоской частью, подавался на катод пушки, а анод подключен к резистору R3. Амплитуда выброса регулировалась в пределах 60...100 кВ, амплитуда плоской части импульса – 20...55 кВ, длительность спада выброса составляла ~ 0,3 мксек., длительность импульса ~ 8 мксек., частота повторения импульсов 10...20 Гц.

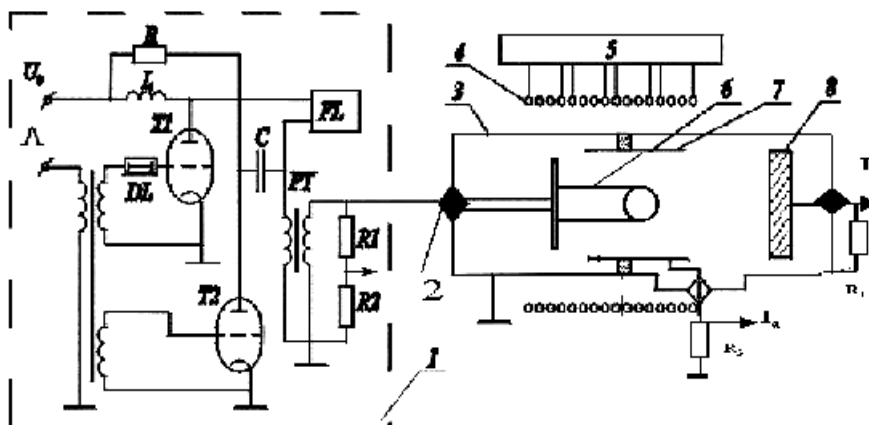


Рис.4. Схема установки. 1 - модулятор, 2 – изолятор, 3 - вакуумная камера, 4 - соленоид, 5 – источник питания соленоида, 6 – катод, 7 - анод, 8 - цилиндр Фарадея.

Исследования проводились с магнетронной пушкой с катодом, состоящим из 4 медных штырей (рис.1). Диаметр штырей, образующих катод – 16 мм, так что максимальный поперечный размер катода составлял 40 мм, исследования проводились с двумя диаметрами анодов – 80 мм и 70 мм. Длина катода – 70 мм, анода – 140 мм; материал катода – медь, анода – сталь. Магнетронная пушка размещалась в вакуумном объеме (3), давление в котором составляло $\sim 10^{-6}$ Торр. Магнитное поле создавалось соленоидом (4) подключенного к источнику постоянного тока.

Исследования параметров пучка проводилось с помощью 8-канального цилиндра Фарадея и компьютерной измерительной системы [5]. Точность измерений составляет 1...2%. Проводились измерения тока пучка с каждого из 8 сегментов цилиндра Фарадея, напряжения на катоде, анодного тока. Эти параметры обрабатывались за 16 следующих друг за другом импульсов. После этого проводилась компьютерная обработка результатов измерений и рассчитывался полный ток пучка, азимутальная однородность тока пучка и т.д. Поперечные размеры пучка определялись путём получения автографа на алюминиевой мишени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в магнетронной пушке с сегментированным катодом с неоднородной поверхностью и неоднородным по азимуту электрическим полем, развиваются процессы вторичноэмиссионного размножения и формируется электронный пучок. При напряжении на катоде 42 кВ получен ток пучка 15 А, при этом магнитное поле на катоде составляло ~ 1100 Э.

Исследована зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от распределения продольного магнитного поля вдоль оси системы (рис. 5). Видно, что при изменении распределения магнитного поля от спадающего к нарастающему ток пучка уменьшается. При этом имеется значительная нелинейность тока пучка от величины магнитного поля. Например, увеличение поля в районе пушки от 830 Э до 960 Э, т.е. на 16%, приводит к уменьшению тока пучка на 20%, а увеличение от 830 Э до 1680 Э, т.е. на 200%, приводит к резкому уменьшению тока пучка на 600%.

На рис. 6 приведена зависимость тока пучка в зависимости от величины магнитного поля в различных точках на оси системы – 8 см – в месте входа катода в анод, 14 см – в центре катода, 20 см - на выходе пушки, 26 см - на цилиндре Фарадея. Из рисунка видно, что увеличение поля приводит к уменьшению тока пучка. Например, увеличение поля в центре катода с 960 Э до 1230 Э, т.е. на 30% приводит к уменьшению тока с 12 А до 3,4 А, т.е. на 350%. Наиболее сильное влияние на ток пучка оказывает величина магнитного поля на входе катода в анод, изменение поля от 850 Э до 1020 Э, т.е. на 20% приводит к уменьшению тока с 12 А до 3,2 А, т.е.

на 375 %. Это позволяет регулировать ток пучка на цилиндре Фарадея, изменяя распределение магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки.

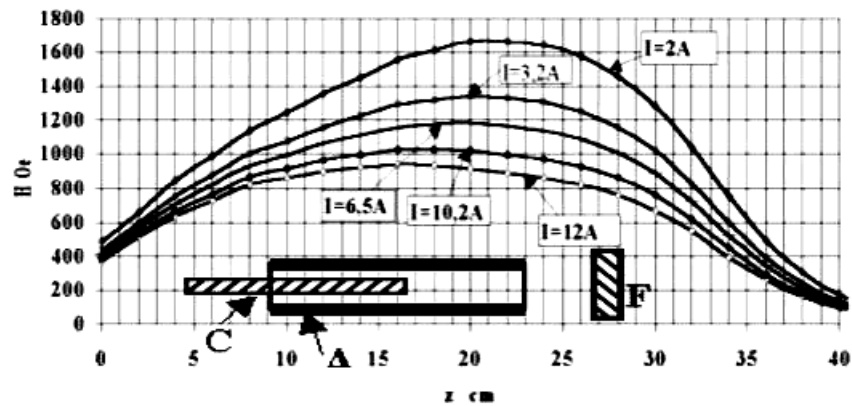


Рис. 5. Зависимость тока пучка I от распределения магнитного поля H вдоль оси z системы.

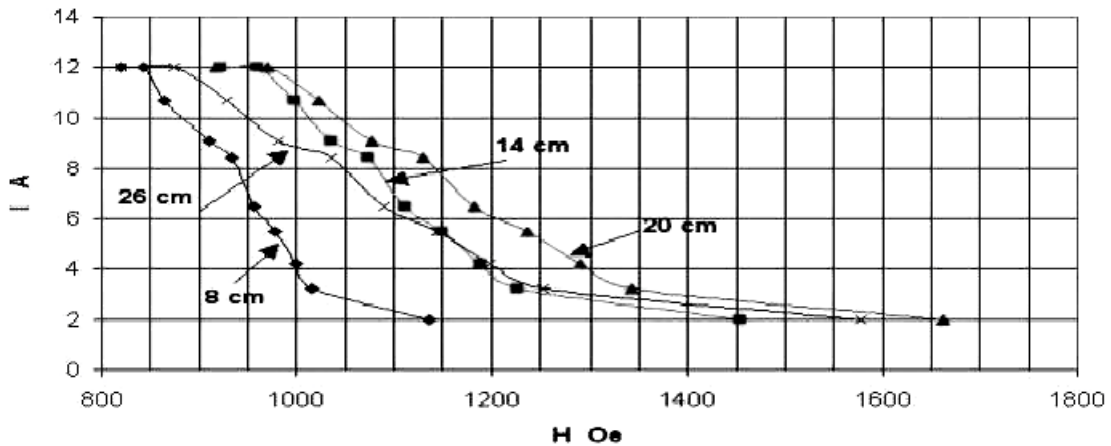


Рис. 6. Зависимость тока пучка от магнитного поля в различных точках системы - 8, 14, 20 и 26 см.

Проведено исследование поперечного сечения пучка и его азимутальной однородности. На рис. 7 показан интегральный отпечаток пучка 2 (полученный при наложении пучков в различных режимах), на который наложена расчётная траектория электрона 1, при его выходе из верхней точки катода (рис. 3а). Сравнение результатов расчётов и отпечатка, показывает, что отпечаток пучка близок к расчётной траектории электрона, приведенной на рис. 3а. Это говорит о том, что эмиссия первичных электронов и их вторичноэмиссионное размножение на катоде С происходит в основном на внешней поверхности штырей, максимально приближенной к аноду А. Об этом свидетельствует также и изучение поверхности катода после экспериментов – потемнение поверхности полированного катода значительно сильнее на внешней поверхности штырей, чем на поверхности вблизи соединения штырей (рис. 1).

В промежутке между штырями электроны формируют электронный слой, по форме повторяющий эквипотенциальную поверхность электрического поля, с учётом её изменения пространственным зарядом этого слоя (рис. 7, стрелка 2). В этом случае можно говорить о вторичноэмиссионной генерации электронов на вершинах сегментов и о накоплении электронов в промежутке между сегментами, где отсутствует металлическая поверхность и отсутствует «подпитка» электронного слоя вторичными электронами с этой поверхности. В результате дрейфа, электроны из области вершины первого сегмента перемещаются в область между сегментами и далее ко второму сегменту. Таким образом, образуется электромагнитная ловушка электронов, расположенная между вершинами сегментов.

Полученные результаты показывают, что амплитуда тока пучка магнетронной пушки с сегментированным катодом примерно в 3 раза меньше, чем для магнетронной пушки с гладким цилиндрическим катодом. Это объясняется отсутствием «подпитки» электронного слоя вторичными электронами с этой поверхности.

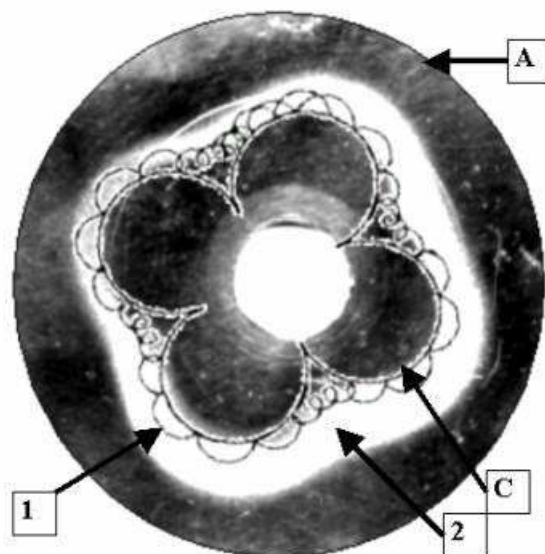


Рис. 7. Интегральный отпечаток пучка (2) с нанесенной траекторией электрона (1) и поверхностью катода (С) и анода (А)

В экспериментах обнаружено явление накопления электронов в области, расположенной между вершинами сегментов. Это даёт возможность использовать вторичноэмиссионные катоды для генерации электронов и выводить и накапливать их в области, где отсутствуют металлические поверхности и присутствуют только электрические и магнитные поля.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования показывают возможность генерации электронных пучков в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами с неоднородным распределением электрического поля по азимуту. Результаты показывают, что в нашем случае, источником электронов является электронное облако вблизи наружной поверхности сегментов, где происходит вторичноэмиссионное размножение и накопление электронов. Эти электроны, двигаясь в магнитном поле по азимуту, перемещаются в область между сегментами, где отсутствует металлическая поверхность, и накапливаются, образуя электромагнитную ловушку электронов. Полученные результаты говорят о том, что обнаружен эффект накопления электронов в областях пониженного электрического поля, при генерации вторичноэмиссионных электронов в ограниченных областях сегментов катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – В. 7. – С. 88-91.
2. Ives R.I., Mizuhara M. Improved magnetron injection guns for high power gyro devices // Program of ICOPS-2002, 29th IEEE Int. Conf. on Plasma Sci., Banff Alberta, Canada, May 26-30, 2002.
3. Saveliev Yu.M., Sibbett W., Parkes D.M. Characterisation of electron produced by cross-field secondary emission diodes // J. Appl. Phys. – 2001. – V.40. – Part 1, N 2B. – P. 940-943.
4. Dovbnya A.N., Reshetnyak N.G., Romas'ko V.P. et al. Pulsed modulators for feeding the powerful Microwave-devices based on magnetron guns with secondary-emission cathodes // Proc. of the Part. Accel. Conf., Chicago, USA, 18-22 June.2001. - V. 5.- P. 3759-3761.
5. Boriskin V.N., Ayzatsky N.I., Gurin V.A. et al. Multichannel system for research of secondary-emission pulse electron beam generation // Abstracts PCaPAC2002, INFN-LNF Frascati (Rome) Italy, October, 2002. – P.30.

ELECTRON BEAM PRODUCTION IN COAXIAL GEOMETRY SECONDARY-EMISSION SOURCE WITH SEGMENTED CATHODE

N.I. Ayzatskiy¹, A.N. Dovbnya¹, V.V. Zakutin¹, N.G. Reshetnyak¹, N.A. Dovbnya¹, T.A. Kovalenko²
¹Scientific-Production Complex "Accelerator" National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"
 Ukraine, 61108, Kharkov, 1, Akademicheskaya St.

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

²Kharkov National University
 Ukraine, 61077, Kharkov, sq. Svobody, 4

It is shown generation possibility of electron beams in magnetron guns with secondary-emission cathodes with not uniform distribution azimuth electrical field. Electrical cloud near external surface of segments is electron source. Effect of electron storage in fields with reduced electrical field at secondary-electron generation in limited fields of cathode segments is discovered.

KEY WORDS: electron beam, secondary emission source, magnetron gun, segmented cathode