

УДК 621.384.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ НАРАСТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТОКА В МАГНЕТРОННОЙ ПУШКЕ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

Н.И. Айзацкий<sup>1</sup>, А.Н. Довбня<sup>1</sup>, В.В. Закутин<sup>1</sup>, Н.Г. Решетняк<sup>1</sup>, В.П. Ромасько<sup>1</sup>,  
И.А. Чертищев<sup>1</sup>, Т.А. Коваленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ННЦ ХФТИ, ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина.

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

4, пл. Свободы, 61077, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 31 августа 2007 г.

В работе проведено исследование генерации электронного пучка в магнетронной пушке с алюминиевым и медным вторичноэмиссионными катодами. Показано, что длительность импульса ограничивается процессами десорбции с поверхности катода. Показано, что амплитудные характеристики пучков с алюминиевого и медного катодов близки друг к другу. Исследована зависимость времени нарастания электронного тока от распределения магнитного поля. Показано, что минимальная длительность времени нарастания (5...10 нс) имеет место при однородном распределении магнитного поля.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электронный пучок, магнетронная пушка, вторичноэмиссионный катод, время нарастания тока пучка

В последние годы проводятся исследования формирования и параметров электронных пучков вторичноэмиссионных источников в скрещенных полях [1-2] и численное моделирование процессов в магнетронном диоде [3]. Такие источники могут быть использованы при создании мощных СВЧ-приборов, в ускорительной технике и других областях науки. Принцип действия пушки основан на вторичноэмиссионном размножении электронов, образовании электронного облака и формировании электронного пучка в скрещенных полях. Такие пушки просты в конструкции, не теряют эмиссию после напуска атмосферы, имеют большой срок службы, имеют хорошую стабильность амплитуды, азимутальную однородность [4].

Цель работы - исследование временных параметров электронного пучка магнетронной пушки с холодным вторичноэмиссионным катодом в зависимости от величины и распределения продольного магнитного поля для двух материалов катода.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование времени нарастания импульса тока пучка магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.1. Эксперименты проводились с магнетронной пушкой с диаметрами катода 40 мм и анода – 70 мм. Импульс напряжения от импульсного генератора 1 поступал на катод 6 магнетронной пушки, анод 7 через резистор  $R_5$  соединён с «землей». С этого резистора снимается импульс электронного тока, попадающего на анод. С цилиндра Фарадея 8 снимается импульс прямого тока.

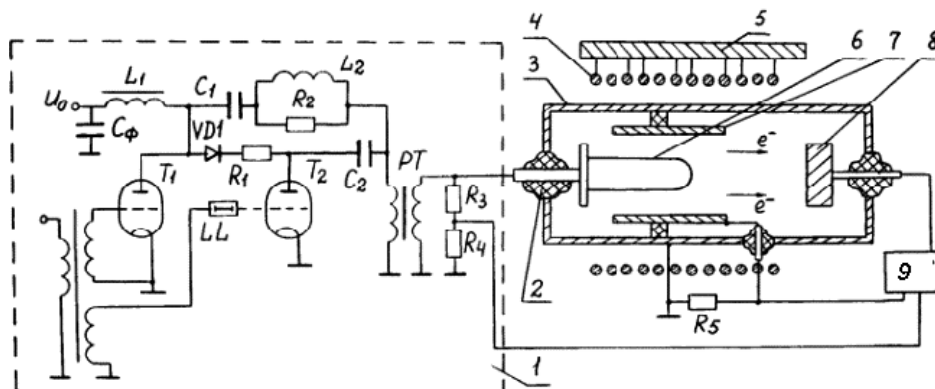


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

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.

На рис.2 приведено распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и пространства транспортировки пучка для случаев однородного 1 и спадающего 2 поля, при которых проводились исследования, там же показано расположение элементов пушки и цилиндра Фарадея.

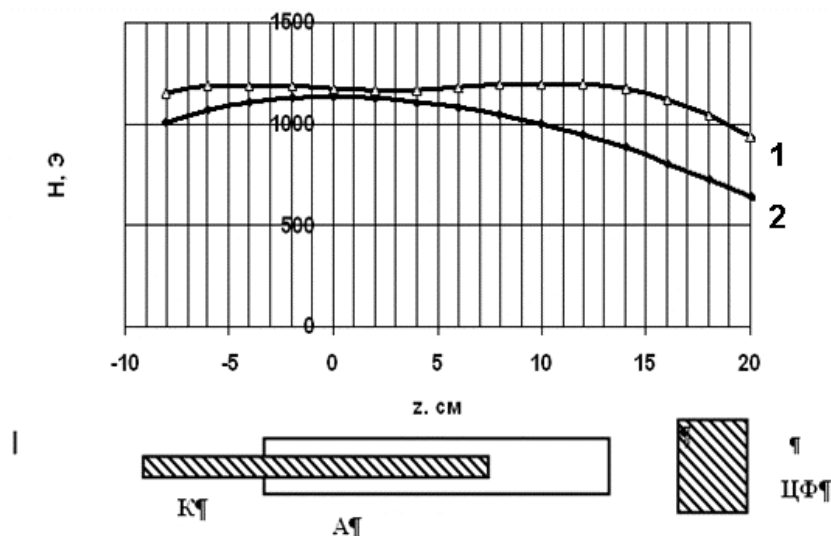


Рис.2. Распределение магнитного поля вдоль оси системы и расположение элементов.  
А – анод, К – катод, ЦФ – цилиндр Фарадея.

Для изучения параметров пучков использовался 8-секционный охлаждаемый цилиндр Фарадея 8, с 12-канальной компьютерной измерительной системой на основе персонального компьютера. Импульсные сигналы с каждой секции цилиндра Фарадея поступают на блок согласованных аттенуаторов, который позволяет согласовать амплитуды сигналов для дальнейшего преобразования в АЦП. Импульсные сигналы регистрируются с помощью трех специальных АЦП и генератора-синхронизатора с дискретностью 100 нс одновременно по 12-ти каналам. Система позволяет обрабатывать 16 импульсов следующих друг за другом и в каждом импульсе 8 сигналов с секций цилиндра Фарадея.

Измерялись ток пучка с каждой секции цилиндра Фарадея и амплитуда напряжения на катоде в заданной по времени точке импульса. Погрешность измерения амплитуды составляет 1...2%.

Для проведения исследований также использовался запоминающий цифровой осциллограф фирмы Тектроникс. Сигналы на него подавались с датчиков напряжения, анодного тока и цилиндра Фарадея.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проводились исследования амплитуды, времени нарастания и длительности импульса тока пучка при различных магнитных полях для медного и алюминиевого катодов.

Проведенные эксперименты с медным вторичноэмиссионным катодом показали, что имеет место генерация электронного пучка в диапазоне напряжения на катоде 15...45 кВ. В спадающем магнитном поле (рис.2 кривая 2) при напряжении на катоде ~ 40 кВ магнетронная пушка формирует электронный пучок с током 47 А при длительности импульса ~ 30 мкс, анодный ток составляет ~ 1% тока пучка.

На рис. 3 показана начальная часть осциллограммы импульса напряжения и тока пучка при короткой длительности развертки осциллографа, полученных при напряжении на катоде 31 кВ и токе пучка ~ 33 А. Из рисунка видно, что начало генерации пучка происходит на спаде выброса импульса напряжения [1].

Зависимость тока электронного пучка от напряжения для медного катода для спадающего магнитного поля подчиняется закону «3/2». При этом в процессе измерений каждому значению напряжения отвечало оптимальное значение магнитного поля, при котором амплитуда тока пучка была максимальна, кроме того, в каждой точке проводились также измерения коэффициента азимутальной неоднородности пучка, который практически не изменялся и лежал в пределах 1,2...1,25.

Проведенные эксперименты показали, что в магнетронной пушке с алюминиевым катодом также происходит генерация электронного пучка. Проводились измерения амплитуды тока пучка в диапазоне напряжений 7...40 кВ для алюминиевого катода в случае однородного и спадающего магнитного поля (рис.2, кривые 1 и 2).

На рис.4 приведена зависимость тока пучка и азимутальной неоднородности от напряжения на катоде для этих распределений магнитного поля. Как видно из рисунка, ток пучка также подчиняется закону «3/2», а коэффициент азимутальной неоднородности в диапазоне напряжения 10...40 кВ составляет 1,25...1,1, а при

малом напряжении (меньше 10 кВ) возрастает. Кроме того, амплитуда тока пучка и коэффициент азимутальной однородности отличаются немного для этих распределений.

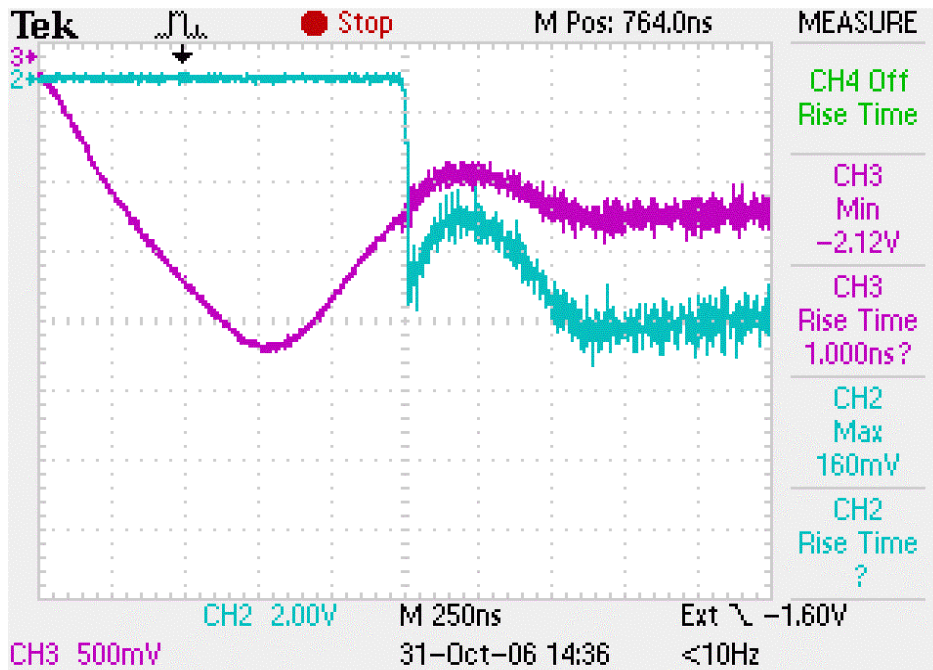


Рис.3. Начальная часть осциллограммы импульса напряжения и тока пучка, верхняя – напряжение, нижняя – ток пучка. Масштаб по горизонтали 250 нс/дел., по вертикали – относительные величины.

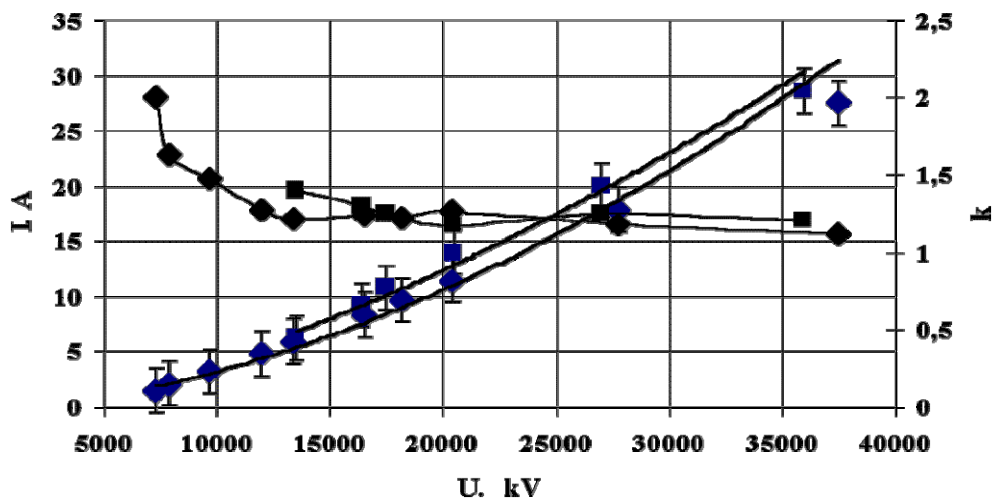


Рис. 4. Зависимость тока пучка и коэффициента азимутальной неоднородности  $k$  от напряжения для алюминиевого катода для разных распределений магнитного поля, квадратики – однородное, ромбики – спадающее поле.

Эксперименты, проведенные с медным катодом при однородном распределении магнитного поля, показали, что амплитуда тока пучка и коэффициент азимутальной неоднородности слабо отличаются от результатов экспериментов, проведенных с алюминиевым катодом, несмотря на то, что коэффициенты вторичной эмиссии используемых металлов катода различны [5 гл.5]. Это указывает на то, что генерация пучка может быть обусловлена поверхностными пленками на поверхности катода, которые образовались в процессе

изготовления и откачки вакуумного объема. Из полученных результатов следует, что амплитудные и временные характеристики тока пучка для исследованных металлов катодов отличаются незначительно, хотя коэффициенты вторичной эмиссии металлов катодов составляют для меди - 1,4, для алюминия- 0,9. Отсюда следует, что коэффициент вторичной эмиссии поверхности катода практически одинаков, следовательно, генерация пучка (для алюминиевого катода) может быть обусловлена двумя причинами. Во-первых, наличием поверхностных пленок на поверхности катода, которые образовались в процессе изготовления и откачивания вакуумного объема. Поскольку исследования проводились при частоте посылок 3 Гц, поверхностная пленка могла возобновиться к следующему импульсу, потому, возможно, при исследованиях с высокой частотой повторения импульсов образование пленки будет затруднено. Во-вторых, это может быть связано с увеличением коэффициента вторичной эмиссии при механической обработке материала катода.

Проведенные исследования показали, что магнетронная пушка с вторичноэмиссионным катодом позволяет формировать электронные пучки большой длительности, причем генерация пучка сохраняется и его параметры практически не изменяются на протяжении импульса. На рис. 5 показан импульс тока пучка и напряжения на катоде ( $U=30$  кВ), полученный в экспериментах с медным катодом. Из рисунка видно, что длительность импульса тока пучка на полувысоте составляет  $\sim 40$  мкс при амплитуде импульса тока пучка – 33 А. При напряжении 20 кВ длительность импульса тока пучка на полувысоте составляет 55 мкс. Аналогичные результаты получены при использовании алюминиевого катода. Это говорит о том, что процесс вторичноэмиссионного размножения и генерация пучка происходит устойчиво в течение длительного времени. Эти данные подтверждают результаты, приведенные в [6], в которых длительность импульса составляла  $\sim 150$  мкс при напряжении на катоде  $U \sim 20$  кВ.

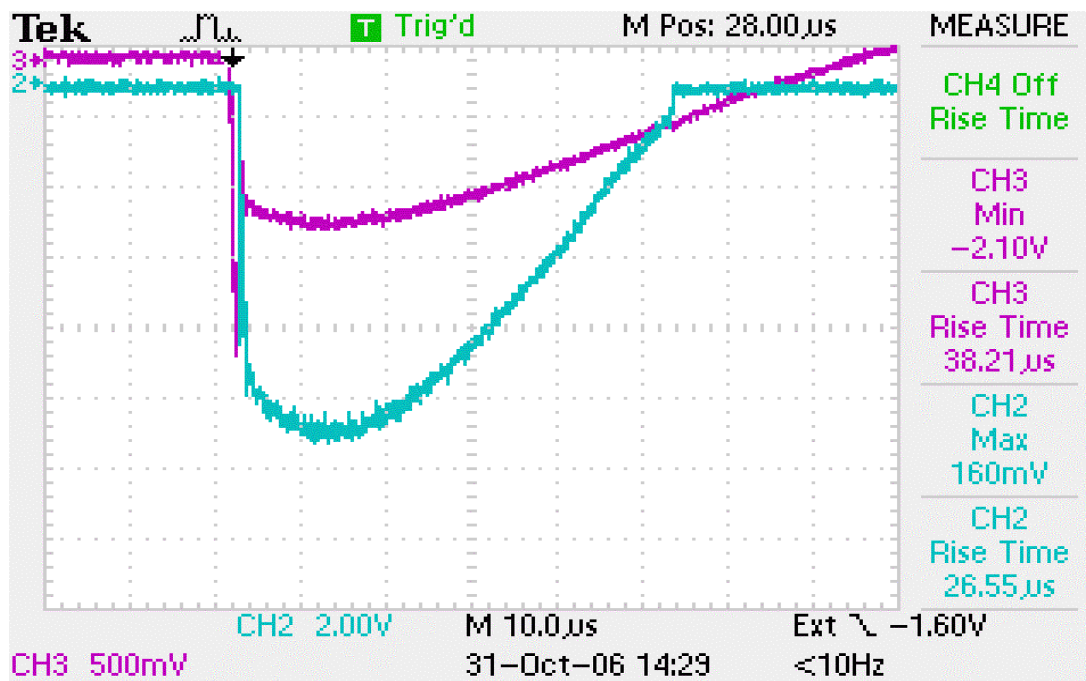


Рис.5. Осциллограммы напряжения (верхняя) и тока пучка (нижняя). Масштаб- 10 мкс/дел., по вертикали – относительные величины.

Длительность импульса может ограничиваться тем, что при бомбардировке катода электронами с поверхности катода происходит десорбция поглощенных газов, воды и т.п., что приводит к локальному увеличению давления в промежутке анод-катод и в дальнейшем возможному электрическому пробое промежутка. Это может стать причиной уменьшения длительности тока пучка. Для того, чтобы увеличить длительность импульса тока пучка поверхность должна иметь малое количество адсорбируемых веществ, которое достигается, во-первых, изготовлением поверхности катода с высоким классом обработки без применения абразивных материалов (алмазным резцом), безмасляной откачкой вакуумного объема через азотную ловушку, отсутствием в вакуумной камере элементов, которые выделяют органические и неорганические вещества и т.д.

Были проведены измерения времени нарастания импульса тока пучка для алюминиевого и медного катодов. На рис. 6 показан импульс тока пучка одного из сегментов цилиндра Фарадея для медного катода в однородном магнитном поле при напряжении на катоде 48 кВ. Из рисунка видно, что время нарастания

импульса тока пучка составляет  $\sim 12$  нс по уровню 0,1-0,9. Колебания на импульсе связаны с влиянием паразитных параметров измерительной цепи.

Как показали измерения, время нарастания импульса тока пучка для алюминиевого и медного катодов близки друг к другу, причем этот вывод справедлив для всех распределений магнитного поля и амплитуды напряжения в диапазоне напряжений 30...50 кВ.

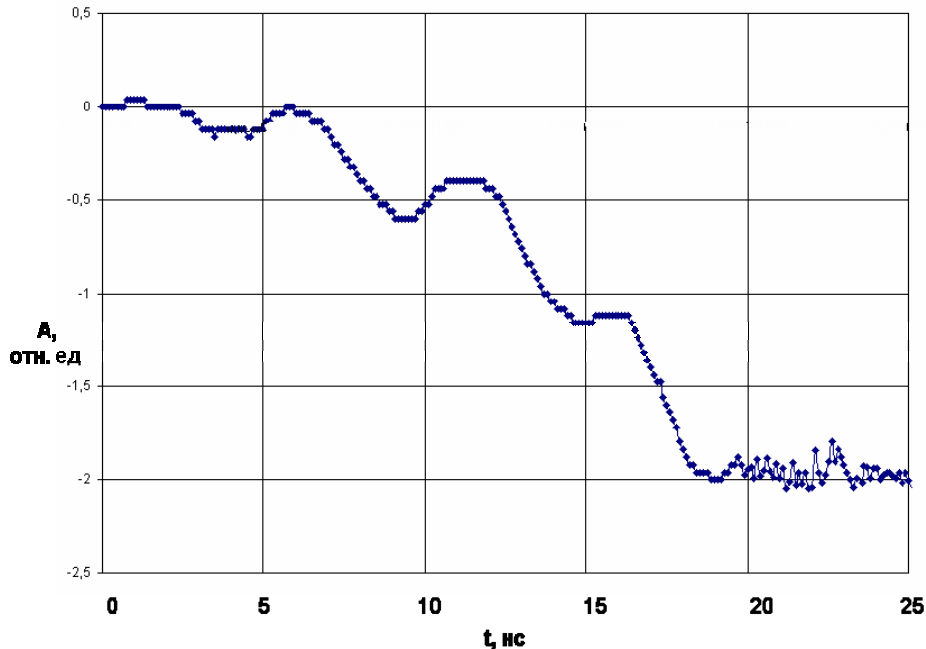


Рис.6. Начальная часть осциллограммы импульса тока пучка, по вертикали отложены относительные единицы.

Проведенные измерения показали, что эта картина справедлива для всех азимутальных участков пучка. На рис. 7 показаны осциллограммы импульсов напряжения и токов пучка, снятые с трех сегментов (3, 5, 7) цилиндра Фарадея, расположенных почти равномерно по азимуту пучка для алюминиевого катода при напряжении 31 кВ в нарастающем магнитном поле. Длительность развертки на этом рисунке составляет 25 нс/дел, в то время как на рис. 3 она составляет 250 нс/дел.

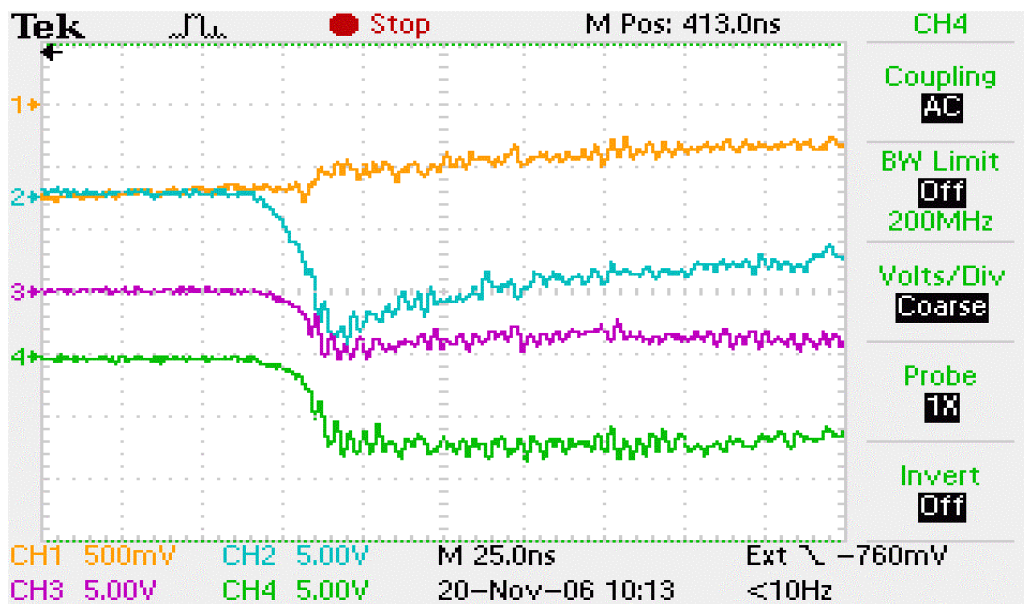


Рис.7. Импульсы напряжения (верхняя кривая) и токов пучка с 3, 5 и 7 сегментов цилиндра Фарадея. Масштаб по горизонтали 25 нс/дел, по вертикали - относительные величины.

Из рисунка видно, что в момент генерации пучка на спаде импульса напряжения появляется «подсадка» амплитуды, что связано с «подгрузкой» импульсного генератора током пучка. Время нарастания импульсов тока пучка для этих сегментов практически совпадает и составляет  $\approx 18$  нс, при этом закон нарастания тока пучка для всех осциллограмм также совпадает. Это говорит о том, что в процессе вторичноэмиссионного размножения используется вся поверхность катода. Это может происходить тогда, когда первичные электроны равномерно распределены по азимуту в промежутке катод-анод, то есть достаточно хорошо сформировано облако первичных электронов, которое на спаде выброса напряжения бомбардирует катод, что согласуется с результатами [1,3], в которых описан механизм генерации пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом. В экспериментах минимальное время нарастания импульса тока имеет место в однородном магнитном поле, которое с учётом времени установления делителя, соответствует величине  $\sim 10$  нс (на уровне 0,1-0,9). При этом следует отметить, что такая длительность времени нарастания имеет место при значительной длительности спада напряжения ( $\sim 600$  нс при крутизне спада  $\sim 50$  кВ/мкс). Это позволяет упростить схему импульсного генератора с точки зрения получения необходимого спада выброса.

Эксперименты также показали, что время нарастания импульса тока имеет два характерных вида. В первом случае время нарастания имеет линейный рост  $\sim$  в течение  $\sim 25 \dots 30$  нс. Во втором случае – имеет более сложную структуру - в начале более медленный рост в течение  $\sim 25 \dots 30$  нс (до уровня 0,2...0,3), а затем быстрое нарастание за  $3 \dots 5$  нс (до уровня 0,8...0,9). Таким образом, это указывает, что за короткое время (порядка единиц наносекунд) число актов размножения вторичных электронов было достаточно для достижения плотности пространственного заряда необходимой для самоподдерживающейся вторичной эмиссии в магнетронной пушке с холодным вторичноэмиссионным катодом.

### ВЫВОДЫ

Проведено исследование генерации электронного пучка в магнетронной пушке с алюминиевым и медным вторичноэмиссионными катодами. Показано, что длительность импульса ограничивается процессами десорбции с поверхности катода, а амплитудные характеристики пучков с алюминиевого и медного катодов близки друг к другу. Исследована зависимость времени нарастания электронного тока от распределения магнитного поля. Показано, что минимальная длительность времени нарастания ( $5 \dots 10$  нс) имеет место при однородном распределении магнитного поля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.Я. Волколупов, А.Н. Довбня, В.В. Закутин и др. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом // ЖТФ. - 2001. - Т.71. - В.7. - С.88-91.
2. Yu.M. Saveliev, W. Sibbett, D.M. Parkes Characterisation of electron produced by cross-field secondary emission diodes // J. Appl. Phys.- 2001. - V. 40. - Part 1, № 2B. - P. 940-943.
3. А.В. Агафонов, В.П. Тараканов, В.М. Федоров Динамика нарушения магнитной изоляции и самоорганизации электронного потока в магнетронном диоде // ЖТФ.- 2004.- Т. 74.- В. 1.- С. 93-103.
4. Н.И. Айзацкий, В.Н. Борискин, А.Н. Довбня и др. Исследование азимутальной однородности и стабильности электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом // Тезисы XIX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц. - Алушта, Крым, Украина, 12-18 сентября 2005 г. - С. 111-112.
5. И.М. Бронштейн, Б.С. Фрайман Вторичная электронная эмиссия. – М.: Изд. «Наука», Главная редакция физ.-мат. литературы, 1969 – 407 с.
6. В.В. Закутин, В.П. Ромасько, Б.Г. Сафронов и др. Управляемая магнетронная пушка с холодным катодом в режиме длинных импульсов // Тезисы докладов 13 Харьковского семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. - Харьков, Украина, 25-28 мая 1993 г. - С. 28.

### THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTRON CURRENT TIME INCREASING IN MAGNETRON GUN WITH SECONDARY EMISSION CATHODE N.I. Ayzatskiy<sup>1</sup>, A.N. Dovbnya<sup>1</sup>, V.V. Zakutin<sup>1</sup>, N.G. Reshetnyak<sup>1</sup>, V.P. Romas'ko<sup>1</sup>, I.A. Chertishchev<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

The investigation of electron beam generation in magnetron gun with Al and Cu secondary emission cathodes was carried out. It was shown that impulse duration is limited by desorption processes from cathode surface. It was shown that beam amplitude characteristics from Al and Cu cathodes are similar. Dependence of electron current time increasing under magnetic field distribution was researched. It was shown that minimum duration time increasing takes place at uniform distribution of magnetic field.

**KEY WORDS:** electron beam, magnetron gun, secondary-emission cathode, time increasing of the beam current.