

УДК 621.384.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
В МАГНЕТРОННОЙ ПУШКЕ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ****А.Н. Довбня<sup>1</sup>, В.В. Закутин<sup>1</sup>, Н.Г. Решетняк<sup>1</sup>, Н.А. Довбня<sup>1</sup>, Т.А. Коваленко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Научно-Исследовательский Комплекс «Ускоритель»  
Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-Технический Институт»  
Украина, 61108, Харьков, Академическая, 1  
E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua<sup>2</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина  
Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4  
Поступила в редакцию 12 сентября 2004 г.

Проведено исследование азимутальной однородности, параметров электронного пучка и его размеров в магнетронной пушке с холодным металлическим вторичноэмиссионным катодом в зависимости от величины и распределения магнитного поля. Азимутальная однородность является важным параметром пучка для генерации СВЧ-колебаний, при нарушении которой в спектре колебаний появляются дополнительные частоты и уменьшается эффективность генерации. Показано, что такой источник формирует электронный пучок с азимутальной однородностью  $\pm 4\%$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вторичная эмиссия, электронный пучок, азимутальная однородность

Исследование параметров магнетронных пушек с холодными металлическими вторичноэмиссионными катодами [1-3] представляет интерес в связи с потенциально большим сроком службы, высокой плотностью тока и простотой конструкции. Магнетронную пушку можно использовать как источник кольцевого пучка электронов в СВЧ-приборах (клистроны, гиротроны и т.д.) и в ускорительной технике. Важным параметром пучка для этих целей является азимутальная однородность пучка, при нарушении которой в спектре колебаний появляются дополнительные частоты и уменьшается эффективность СВЧ-приборов [7], а в ускорителях увеличивается энергетический разброс пучка. В настоящей работе проведено исследование азимутальной однородности пучка, амплитуды тока пучка и его размеров на мишени в зависимости от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки.

Цель работы – исследование азимутальной однородности электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Эксперименты по исследованию параметров пучка проводили на установке, схема которой приведена на рис.1. Импульс напряжения специальной формы с выбросом на вершине, от импульсного генератора [4], подавали на катод пушки, её анод заземлен через резистор R3. Амплитуда выброса регулируется в пределах 60...100 кВ, амплитуда плоской части импульса – 20...55 кВ, длительность спада выброса ~ 0,3 мксек, длительность импульса на полувысоте ~ 8 мксек, частота следования импульсов 10...20 Гц (рис.2, кривая 2).

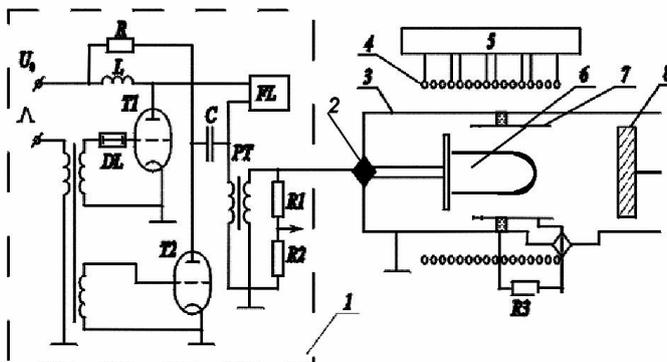


Рис.1. Схема экспериментальной установки  
1 – импульсный модулятор; 2 – изолятор; 3 – вакуумная камера;  
4 – соленоид; 5 – источник питания; 6 - катод; 7 - анод;  
8 – цилиндр Фарадея

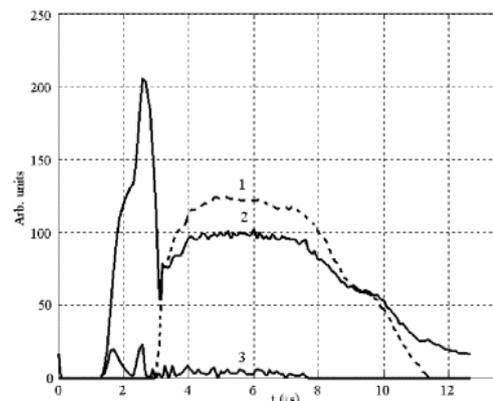


Рис.2. Импульсы напряжения (2), тока пучка (1) и анодного тока (3).  
По вертикали: 1 – 0,4 А/дел., 2 – 0,5 кВ/дел.,  
3 – 0,04 А/дел.

Исследовали параметры пучка магнетронной пушки коаксиальной конструкции с диаметром катода 40 мм внутренним диаметром анода – 70 мм, длиной катода - 70 мм, анода - 140 мм; материал катода – медь, анода – нержавеющая сталь. Принцип работы таких пушек основан на вторичноэмиссионном размножении электронов и формировании электронного пучка в скрещённых электрическом и магнитном полях. При подаче на катод импульса напряжения происходит выход первичных электронов в межэлектродный промежуток и, при росте напряжения (до вершины выброса), эти электроны, удаляясь от катода, накапливаются в промежутке катод-анод. На спаде выброса первичные электроны набирают энергию выше первого критического потенциала, бомбардируют катод и вызывают процессы вторичноэмиссионного размножения, образование электронного облака и генерацию пучка. Магнетронная пушка была размещена в вакуумной камере, в которой поддерживали разряжение  $\sim 10^{-6}$  Торр. Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом (состоящим из 4 секций для регулировки магнитного поля изменением величины тока в секциях соленоида.), питание которого осуществляли от источника постоянного тока.

Исследования параметров пучка проводили с помощью 8-канального секционированного цилиндра Фарадея и компьютерной измерительной системы [5]. Импульсы с каждой из секций цилиндра Фарадея поступали на блок аттенуаторов, который позволял согласовать амплитуды сигналов для дальнейшего преобразования и обработки в АЦП и ПК. Импульсные сигналы регистрируются с дискретностью 50 нс или 100 нс одновременно по 12-ти каналам в цифровом виде. Система позволяла обрабатывать 32 импульса, следующих друг за другом. Погрешность измерений составляла 1...2%. Проводили измерения тока пучка с каждого из 8 сегментов цилиндра Фарадея, напряжения на катоде, анодного тока. Эти параметры измеряли в заданных временных точках и усредняли за 16 следующих друг за другом импульсов. После этого проводили компьютерную обработку результатов и вычисляли следующие характеристики: суммарный ток пучка, коэффициенты максимального отклонения амплитуды импульсов токов и напряжения от среднего значения, коэффициент азимутальной однородности пучка ( $k = I_{\max}/I_{\min}$ , где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  соответственно максимальное и минимальное значение токов с сегментов цилиндра Фарадея), распределение полного заряда пучков с сегментов цилиндра Фарадея, относительное распределение тока пучков в течение импульса.

Поперечные размеры пучка измеряли путём получения отпечатка на алюминиевом диске, причём отпечатки были получены отдельно для каждого режима генерации пучка (напряжение на катоде и магнитное поле заданной величины поддерживали в каждой серии измерений).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований достигнут режим генерации пучка (рис.2, кривая 1), при котором магнетронная пушка формирует трубчатый электронный пучок с током пучка 50 А при амплитуде напряжения на катоде  $\sim 50$  кВ. Длительность импульса тока пучка  $\sim 5$  мкс, импульсная мощность пучка - 2,5 МВт, микропериод  $\sim 10$ , частота повторения импульсов 15 Гц, напряжённость магнитного поля  $\sim 1200$  Э. Стабильность суммарного тока пучка, а также тока с каждого из восьми сегментов цилиндра Фарадея, в течение 16 импульсов напряжения следующих друг за другом, составила  $\sim 2...3\%$  при нестабильности амплитуды импульса напряжения  $\sim 2\%$ .

Исследована зависимость тока, азимутальной однородности и размеров пучка от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси пушки. Обнаружено, что азимутальная однородность пучка на цилиндре Фарадея в значительной степени зависит от продольного распределения магнитного поля.

На рис.3 приведены распределения продольного и поперечного магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и пространства транспортировки пучка для случаев: 1- нарастающее, 2 - однородное, 3 - уменьшающееся поле. На рис. 4 приведено распределение заряда пучков с каждого из 8 сегментов цилиндра Фарадея (в зависимости от номера канала), т.е. по азимуту, для первого и третьего случаев. Из этого рисунка видно, что величина заряда пучка при уменьшающемся магнитном поле практически постоянна по азимуту трубчатого пучка (б), а при нарастающем поле – в значительной степени изменяется (а). При магнитном поле, уменьшающемся к цилиндру Фарадея, коэффициент азимутальной однородности пучка  $k$  минимален и составляет 1,08 (а). При нарастающем магнитном поле коэффициент азимутальной однородности пучка  $k$  составляет 2,8 (б).

На рис. 5 приведена зависимость коэффициента  $k$  азимутальной однородности пучка и зависимость полного тока пучка  $I$  от амплитуды магнитного поля в области цилиндра Фарадея. Из рисунка видно, что коэффициент азимутальной неоднородности резко растёт (кривая 2, рис.5) – почти по кубическому закону, а ток пучка падает практически линейно (кривая 1, рис.5) при увеличении амплитуды магнитного поля в области цилиндра Фарадея. Результаты измерений приведены при напряжении на катоде  $\sim 40$  кВ.

Изучена зависимость параметров электронного пучка от направления магнитного поля вдоль оси пушки. Зависимость тока пучка от напряжения на катоде для обоих направлений магнитного поля (при уменьшающемся распределении к цилиндру Фарадея) приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что амплитуда тока пучка подчиняется закону «3/2». Это свидетельствует о том, что амплитуда тока пучка практически не зависит от направления магнитного поля, в то время как азимутальная однородность пучка в значительной степени зависит от направления магнитного поля. Например, при одном направлении магнитного поля

азимутальная неоднородность пучка составляет  $\pm 4\%$ , а при другом направлении составляет  $\pm 150\%$  при уменьшающемся распределении магнитного поля.

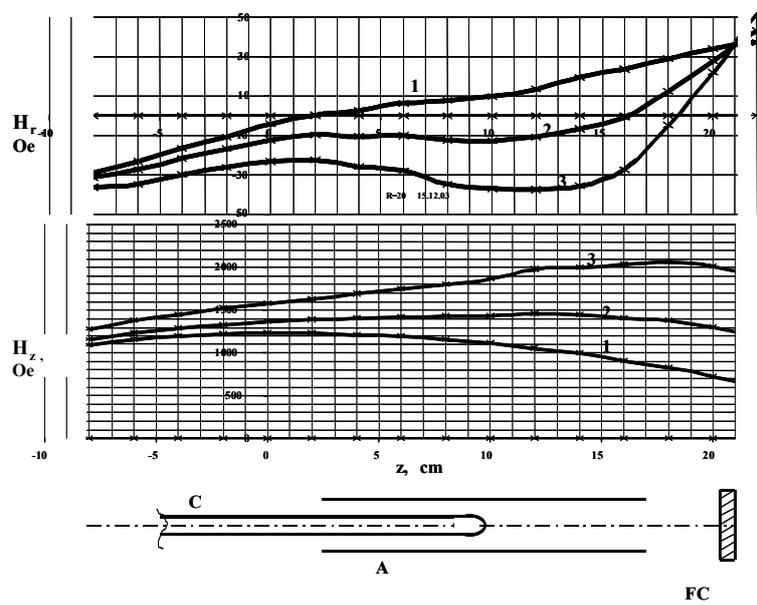


Рис.3. Распределение продольного  $H_z$  и поперечного  $H_r$  компонентов магнитного поля и расположение элементов вдоль оси системы  $z$ .

C – катод, А – анод магнетронной пушки, FC – цилиндр Фарадея.

1 - продольный компонент магнитного поля уменьшается, а радиальный – плавно увеличивается по направлению к цилиндру Фарадея; 2 – продольный компонент магнитного поля постоянен, а радиальный - имеет постоянную величину вдоль оси пушки, а затем увеличивается по направлению к цилиндру Фарадея; 3 - продольный компонент магнитного поля плавно нарастает, а радиальный – имеет постоянную величину вдоль оси пушки и резко меняет направление вблизи цилиндра Фарадея.

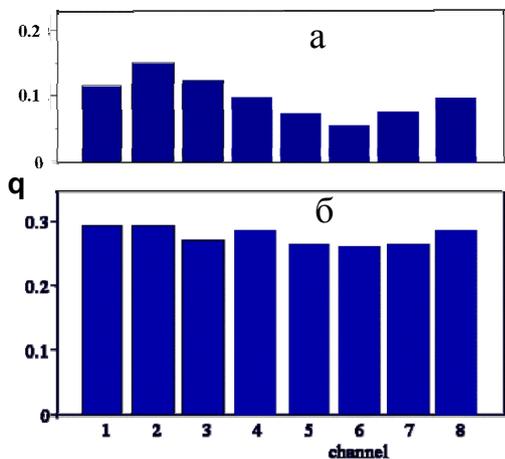


Рис.4. Распределение заряда пучка  $q$  (мК) по измерительным каналам  
а - при нарастающем распределении магнитного поля  
б – при уменьшающемся распределении магнитного поля.

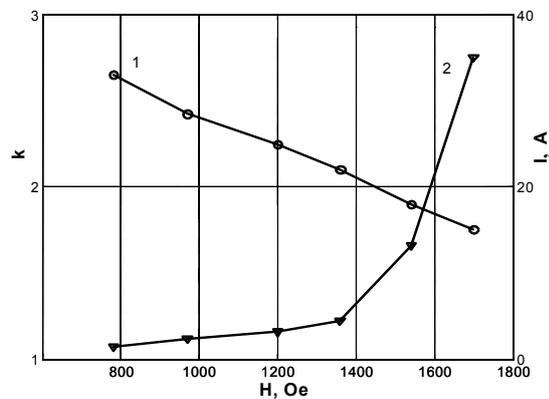


Рис.5. Зависимость коэффициента азимутальной однородности пучка  $k$  и полного тока пучка  $I$  от амплитуды магнитного поля в области цилиндра Фарадея  
1– полный ток пучка  
2– коэффициент азимутальной однородности пучка

Проведены измерения размеров электронного пучка на алюминиевой мишени, расположенной в области цилиндра Фарадея. При напряжении на катоде 50 кВ и уменьшающемся магнитном поле, магнетронная пушка формирует электронный пучок с током 50 А и наружным диаметром 50 мм с толщиной стенки  $\sim 3$  мм. При нарастающем магнитном поле ток пучка уменьшался до 25 А, а наружный диаметр пучка уменьшался до 38 мм, с толщиной стенки менее 2 мм. На рис. 7 для этих двух случаев приведены отпечатки пучков, полученных на одной мишени.

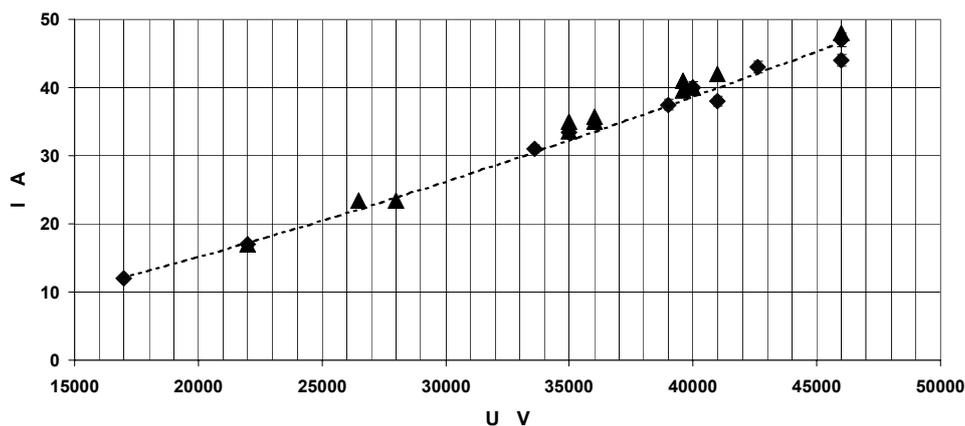


Рис. 6. Зависимость тока пучка от напряжения на катоде для двух направлений магнитного поля штриховая линия – закон «3/2».

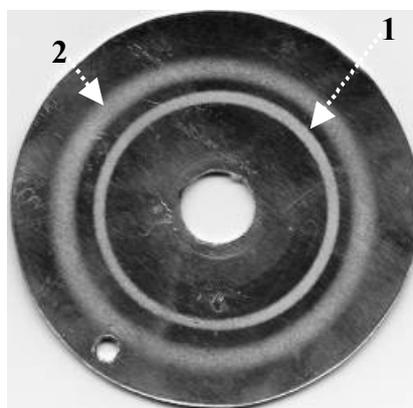


Рис.7. Отпечатки пучков: 1- нарастающее, 2- уменьшающееся магнитное поле.

Проведенные исследования показывают, что азимутальная однородность электронного пучка в сильной степени зависит от продольного распределения магнитного поля. Это может быть связано с изменением плотности электронов в пучке и развитием неустойчивости в электронном пучке, приводящее к изменению азимутальной однородности пучка.

Следует отметить, что увеличение коэффициента азимутальной неоднородности в нарастающем магнитном поле наблюдалось также при исследованиях магнетронной пушки с термокатодом для гироклистрона [7]. В этих исследованиях получен коэффициент азимутальной неоднородности 6...10.

В работе [3] толщина электронного пучка практически не зависела от напряженности магнитного поля, что может быть связано с отличием геометрии выходного участка магнетронной пушки и использованием соленоида с однородным распределением магнитного поля.

### ВЫВОДЫ

Проведены исследования с мощной магнетронной пушкой с медным вторичноэмиссионным катодом диаметром 40 мм и цилиндрическим анодом диаметром 70 мм. Изучен важный параметр пучка для источников СВЧ-мощности – азимутальная неоднородность электронного пучка, в экспериментах достигнут коэффициент азимутальной неоднородности  $\pm 4\%$ , стабильность тока пучка при этом составляет 2...3% при стабильности амплитуды напряжения на катоде 2%. Это открывает возможность использования магнетронных пушек в качестве источника электронов в СВЧ-приборах.

### 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. Zakutin V., Ajzatsky N., Boriskin V. et al. Electron beam generation in multicathode secondary-emission systems // Abstr. Broch. of the 8<sup>th</sup> Europ. Part. Accel. Conf., Paris, France, 3-7 June 2002. – P.146.

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. R.I. Ives, Mizuhara Max. Improved magnetron injection guns for high power gyro devices // Program of ICOPS-2002, 29<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Plasma Sci., Banff Alberta, Canada, May 26-30, 2002.
5. Dovbnya A.N., Reshetnyak N.G., Romas'ko V.P. et al. Pulsed modulators for feeding the powerfull 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.
6. 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.
7. Агафонов А.В., Тараканов В.П., Фёдоров В.М. Динамика нарушения магнитной изоляции и самоорганизация электронного потока в магнетронном диоде // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – Вып. 1. – С.93-102.

#### INVESTIGATION OF ELECTRON BEAM AZIMUTH HOMOGENEITY IN A MAGNETRON GUN WITH A SECONDARY-EMISSION CATHODE

A.N. Dovbnya<sup>1</sup>, V.V. Zakutin<sup>1</sup>, N.G. Reshetnyak<sup>1</sup>, N.A. Dovbnya<sup>1</sup>, T.A. Kovalenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Production Complex "Accelerator"

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"

Ukraine, 61108, Kharkov, 1, Academicheskaya St.

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

<sup>2</sup>Kharkov National University

Ukraine, 61077, Kharkov, sq. Svobody, 4

Azimuth homogeneity, electron beam parameters and dimensions in a magnetron gun with cold metallic secondary-emission cathode depending on magnetic field value and its distribution was studied. Azimuth homogeneity is an important beam parameter for generation of SHF-oscillations. Additional frequencies appear in the oscillation spectrum, and generation efficiency is increased when the azimuth homogeneity is disturbed. Such source is shown to form an electron beam with azimuth homogeneity of  $\pm 4\%$ .

**KEY WORDS:** secondary emission, electron beam, azimuth homogeneity