

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 стрижневими анодами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнетронна гармата, вторинноемісійний катод, електронні пучки, багатопроточний 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 вторично-эмиссионными 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 вторично-эмиссионными 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.

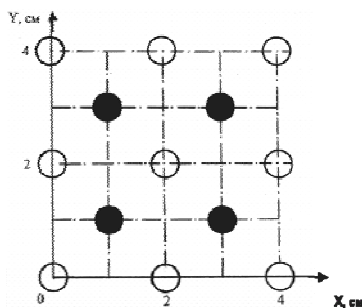


Рис.1. Схема ЭОС из четырех магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами и стержневыми анодами

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.

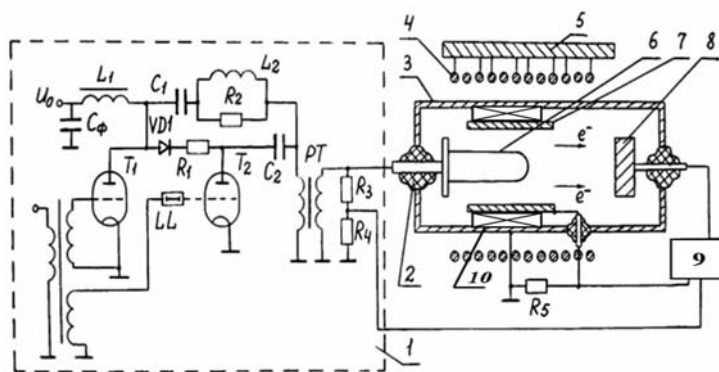


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

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.

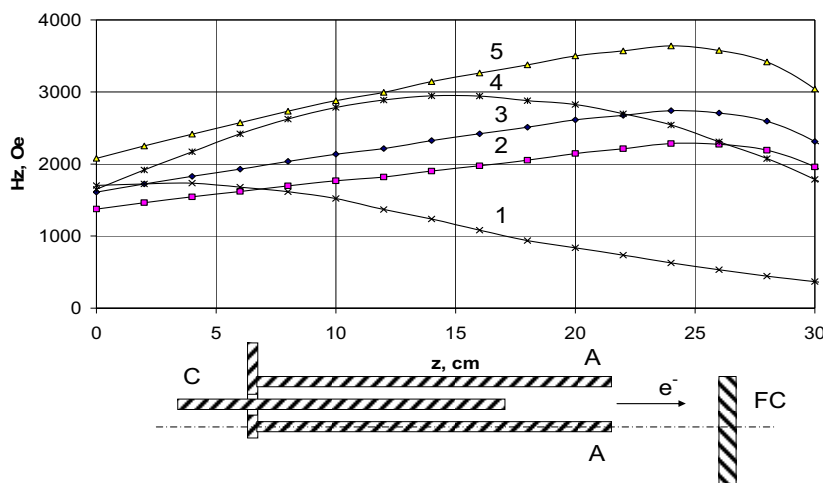


Рис. 3. Распределение продольного магнитного поля для 5-ти случаев и расположение элементов.
C – катод, A – анод, FC –цилиндр Фарадея.

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 ~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.

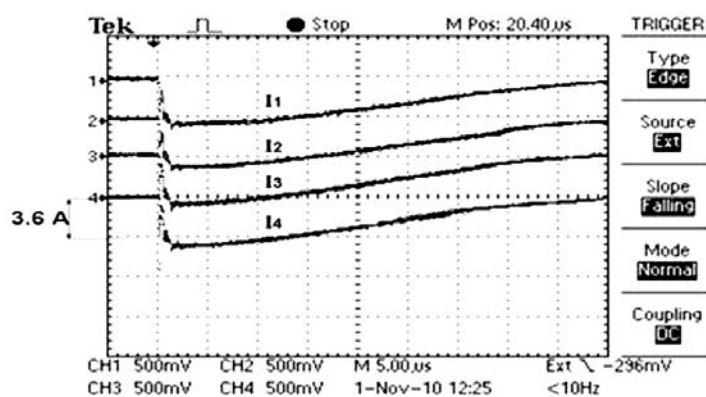


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока лучей с 4-х цилиндров Фарадея (I_1, I_2, I_3, I_4).

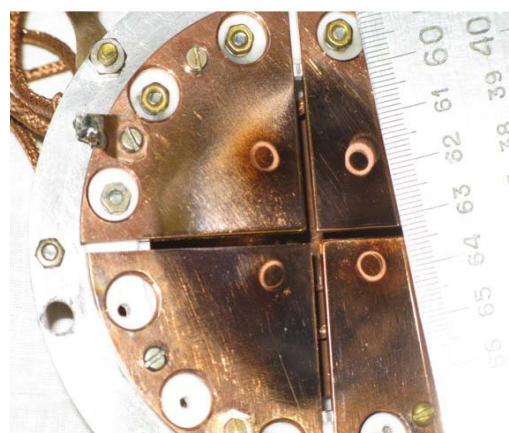


Рис. 5. Отпечаток пучка.

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» ~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.

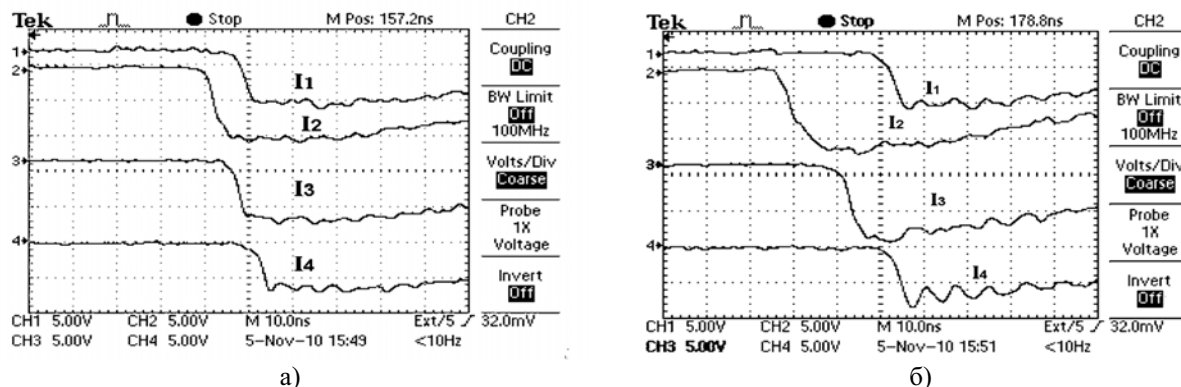


Рис.6. Начальная часть осциллограмм импульсов токов лучей с 4-х цилиндров Фарадея (I_1 , I_2 , I_3 , I_4).
а) оптимальный случай, б) неоптимальный случай.

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.

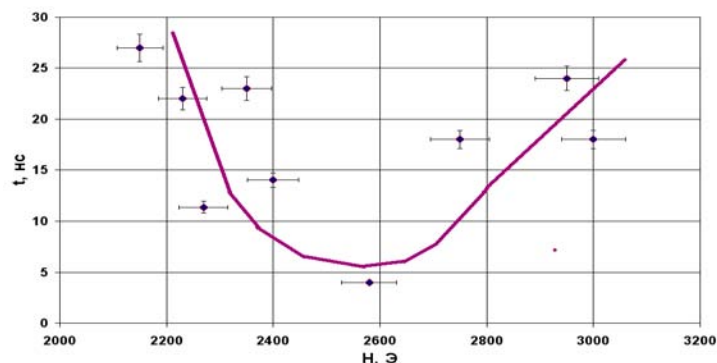


Рис. 7. Зависимость разброса по времени формирования 4-х лучей от амплитуды магнитного поля на катоде.

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.

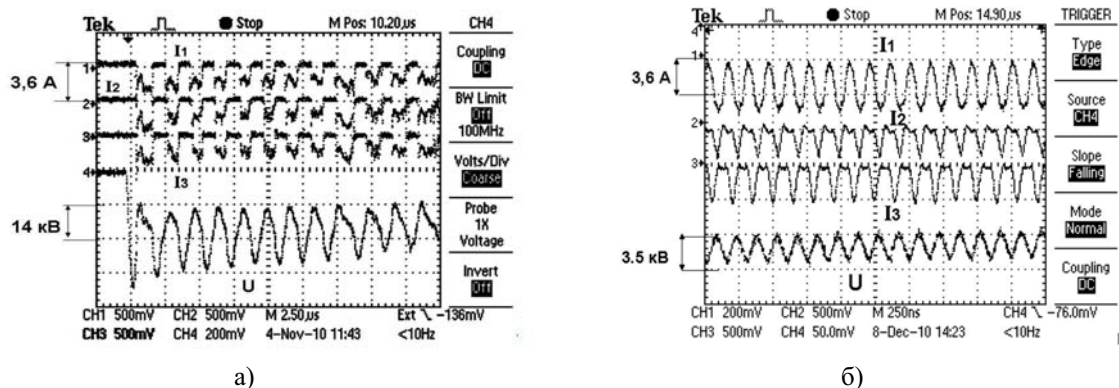


Рис.8. Фрагменты осциллограммы напряжения на катоде (U) и импульсов токов с 3-х цилиндров Фарадея (I_1 , I_2 , I_3).

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 ~ 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.

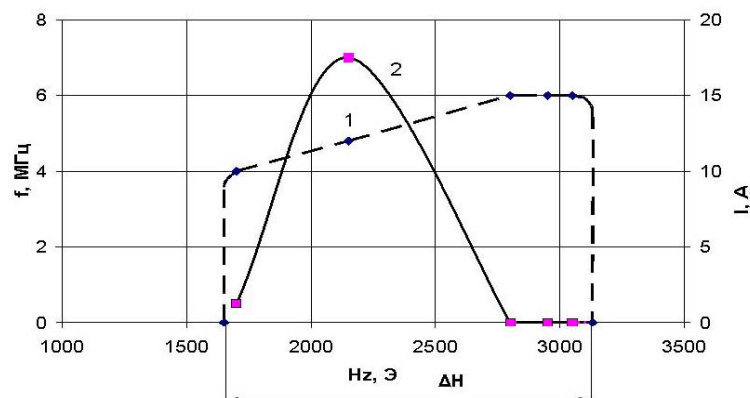


Рис.9. Зависимость частоты следования сгустков (кривая 2) и тока электронного пучка (кривая 1) от амплитуды магнитного поля ($U_n \sim 24$ кВ).

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 vtorychnojemissionnymi 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 vtorychnojemissionnom 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 sgustkov jelektronnogo toka v magnetronnoj pushke s vtorychnojemissionnym katodom // Visnik HNU. Seriâ fizična Âdra, častinki, polâ. №808. - 2008. - Vyp.1(37). - S.85-89.