

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ

Н. И. АЙЗАЦКИЙ, В. Н. БОРИСКИН, А. Н. ДОВБНЯ, Н.А. ДОВБНЯ, А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК, В. П. РОМАСЬКО, И. А. ЧЕРТИЩЕВ

В статье представлены экспериментальные и теоретические результаты по формированию радиального электронного пучка с энергией частиц 75...85 кэВ магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом. Изучена зависимость параметров тока пучка и его распределение вдоль длины колец от амплитуды магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля. Исследован режим формирования сгустков электронного тока. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока в спадающем магнитном поле соленоида.

Ключевые слова: магнетронная пушка, вторичноэмиссионный катод, электронный пучок, распределение магнитного поля, градиент спада поля, математическое моделирование, гистограмма.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к физике процессов со скрещенными электрическим и магнитным полями обусловлен их широким применением в вакуумной электронике больших мощностей, ускорительной технике и т. д. Представляет большой интерес использование в этих областях в качестве источников электронов магнетронных пушек с холодными вторичноэмиссионными катодами [1, 2]. Принцип работы таких пушек основан на вторичноэмиссионном размножении электронов, образовании электронного облака и формировании электронного пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях. Использование такого механизма эмиссии позволяет говорить о большом времени жизни катода (согласно оценкам до 100 тыс. часов). На основе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом был создан ускоритель электронов, который использует осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней [3].

В данной работе представлены экспериментальные и теоретические результаты исследований по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида и построена математическая модель движения электронного потока в этом поле. Изучена возможность облучения внутренней цилиндрической поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На ускорителе электронов проведены исследования по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом и измерению его параметров при транспортировке пучка в спадающем магнитном поле соленоида, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор (1), который обеспечивал получение импульса напряжения с выбросом на вершине ~ 150 кВ, амплитуда плоской части импульса ~100 кВ, длительность импульса ~15 мкс. Источник электронов (С – катод, А – анод) размещается в вакуумном объеме 3. Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создается соленоидом (4), состоящим из 4 секций. Питание секций осуществляется от источников постоянного тока. Обработка результатов измерений параметров импульса напряжения токов в радиальном и осевом направлении проводилась с помощью компьютерной измерительной системы (6).

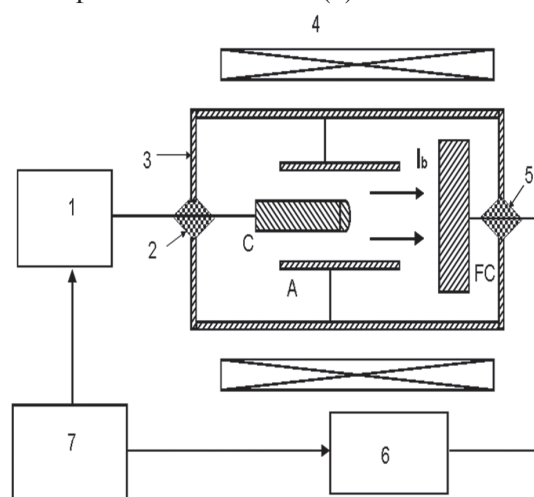


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:
1 – высоковольтный импульсный генератор;
2, 5 – проходные изоляторы; 3 – вакуумная камера; магнетронная пушка с вторичноэмиссионным катодом (С – катод, А – анод); 4 – соленоид, создающий продольное магнитное поле; FC – цилиндр Фарадея;
6 – компьютерная измерительная система;
7 – блок синхронизации

На рис. 2 приведена измерительная система для исследования распределения тока в радиальном направлении при транспортировке электронного пучка в спадающем магнитном поле соленоида.

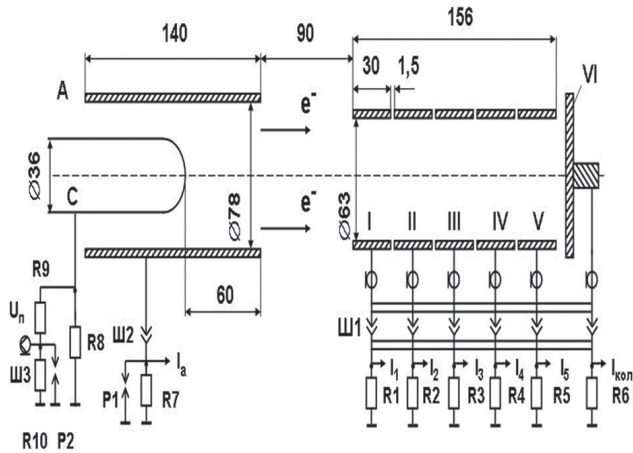


Рис. 2. Расположение элементов пушки и измерительной системы: А – анод, С – катод, I...V – медные кольца, VI – коллектор,

R1 ... R7 – резистивные токовые датчики, R8 – балластное сопротивление, R9, R10 – делитель напряжения, Ш1, Ш2 – вакуумные разъемы, Ш3 – высокочастотный разъем СР-50-73-ФВ, P1, P2 – защитные разрядники

Измерительная система состоит из 5 медных колец с внутренним диаметром 63 мм и шириной 30 мм, изолированных друг относительно друга и земли. Расстояние между кольцами ~ 1,5 мм. За V кольцом на расстоянии ~ 1,5 мм расположен коллектор (VI), который служит для измерения тока в осевом направлении. Все кольца механически соединены в сборку, длина которой составляет ~ 155 мм. Предусмотрена возможность перемещения ее вдоль оси на расстояние ~ 100 мм. Коллектор представляет собой медный диск диаметром 67 мм.

Импульсы тока с колец I...V и с коллектора VI протекают по коротким радиочастотным отрезкам кабелей через вакуумные разъемы (Ш1 – Ш3). После этого сигналы через омические делители подаются на компьютерно-измерительную систему для дальнейшей обработки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены эксперименты по измерению размеров электронного пучка при его транспортировке в однородном и спадающем магнитных полях в диапазоне энергий электронов 75...85 кэВ. На рис. 3 приведены распределение магнитного поля вдоль оси системы и диаметр пучка на различных расстояниях от анода магнетронной пушки. Поперечные размеры пучка определялись при помощи отпечатков, полученных на Al-мишенях. Как видно из рис. 3, за срезом анода магнетронная пушка формирует трубчатый электронный пучок с на-

ружным диаметром ~40 мм с толщиной стенки ~2 мм. При транспортировке пучка в однородном магнитном поле (~1100 Ое) на расстояние ~90 мм среза магнетронной пушки его диаметр практически не изменялся. Однако при транспортировке пучка на расстояние ~190 мм от анода пушки в спадающем магнитном поле (H~500 Ое) наружный диаметр пучка увеличивался до ~60 мм с толщиной стенки ~4 мм.

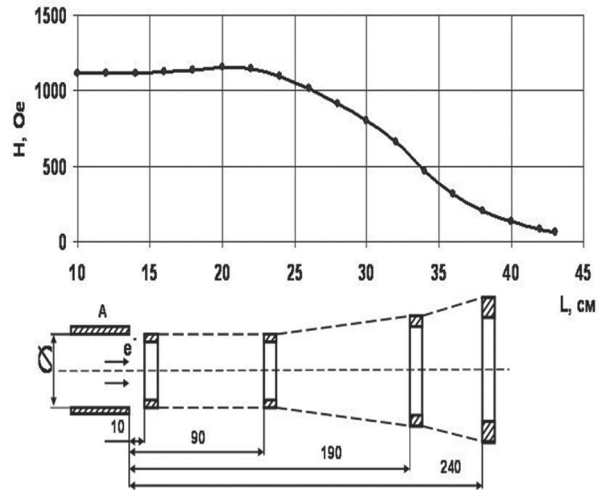


Рис. 3. Распределение магнитного поля вдоль оси системы и диаметр пучка на различных расстояниях от среза анода магнетронной пушки

На рис. 4а приведен отпечаток пучка на расстоянии ~190 мм от среза анода магнетронной пушки, а на рис. 4б распределение плотности электронов по диаметру в горизонтальной плоскости в относительных единицах, полученное при обработке цифрового файла на компьютере. Как видно из рис. 4а, пучок имеет вид кольца с равномерным распределением интенсивности по азимуту, а из рис. 4б следует, что амплитуды потемнения на противоположных краях отпечатка (по диаметру) практически одинаковые, что подтверждает результаты измерения коэффициента азимутальной неоднородности пучка, полученные с помощью 8-сегментного цилиндра Фарадея, находящегося на расстоянии 100 мм от среза магнетронной пушки [4].

При транспортировке пучка на расстояние ~240 мм от среза анода магнетронной пушки и магнитном поле ~200 Ое наружный диаметр пучка составлял 85 мм с толщиной стенки ~5,5 мм.

Таким образом, проведенные исследования показали, что можно использовать трубчатый электронный пучок магнетронной пушки, распространяющийся в спадающем магнитном поле, для формирования пучка в радиальном направлении.

Проведены экспериментальные исследования по формированию радиального электронного пучка и измерению его параметров при транспортировке в спадающем магнитном поле. Транспортировка пучка осуществлялась в си-

стеме, состоящей из 5 медных колец, которые находятся в магнитном поле, создаваемом соленоидом, состоящим из 4 секций.

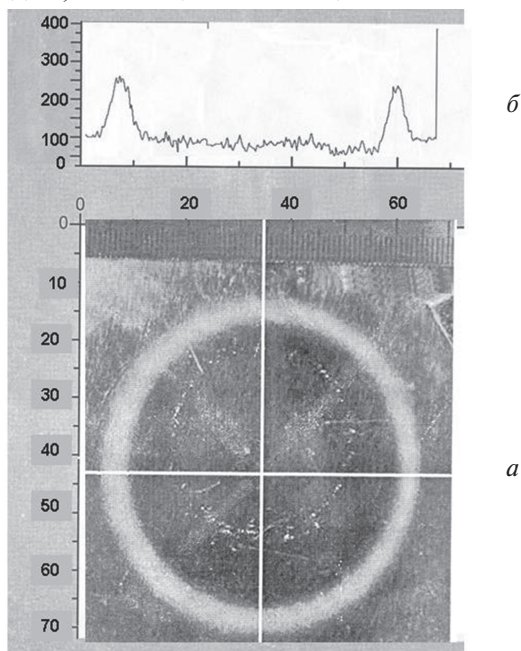


Рис. 4. Отпечаток пучка на Al – мишени (а) и распределение плотности электронов по диаметру в горизонтальной плоскости (б) в относительных единицах по вертикали

Регулируя ток в катушках соленоида, можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, а также изменение скорости спада магнитного поля соленоида. Это позволит получить различные режимы формирования электронного пучка.

На рис. 5 приведено распределение продольного магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка (кривые 1...5), при которых проводились эксперименты, а в табл. 1 приведены результаты измерений величины амплитуды и градиента спада магнитного поля вдоль III...V-го колец.

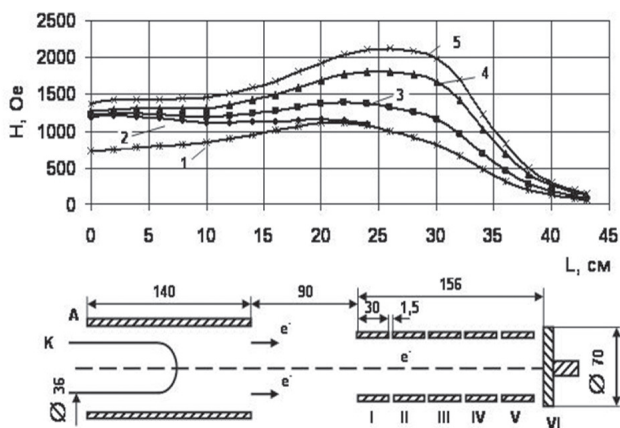


Рис. 5. Распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка (кривые 1...5); расположение элементов пушки и измерительной системы. А – анод, К – катод, I – V –металлические кольца, VI – коллектор

Таблица 1

Результаты измерений величины амплитуды и градиента спада магнитного поля вдоль трех колец

U, кВ	магнитное поле Hz	III кольцо		IV кольцо		V кольцо	
		H _z	dH _z /dz	H _z	dH _z /dz	H _z	dH _z /dz
		Oe	Oe/cm	Oe	Oe/cm	Oe	Oe/cm
78	крив. 2	770	66	500	110	250	60
82	крив. 4	1610	120	1100	193	550	123
85	крив. 5	1900	133	1200	250	600	175

Следует отметить, что эксперименты по формированию электронного пучка в магнетронной пушке проводились с высокоомной корректирующей цепочкой (L~130 мкГн, R- 20 Ом) в цепи импульсного генератора (модулятора). В этом случае неоднородность вершины импульса напряжения была небольшой, но была относительно большая «подсадка» амплитуды напряжения, которая составляла 0,25...0,3 кВ/А в режиме генерации пучка. Проведенные экспериментальные исследования показали, что величина тока в радиальном направлении и его распределение вдоль длины металлических колец зависит от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка (рис. 5, кривые 1–5). Результаты измерений амплитуды радиального и осевого токов для этих распределений магнитного поля, полученные при напряжении на катодe ~78...85 кВ, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений параметров радиального и осевого токов

U, кВ	магнитное поле Hz	I ₃ , A	I ₄ , A	I ₅ , A	I _b , A
		III кольцо	IV кольцо	V кольцо	Кол-тр
78	крив. 2	5	36	9	4,5
82	крив. 3		29	11-12	5
81	крив. 4		~8	32	10
85	крив. 5		~1,5	28	13
80	крив. 1		13	11,7	4,5

На рис. 6 приведены типичные осциллограммы сигналов напряжения на катодe (U) и токов в радиальном (I₄, I₅), снятом с двух колец (IV, V) измерительной системы, и осевом (I_b) направлениях, которые были получены при распределении магнитного поля, показанного на рис. 5 (кривая 2). Эксперименты показали, что при этом распределении магнитного поля, как видно из табл. 2, ток в радиальном направлении на IV кольцо составлял ~70% тока пучка при напряжении на катодe ~78 кВ. Как видно из табл. 1, магнитное поле в области расположения IV кольца было спадающее, с максимальным градиентом спада поля ~120 Oe/cm, при напряженности магнитного поля на середине кольца ~500 Oe. Ток в радиальном направлении на III кольцо составлял ~8%, а на V ~15% тока пучка, в областях которых градиент спада магнитного поля был

~70 Ое/см и 60 Ое/см соответственно. При этом радиальные токи на I и II кольца не регистрировались.

Изучена зависимость параметров радиальных токов при изменении направления магнитного поля. Эксперименты показали, что амплитуда токов для распределения магнитного поля (рис. 5 кривая 2) не зависит от направления магнитного поля.

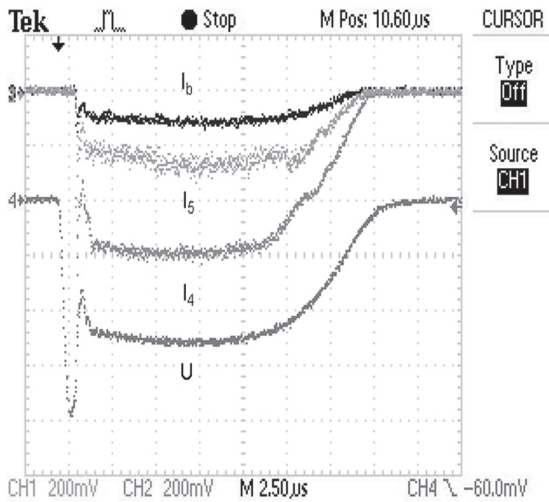


Рис. 6. Осциллограммы сигналов напряжения на катоде (U) и токов (I_4 , I_5) в радиальном и осевом (I_b) направлениях

Исследования показали, что было возможно регулировать амплитуду тока в радиальном направлении и его распределении вдоль колец, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка (рис. 5, кривые 3, 4, 5). Эксперименты показали, что при распределении магнитного поля (рис. 5, кривая 4), как видно из табл. 2, радиальный ток, в основном, протекал через V кольцо и составлял 65% тока пучка. Как видно из табл. 1, градиент спада магнитного поля в области V кольца составлял ~120 Ое/см. При этом ток в радиальном направлении на IV кольцо уменьшился в 4,5 раза (по сравнению с данными для распределения магнитного поля рис. 5, кривая 2). Ток на III кольце не регистрировался и увеличился ток, идущий в осевом направлении, до 20% тока пучка. Это, по-видимому, связано с тем, что, как видно из табл. 1, амплитуда магнитного поля в области III и IV кольца возросла в 2 раза и более по сравнению с однородным распределением поля на катоде (рис. 5, кривая 2).

Эксперименты показали, что с ростом амплитуды магнитного поля вдоль оси системы и канала транспортировки пучка (рис. 5, кривая 5) создавались условия для протекания тока в радиальном направлении практически только через V кольцо, который составлял ~68% от тока пучка, но при этом увеличивался ток, идущий в осевом направлении, до ~31% (см. табл. 2). Ток в радиальном направлении на IV кольцо был

на уровне ~1,5 А. Как видно из табл. 1, градиент спада магнитного поля в области V кольца был ~140 Ое/см при напряженности магнитного поля на середине кольца ~600 Ое. В области IV кольца градиент спада поля был ~260 Ое/см при амплитуде магнитного поля на середине кольца ~1200 Ое (см. табл. 1), что не позволяло изменить движение пучка с осевого направления на радиальное в этой области. Как видно из табл. 2, в этом случае уменьшился ток пучка на 25%, генерируемый магнетронной пушкой, по сравнению с однородным распределением магнитного поля на катоде, поскольку формирование пучка происходило в неоптимальных условиях по магнитному полю.

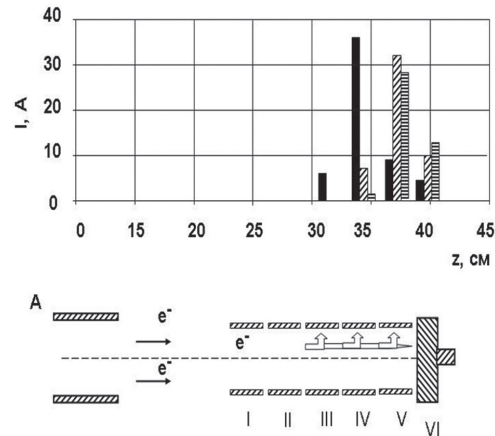


Рис. 7. Сравнительная гистограмма распределения токов в радиальном направлении по кольцам для различных распределений и градиентов спада магнитного поля. I, II, III, IV, V – кольца; VI – коллектор
 — Магнитное поле H (кривая 2)
 — Магнитное поле H (кривая 4)
 — Магнитное поле H (кривая 5)

На рис. 7 приведены гистограммы распределения токов в радиальном направлении на кольца (III – V) для различных распределений магнитного поля.

Амплитуда тока пучка в радиальном направлении на металлические кольца и его распределение вдоль длины колец зависела не только от градиента спада магнитного поля, но и от величины напряженности магнитного поля в этой области. Таким образом, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля, можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы и, следовательно, место электронного облучения. В дальнейшем необходимо провести исследование различных режимов облучения и выбрать оптимальные характеристики электронного облучения для модификации внутренней поверхности трубчатых изделий.

Как показали эксперименты, регулировка и настройка амплитуды и вида распределения магнитного поля (рис. 5, кривая 1) вблизи нижней границы формирования электронного пучка приводила к генерации сгустков электронного тока в радиальном и осевом направлениях. Этот

режим был получен, когда величина продольного магнитного поля вдоль оси пушки в начале ввода катода в анод в 1,2 раза, а в конце катода в 1,55 раза превышает поле отсечки Хэлла

$$H_{\text{Hull}} = 6,72(U)^{1/2}[r_a(1-r_k^2/r_a^2)]^{-1}, \quad (1)$$

где H – продольное магнитное поле (Ое), U – напряжение на катоде, r_a и r_k – соответственно радиусы анода и катода.

На рис. 8 показаны импульсы напряжения на катоде (U) и токов с IV и V колец (I_4 и I_5) и тока в осевом направлении (I_b), полученные при напряжении на катоде 85 кВ.

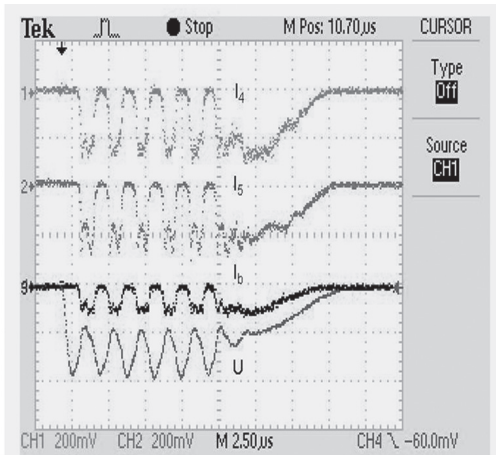


Рис. 8. Осциллограммы сигналов токов (I_4 и I_5) с IV и V кольца, тока в осевом направлении (I_b) и импульса напряжения на катоде (U)

Из рисунка видно, что радиальный электронный ток на кольцах и в осевом направлении имеет вид сгустков, при этом амплитуда и форма каждого сгустка практически совпадают. Как видно из осциллограмм, вершина импульса напряжения (U) имеет модуляцию близкую к синусоидальной и начало генерации тока каждого сгустка происходит на соответствующем спаде синусоидальной вершины импульса, а когда напряжение увеличивается до напряжения отсечки U^* (определяемого из (1) с учетом поправки для магнитного поля), нарушаются условия вторичноэмиссионного размножения, что приводит к срыву генерации [5].

Наблюдалось 5 сгустков тока в радиальном и осевом направлениях промодулированных по плотности на 100%, в течение ~ 10 мкс (токи на IV и V кольца $I_4 \sim 13$ А и $I_5 \sim 12$ А соответственно, ток в осевом направлении $I_b \sim 4,4$ А) до тех пор, пока напряжение на катоде больше напряжения отсечки U^* . Когда амплитуда напряжения на вершине импульса становится ~ 75 кВ (меньше U^*), то пушка работает в обычном режиме генерации пучка, что видно на осциллограмме после окончания колебательного процесса. Период следования сгустков $\sim 1,8$ мкс, а длительность ~ 1 мкс. Измерения показали, что колебания напряжения на катоде магнетронной пушки происходят с частотой, которая зависит от паразитных параметров (индуктивности и емкости

импульсного трансформатора) импульсного генератора.

В работе [2] при питании магнетронной пушки от ГИНа также наблюдалось формирование сгустков электронного пучка в осевом направлении, однако в этих исследованиях использовался вторичноэмиссионный катод с добавочным термокатодом для создания первичных электронов, который испускал электроны постоянно в течение импульса напряжения во все время эксперимента.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности устойчивого формирования электронного пучка в радиальном направлении магнетронной пушкой с холодным вторичноэмиссионным катодом в спадающем магнитном поле соленоида. Для понимания и объяснения физических процессов, сопровождающих механизм такого формирования, был проведен теоретический анализ.

Постановка задачи. Рассматривается задача, в которой поток электронов с энергией E , движущихся параллельно оси (или под углом к ней) на некотором расстоянии r_0 от нее, влетают в заданное соленоидальное магнитное поле. Требуется определить координату Z на заданном радиусе R для каждого из электронов. Обобщением является та же задача, но для пучка исходных электронов с заданным стартовым распределением по r_0 и по направлениям r_0' .

Гамильтониан рассматриваемой задачи в полярной системе координат (r, z, ϑ) имеет вид

$$H = \frac{p_r^2 + p_z^2}{2m} + \frac{1}{2m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 A \right)^2, \quad (2)$$

где e_0 , m – заряд и масса покоя электрона, p_r , p_z , p_ϑ – канонические импульсы, A – магнитный потенциал, который с учетом азимутальной симметрии пока записывается в виде $A = A(r, z) = Brf(z)$, где $f(z)$ – амплитудная функция магнитного поля, B – напряженность магнитного поля в начальной точке. В результате для уравнений движения запишем

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{r} = \frac{p_r}{m}, \\ \dot{z} = \frac{p_z}{m}, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \frac{1}{r}, \\ \dot{p}_r = -\frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left(-\frac{p_\vartheta}{r^2} - e_0 Bf(z) \right), \\ \dot{p}_z = -\frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left(-e_0 Br \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_\vartheta = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

К уравнениям (3) необходимо присоединить начальные условия для r_0 , z_0 , ϑ_0 , а также для p_{r0} ,

p_{z0} , $p_{\theta 0}$. Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом Δs решения, где $s = ct$ (t – текущее время), и ларморовским параметром $\mu = e_0 B / mc$. Таким образом, при выполнении условия $\mu \Delta s \ll 1$ можно ожидать сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие $\mu \Delta s \ll 1$ будет выполняться, если $\Delta s \ll 0.1$ мм.

С вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована, как задача Коши, то есть задача нахождения решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. При проведении численных расчетов использовался метод Рунге-Кутты. Было установлено, что относительная точность расчета была не хуже, чем 0.007.

Численно проведено изучение динамики движения электронов для количества частиц, равного $N=1000$, в магнитном поле соленоида. При такой величине объема выборки по форме статистических гистограмм возможно получать исчерпывающую информацию о различных характеристиках пучка частиц и судить о виде соответствующих плотностей распределения частиц.

Результатом расчетов будет являться траектория электрона, отвечающая набору начальных условий (или пучок из N таких траекторий). Потребовав выполнения заданного условия (например, достижения радиальной компонентой r некоторого значения r_U), как показано на рис. 9, можно, зафиксировав значения других компонент траектории электрона, сформировать в момент выполнения условия распределение результирующего пучка и изучить его свойства.

Пример траектории для выбранной частицы с энергией $E = 80$ кэВ и начальным радиусом $r_0 = 0.020$ м приведен на рис. 9, на котором также горизонтальной линией указан пороговый уровень $r_u = 0.0315$ м.

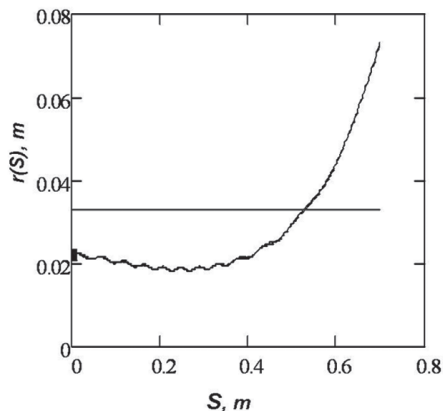


Рис. 9. Зависимость радиальной компоненты движения $r(s)$ от пройденного пути $s=ct$ для выбранной частицы

Начальные условия выбирались в двух вариантах. В первом все значения задавались фиксированными, кроме равномерно распределенного на $(0, \pi)$ азимутального угла, а начальный радиус фиксировался $r_0 = 0.021$ м. В отличие от первого

варианта, во втором начальный радиус задавался равномерно

На рис. 10 приведены два семейства распределений пучка частиц для различных значений оси $z = 0.015$ м, $z = 0.033$ м и $z = 0.038$ м. Видно, что частицы пучка, двигаясь в спадающем магнитном поле, испытывают вращение по азимуту и рост радиуса. Начальные условия выбирались в двух вариантах. Использование начального состояния пучка частиц, в котором азимутальный угол равномерно распределен на $(0, 2\pi)$, позволяет сопоставлять полученные семейства с отпечатками пучка, пример которых приведен на рис. 4.

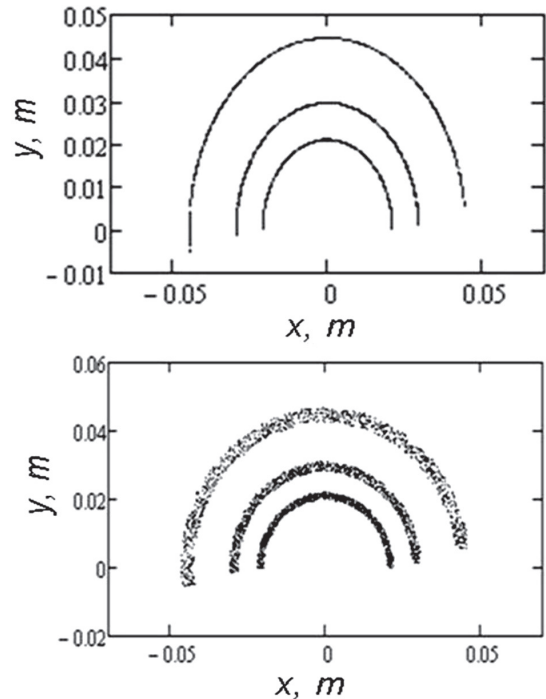


Рис. 10. Семейство поперечных распределений пучка частиц для различных значений оси z . Внутреннее $z = 0.015$ м, промежуточное $z = 0.033$ м, внешнее $z = 0.038$ м. Сверху – точно распределенный по r_0 исходный пучок, снизу – исходный пучок равномерно распределен по r_0 в интервале 0.020–0.022 м

На рис. 11 приведены результаты расчета гистограмм вертикальных значений Z_U частиц при достижении ими заданного радиального уровня $r_U = 0.033$ м. Видно, что в первом варианте начальных условий поток электронов попадает на вертикальный участок, протяженность которого Δz_U составляет около миллиметра. Такая концентрация обусловлена исходным распределением по координате r_0 , размеры которого (согласно постановке задачи) достаточно малы ($\Delta r_0 = 0.0003$ м). Поэтому для рассматриваемых условий моделирования изменение конфигурации магнитного поля влияет только на общее смещение пучка электронов, но не приводит к заметному уширению вида итоговой гистограммы потока по координате z . Во втором варианте начальных условий ($\Delta r_0 = 0.002$ м) влияние равномерного разброса на старте проявляется в зна-

чительном уширении итоговой гистограммы ($\Delta z_U = 0.015$ м).

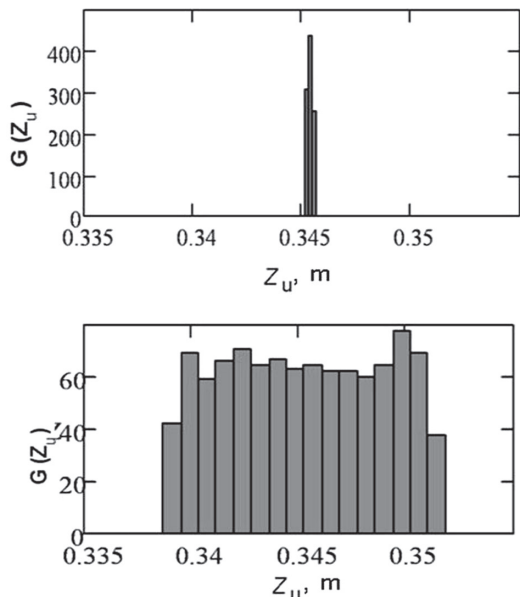


Рис. 11. Гистограмма $G(Z_U)$ вертикальных значений Z_U электронного пучка при достижении частицами радиуса $r_u = 0.033$ м. Сверху – точно распределенный по r_0 исходный пучок, снизу – исходный пучок равномерно распределен по r_0 в интервале 0.020–0.022 м

При рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера, в частности, с большим вертикальным размером Δz_0 и большего разброса по импульсам p_{z0} и p_{r0} можно ожидать соответствующее увеличение вертикального участка Δz_U , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус. Из сопоставления экспериментальных данных (рис. 3 и рис. 4) и результатов численного моделирования (рис. 10) можно сделать вывод об их удовлетворительном соответствии. Эти же данные указывают на соответствие общей динамике электронных потоков в рассматриваемой системе.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность устойчивого формирования радиального электронного пучка при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида. Экспериментально показано, что величина тока в радиальном направлении и его распределение вдоль металлических колец зависит от распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля. Оптимизацией распределения магнитного поля можно добиться попадания электронов на одно кольцо до 66...67 %. Регулируя амплитуду магнитного поля и его распределение на катоде, можно формировать отдельные ступки радиального и осевого тока.

На основе математической модели движения электронного потока синтезировано программное средство, позволяющее получать и ин-

терпретировать характеристики результирующих потоков. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов для заданных начальных условий и параметров. Показано, что поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого несколько миллиметров. Полученные численные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом спада. Построенное программное средство позволило осуществить числовую поддержку проводимого эксперимента на всех его этапах.

Литература

- [1] Волколунов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П., Митроченко В.В., Чурюмов Г.И. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – В. 7. – С. 88-91.
- [2] Saveliev Y.M., Sibbet W., Parkes D.M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source // Review of Scientific Instruments. – 1999. – Vol. 70, №12. – P. 4502-4514
- [3] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником // «Вісник Харківського університету», серія фізична «Ядра, частинки, поля». – 2006. – № 732. – Вып. 2 (30). – С. 96-100.
- [4] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. Исследование азимутальной однородности электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом // Вестник Харьковского Национального университета, серия физическая «Ядра, частицы, поля». – 2004. – № 642. – Вып. 3(25). – С. 91-96.
- [5] Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Закутин В.В., Коваленко Т.А., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П., Чертищев И.А. Формирование ступок электронного тока в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом // Вестник Харьковского национального университета, серия физическая «Ядра, частицы, поля». – 2008. – № 794. – Вып. 1(37). – С.85-89.

Поступила в редколлегию 23.04.2014



Айзацкий Николай Иванович, доктор физ.-мат. наук, профессор, заместитель директора НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: ускорительная техника, ядерная физика, математическое моделирование физических процессов, физика плазмы, исследование и разработка новых ускоряющих структур.



Борискин Виктор Николаевич, кандидат техн. наук, начальник лаборатории НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: системы управления ускорителей заряженных частиц, ускорительная техника и физика ускорителей.



Довбня Анатолий Николаевич, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, доктор физ.-мат. наук, профессор, директор НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: физика высоких энергий, применение ускоренных пучков электронов в промышленности и медицине.



Довбня Наталья Анатольевна, младший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: применение ускоренных электронных пучков в промышленности и математическое моделирование.



Мазманишвили Александр Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, старший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: физика высоких энергий, применение математических методов для решения физических и технических задач.



Решетняк Николай Григорьевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: ускорительная техника, физика плазмы, формирование, ускорение и использование потоков заряженных частиц.



Ромасько Виктор Павлович, ведущий инженер НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: физика высоких энергий, импульсная техника.



Чертищев Игорь Алексеевич, ведущий инженер НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Научные интересы: физика высоких энергий, импульсная и измерительная техника.

УДК 621.384.6

Формування радіального електронного пучка магнетронною гарматою з вторинноemisійним катодом: експеримент і теорія / М.І. Айзацький, В.М. Борискін, А.М. Довбня, Н.А. Довбня, О.С. Мазманішвілі, М.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, І.О. Чертищев // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Том 13. — № 2. — С. 127–134.

У статті представлені експериментальні і теоретичні результати з формування радіального електронного пучка з енергією часток 75...85 кэВ магнетронною гарматою з вторинноemisійним катодом. Вивчена залежність параметрів струму пучка від амплітуди магнітного поля уздовж осі системи і градієнта спаду поля. Досліджено режим формування згустків електронного струму. Наведено результати чисельного моделювання за рухом трубчастого електронного потоку в спадному магнітному полі соленоїда.

Ключові слова: магнетронна гармата, вторинноemisійний катод, електронний пучок, розподіл магнітного поля, градієнт спаду поля, математичне моделювання, гістограма.

Таб.: 2. Іл. 11. Бібліогр.: 5 найм.

UDC 621.384.6

Radially-directed electron beam formation by a magnetron gun with a secondary-emission cathode. Experiment and theory / N. I. Ajzatskiy, V. N. Boriskin, A. N. Dovbnya, N. A. Dovbnya, A. S. Mazmanishvili, N. G. Reshetnyak, V. P. Romasko, I. A. Chertishchev // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 2. — P. 127–134.

The present paper describes experimental and theoretical data on radial electron beam formation by a magnetron gun with a secondary-emission cathode, the beam particle energies ranging between 75 and 85 keV. The electron beam parameters and the beam distribution along the rings have been investigated as functions of the magnetic field amplitude along the system axis and the gradient of field decrease. The mode of electron current bunch formation has been studied. Numerical simulation data on the tubular electron flux motion in a decreasing magnetic solenoidal field are presented.

Keywords: magnetron gun, secondary-emission cathode, electron beam, distribution of magnetic-field, gradient of field decrease, mathematical simulation, histogram.

Tab.: 2. Fig. 11. Ref.: 5 items.