

УДК 621.384.6

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В МНОГОЛУЧЕВОЙ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКЕ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ

А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, Н.И. Айзацкий, Т.А. Коваленко, В.П. Ромасько, И.А. Чертищев, Г.И. Чурюмов, Н.А. Довбня

ННЦ "Харьковский физико-технический институт"

ул. Академическая 1, г. Харьков, Украина, 61108

zakutin@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 11 марта 2011 г.

Проведены экспериментальные исследования формирования 4-х лучевого электронного пучка в электроннооптической системе, содержащей магнетронные пушки с холодными металлическими вторичноэмиссионными катодами. Изучено время разброса формирования лучей от амплитуды и распределения магнитного поля. Исследован режим формирования сгустков электронного тока. По результатам исследований сделан вывод о возможности создания прямоугольных катодных матриц на основе магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами и стержневыми анодами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнетронная пушка, вторичноэмиссионный катод, электронные пучки, многолучевой пучок, катодная матрица

FORMATION OF SPATIALLY PERIODIC ELECTRON BEAMS IN A MULTI-BEAM MAGNETRON GUN WITH SECONDARY-EMISSION CATHODES

A.N. Dovbnya, V.V. Zakutin, N.G. Reshetnyak, N.I. Ayzatsky, T.A. Kovalenko, V.P. Romas'ko, I.A. Chertishchev, G.I. Churyumov, N.A. Dovbnya

National Science Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology"

61108, Akademichna, 1, Kharkov, Ukraine

Experimental studies have been made into formation of a four-beam electron flow in the electron-optical system comprising magnetron guns with cold metal secondary-emission cathodes. The beam formation spread time was investigated as a function of magnetic field amplitude and distribution. The mode of electron-current bunches formation has also been studied. The results of investigations suggest the conclusion on a possibility of creating rectangular cathode matrices based on magnetron guns with secondary-emission cathodes and rod anodes.

KEY WORDS: magnetron gun, secondary-emission cathode, electron beams, multi-beam flow, cathode matrix

ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВО-ПЕРІОДИЧНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ В БАГАТОПРОМЕНЕВОЙ МАГНЕТРОННІЙ ГАРМАТІ З ВТОРИННОЕМІСІЙНИМИ КАТОДАМИ

А.М. Довбня, В.В. Закутін, М.Г. Решетняк, М.І. Айзацький, Т.О. Коваленко, В.П. Ромасько, І.О. Чертіщев, Г.І. Чурюмов, Н.А. Довбня

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

61108 вул. Академічна 1, м. Харків, Україна

Проведені експериментальні дослідження формування 4-х променевого електронного пучка в електронно-оптичній системі магнетронних гармат з холодними металевими вторинноемісійними катодами. Вивчений час розкиду формування променів від амплітуди і розподілу магнітного поля. Досліджений режим формування згустків електронного струму. За наслідками досліджень зроблений висновок про можливість створення прямокутних катодних матриць на основі магнетронних гармат з вторинноемісійними катодами і стрижньовими анодами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнетронна гармата, вторинноемісійний катод, електронні пучки, багатопроменевий пучок, катодна матриця

Формирование интенсивных многолучевых электронных пучков представляет интерес для создания многолучевых СВЧ – приборов, например, широкополосных многолучевых клистронов и клистронов с улучшенными выходными характеристиками [1-4]. При создании таких приборов используется многолучевая электронно-оптическая система (ЭОС), содержащая термоэмиссионный оксидный или металлопористый катод и формирующая несколько электронных пучков. Как показано в работах [5, 6], для создания многопучковых ЭОС можно использовать системы магнетронных пушек с холодными металлическими вторичноэмиссионными катодами. Однако при создании подобных малогабаритных многопучковых ЭОС возникают проблемы, связанные с идентичностью магнетронных пушек, содержащих катод и сплошной цилиндрический анод.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования формирования 4-х независимых электронных пучков в ЭОС, содержащей магнетронные пушки с холодными металлическими вторичноэмиссионными катодами. Особенностью исследуемых ЭОС является применение анодов, выполненных в виде стержней и их расположении в местах пересечения взаимно перпендикулярных линий (в вершинах квадратов),

а катодов в местах пересечения диагоналей, соединяющих аноды, при этом осуществляется переход к прямоугольной системе расположения катодов и анодов. В результате образуется периодическое расположение электронных пушек в прямоугольной системе координат (катодная матрица), число которых можно увеличить как в одну (пучок близкий к линейному), так и в обе стороны (образуя любую конфигурацию пучка в поперечной плоскости). Цель работы – исследование формирования электронных пучков в системе 4-х вторичноэмиссионных источников.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились с системой пространственно-периодических магнетронных пушек (ячеек) со штыревыми анодами и вторичноэмиссионными катодами. Общая схема ЭОС представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, аноды расположены в горизонтальной плоскости на пересечении осей x и y , которые образуют квадраты, а катоды расположены между ними на пересечении диагоналей. Таким образом, образуется система из 4-х ячеек. Каждая ячейка содержит анод, состоящий из 4-х медных штырей диаметром 5 мм, образуя квадрат со стороной 20 мм.

Азимутальное электрическое поле в ячейке в зазоре анод-катод неоднородное, но при данных размерах ячейки вблизи катода электрическое поле однородно и возможно выполнение условий вторичноэмиссионного размножения электронов и формирования пучка.

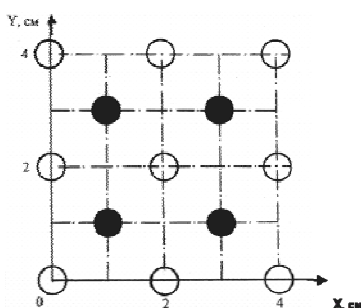


Рис.1. Схема ЭОС из четырех магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами и стержневыми анодами

Эксперименты проводились на установке схема, которой приведена на рис.2. Для питания вторичноэмиссионной системы использовался импульсный генератор, который формировал высоковольтный импульс напряжения с амплитудой плоской части импульса до 40 кВ и с амплитудой выброса на вершине ~80 кВ, который подавался на катоды пушек. Частота следования импульсов 3...7 Гц. Система пушек размещена в вакуумной камере, в которой давление было $\sim 10^{-6}$ Торр.

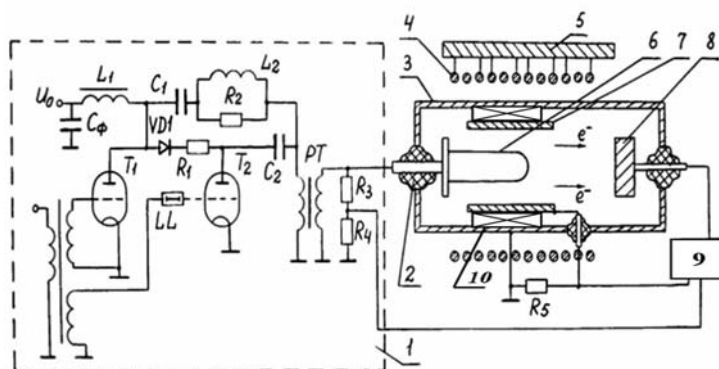


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

- 1 – импульсный генератор, 2 – изолятор, 3 – вакуумная камера, 4 – соленоид, 5 – источник питания соленоида, 6 – катод, 7 – анод, 8 – цилиндр Фарадея, 9 – компьютерная измерительная система.

Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создавалось соленоидом, состоящим из 4-х секций. Изменяя ток в секциях соленоида, можно было регулировать амплитуду и продольное распределение магнитного поля.

Измерение токов электронных пучков осуществлялось компьютерной измерительной системой и осциллографом Tektronix TDS-2014 с помощью цилиндра Фарадея, который имеет 4 сектора с временем нарастания ~ 2 нс для измерения тока пучка каждой пушки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Были проведены эксперименты с системой из 4-х магнетронных пушек, которые показали, что в диапазоне напряжений на катоде 16...32 кВ происходит вторичноэмиссионное размножение электронов и устойчивая генерация 4-х лучевого электронного пучка.

Исследована зависимость тока лучей от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки пучков до цилиндра Фарадея для пяти случаев (рис.3). Эти распределения были использованы при исследовании различных режимов формирования пучка.

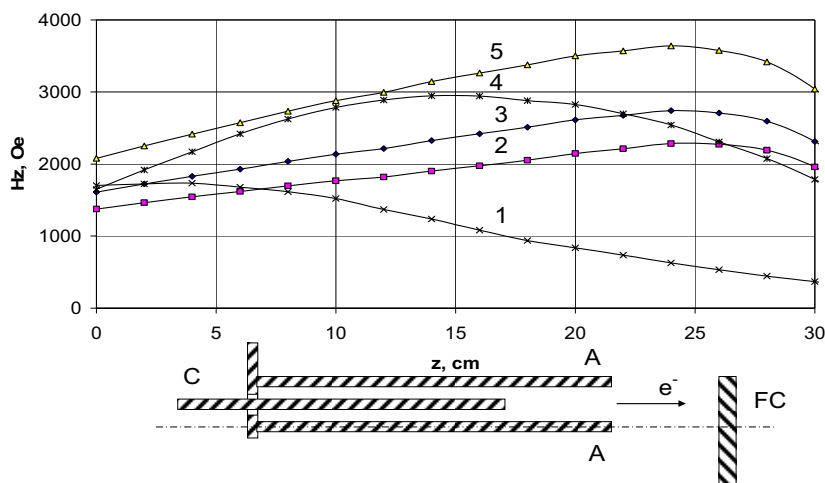


Рис. 3. Распределение продольного магнитного поля для 5-ти случаев и расположение элементов.
С – катод, А – анод, FC –цилиндр Фарадея.

На рис.4 приведены типичные осциллограммы импульсов тока лучей с 4-х цилиндров Фарадея (I_1, I_2, I_3, I_4). Приведенные осциллограммы токов лучей с каждой ячейки показывают, что формы импульсов практически совпадают друг с другом, а отношение токов с различных ячеек во времени в течение импульса практически постоянно. Это говорит о том, что процесс вторичноэмиссионного размножения электронов устойчив в течение длительности ~ 50 мкс. При напряжении на катоде ~ 25 кВ и распределении магнитного поля, показанного на рис.3 (кривая 4), усредненное значение (за 8 импульсов) тока с каждой ячейки составляло 4,1...4,3 А. Небольшое различие в токах $\sim 5\%$ с одной стороны может быть связано с нарушением центровки катодов относительно анодов, а с другой стороны, погрешность измерительной системы также могла вносить свой вклад в это различие.

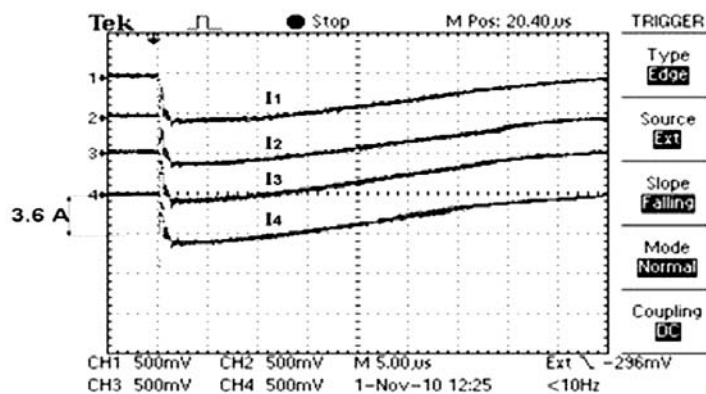


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока лучей с 4-х цилиндров Фарадея (I_1, I_2, I_3, I_4).

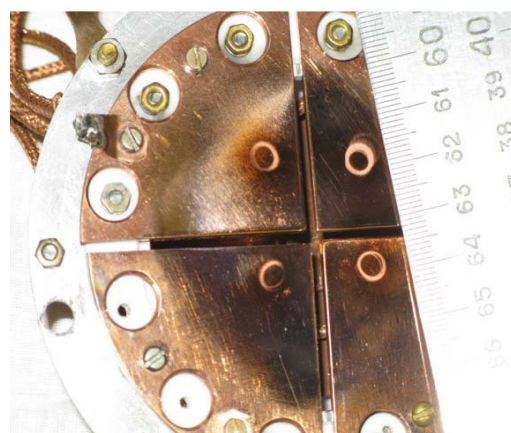


Рис. 5. Отпечаток пучка.

Была исследована зависимость тока луча одной пушки и суммарного тока с 4-х пушек от напряжения на катоде в диапазоне 15...26 кВ для двух распределений магнитного поля вдоль оси (рис.3, кривые 4, 5). Показано, что эта зависимость подчиняется закону $\propto 3/2$, как в одиночной ячейке, так и для системы из 4-х пушек.

На рис.5. приведен отпечаток пучка, полученный на медной мишени на расстоянии 50 мм от среза анода. Измерения показали, что данная катодная матрица формирует трубчатые лучи, имеющие вид окружностей и расположенных в местах соответствующих расположению матричных катодов, наружный диаметр кольца ~ 6 мм, а толщина «стенки» $\sim 0,7$ мм.

Были проведены измерения времени нарастания импульса тока пучка в каждой пушке в диапазоне напряжений 16...26 кВ. Из рис. 6 видно, что минимальное время нарастания по уровню 0,1...0,9 составляет ~3 нс, при напряжении на катоде 24 кВ. При этом, как видно из осциллограмм, закон нарастания тока пучка в каждой пушке совпадает и близок к линейному. Это указывает на то, что за короткое время число актов размножения вторичных электронов было достаточно для достижения плотности пространственного заряда необходимой для самоподдерживающейся вторичной эмиссии в 4-х пушках с холодными вторичноэмиссионными катодами.

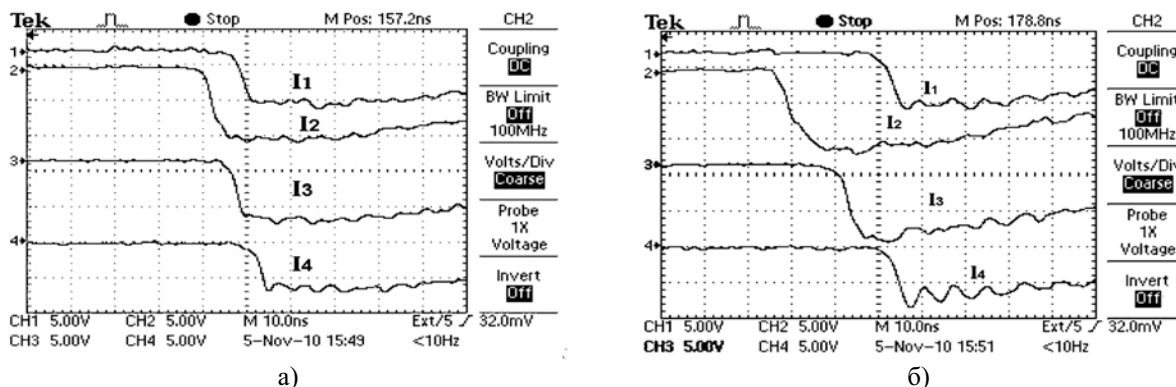


Рис.6. Начальная часть осциллограмм импульсов токов лучей с 4-х цилиндров Фарадея (I_1, I_2, I_3, I_4). а) оптимальный случай, б) неоптимальный случай.

Проведено исследование времени формирования лучей в каждой пушке от амплитуды и распределения магнитного поля, показанного на рис.3 (кривая 5). Из рис. 6а видно, что минимальный разброс времени составляет ~10 нс. При уменьшении или увеличении амплитуды магнитного поля на $\Delta H \sim 350$ Э от распределения (рис.3, кривая 5) разброс времени формирования лучей увеличивается до 25 нс (рис.6б). На рис.7 приведена зависимость разброса по времени формирования 4-х лучей от амплитуды магнитного поля. Видно, что имеется область оптимального магнитного поля, где разброс составляет ~4...8 нс, а при увеличении или уменьшении магнитного поля увеличивается до 25 нс. Таким образом, определены оптимальные условия для получения малого разброса времени формирования лучей.

В экспериментах был получен режим формирования сгустков тока пучка одновременно в 4-х пушках. Генерация сгустков была получена вблизи нижней границы формирования электронного пучка, когда величина магнитного поля (рис. 3, кривая 2) в месте ввода катода в анод в 1,2...1,25 выше поля отсечки Хэлла.

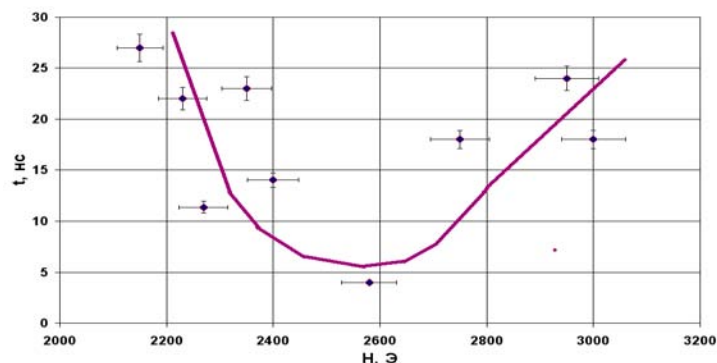


Рис. 7. Зависимость разброса по времени формирования 4-х лучей от амплитуды магнитного поля на катоде.

На рис.8а приведены фрагменты осциллограммы напряжения (U) и электронного тока с 3-х цилиндров Фарадея (I_1, I_2, I_3). Видно, что токи состоят из отдельных импульсов, при этом амплитуда и форма каждого импульса практически совпадают. Отличие амплитуды сгустков в каждом импульсе ~10%. Вершина импульса напряжения имеет модуляцию близкую к синусоидальной амплитудой ~20 кВ и начало генерации каждого импульса происходит на соответствующем спаде синусоидальной вершины импульса. При увеличении напряжения на катодах до напряжения отсечки U^* [7,8], нарушаются условия вторичноэмиссионного размножения электронов и происходит срыв формирования пучка. Длительность сгустков на полувысоте – 1 мкс. Колебания напряжения на катоде происходят с частотой ~0,5 МГц, которая зависит от паразитных параметров импульсного генератора (индуктивности, емкости импульсного трансформатора).

На рис. 8б приведены фрагменты осциллограмм импульсов электронного тока с 3-х цилиндров Фарадея

(I_1, I_2, I_3) и напряжения на катоде (U), которые были получены, когда амплитуда продольного магнитного поля в начале катода (рис.3, кривая 3) в 1,6 раза превышает поле отсечки Хэлла. Как видно из осциллограммы напряжения (U), вершина импульса имеет модуляцию близкую к синусоидальной малой амплитуды $\sim 3,5$ кВ. Модуляция токов электронных лучей (I_1, I_2, I_3) происходит на частоте ~ 7 МГц при длительности сгустков на полувысоте 40...60 нс. Максимальная глубина модуляции тока пучков достигает $\sim 100\%$.

Следует отметить, что генерация сгустков электронного тока реализовывалась как в случае нарастающего магнитного поля (рис.3, кривые 2, 3) с градиентом ~ 45 Э/см, так и в случае спадающего поля (рис.3, кривая 1) с градиентом ~ 65 Э/см. При этом, необходимым условием было, чтобы амплитуда магнитного поля в области ввода катодов в анод была практически одинаковой. При дальнейшем увеличении магнитного поля (рис.3, кривая 5) модуляция, как катодного напряжения, так и токов электронных лучей исчезает и формируются пучки с плоской вершиной, форма, которых показана на рис.4.

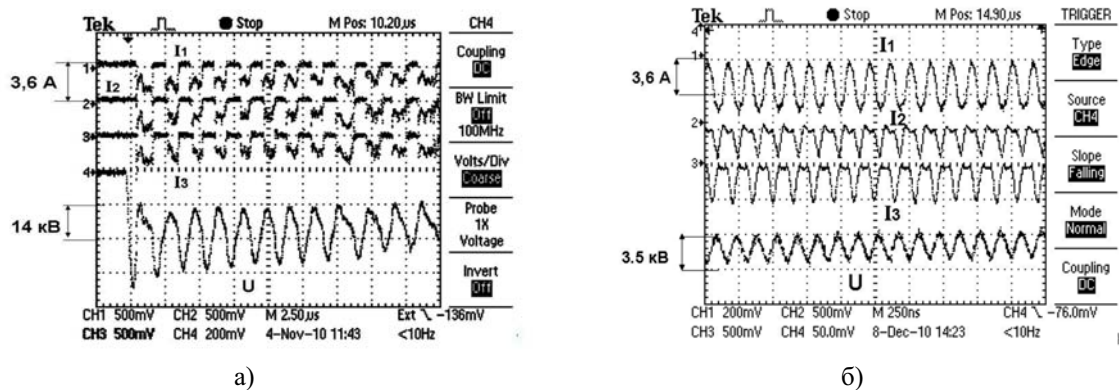


Рис.8. Фрагменты осциллограммы напряжения на катоде (U) и импульсов токов с 3-х цилиндров Фарадея (I_1, I_2, I_3).

Исследована зависимость частоты следования сгустков (рис.9, кривая 2) и величины электронного тока (рис.9, кривая 1) от амплитуды магнитного поля. Как видно из рисунка 9, зона генерации пучка по магнитному полю достаточно широкая и составляет $\Delta H \sim 1300$ Э. При уменьшении амплитуды магнитного поля от границы ΔH снизу или увеличении сверху нарушаются условия вторичноэмиссионного размножения электронов, и происходит срыв процесса формирования электронного пучка.

Таким образом, в зависимости от величины магнитного поля, а следовательно от значения дрейфовой скорости в скрещенных полях $V_d = cE/H$, которая в экспериментах изменялась от 0,065с до 0,14с возможно получение различных режимов формирования пучка: от модулированного электронного пучка на частоте ~ 7 МГц с глубиной модуляции 60...100% и длительностью импульса $\sim 40...60$ нс до импульса с плоской вершиной. Как показали эксперименты, формирование сгустков в значительной степени зависит от состояния электронного облака, которое определяется автоэмиссией электронов из области, расположенной вблизи ввода катодов в аноды.

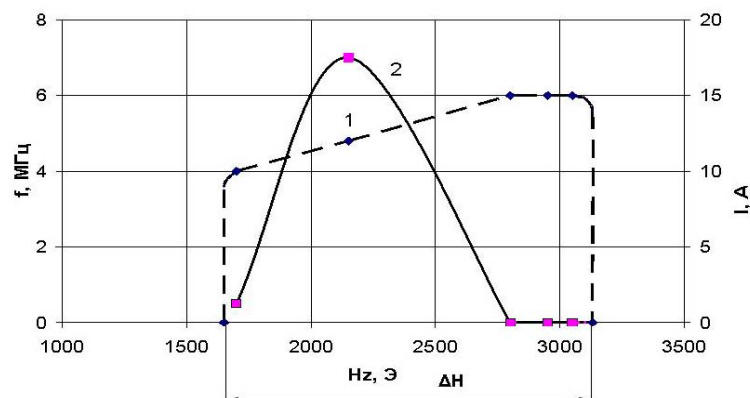


Рис.9. Зависимость частоты следования сгустков (кривая 2) и тока электронного пучка (кривая 1) от амплитуды магнитного поля ($U_n \sim 24$ кВ).

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают возможность создания прямоугольных катодных матриц на основе магнетронных пушек с холодными металлическими вторичноэмиссионными катодами и стержневыми анодами. Исследованная система имеет простую конструкцию, содержащую унифицированные магнетронные пушки,

что позволяет путём увеличения их количества создавать катодные матрицы с большим количеством электронных пучков различной конфигурации в прямоугольной системе координат.

Проведенные исследования показали, что в ЭОС магнетронных пушек со стержневыми анодами формируется 4х лучевой электронный пучок. Время разброса формирования лучей зависит от амплитуды и распределения магнитного поля. Во вторичноэмиссионной системе реализуется режим формирования сгустков электронного тока, при этом частота следования и длительность сгустков зависит от амплитуды магнитного поля. Многолучевой электронный пучок представляет интерес для создания многолучевых СВЧ – приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patent USA № 3248597, kl. 315-5.16, opubl. 26.04.1966.
2. Patent RF № 98118883/09, kl. H01/25/10, opubl. 15.10.1998.
3. I.A. Frejdovich, P.V. Nevsky, V.P. Sakharov et al. Multi-beam klystrons with reverse permanent magnet focusing system as the universal RF power sources for the compact electron accelerators.// Abstract XX-th Russian Conference on Charged Particle Accelerators (RuPAC 2006).-September 10-14, 2006, BINP, Novosibirsk, Russia, p. 62.
4. A. Larionov, S. Fukuda. Design of the confined flow multiple beam guns with a compression for L and X-band powerful klystrons. Proceedings of the 8th International Vacuum Electronics Conference, IVEC 20007, Kitakyushu, Japan, May 15-17, 2007, p, 381.
5. Ju.Ja. Volkolupov, A.N. Dovbnja, V.V. Zakutin, M.A. Krasnogolovec, N.G. Reshetnjak, V.V. Mitrochenko, V.P. Romas'ko, G.I. Chjurjumov. Poluchenie mownyh jelektronnyh puchkov v magnetronnyh pushkah s vtorichnojemissionnymi katodami.// ZhTF.-2001.-T.71.-V.7.-S.88-91.
6. N.I. Ajzackij, V.N. Boriskin, A.N. Dovbnja, V.V. Zakutin, V.A. Kushnir, V.V. Mitrochenko, N.G. Reshetnjak, V.P. Romas'ko. Generacija jelektronnyh puchkov v mnogokatodnom vtorichnojemissionnom istochnike.// ZhTF.-2003.-T.73.-V.2.-S.245-249.
7. Yu.M. Saveliev, W. Sibbett, D.M. Parkes. Self-excitation and operational characteristics of the crossed-field secondary emission electron source //Review of Scientific Instruments.-December 1999.-Vol.70.-N12.-P.4502-4514.
8. N.I. Ajzackij, A.N. Dovbnja, V.V. Zakutin, V.P. Romas'ko, I.A. Chertiwev, T.A. Kovalenko Formirovanie sгustkov jelektronnogo toka v magnetronnoj pushke s vtorichnojemissionnym katodom // Visnik HNU. Seriâ fizična Âdra, çastinki, polâ. №808. - 2008. - Vyp.1(37). - S.85-89.