

К ВОПРОСУ О ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В МАГНЕТРОННЫХ ПУШКАХ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ

А.Н. Довбня¹, В.В. Закутин¹, Н.Г. Решетняк¹, Т.А. Коваленко², Т.А. Семенец¹

¹Научно-Исследовательский Комплекс «Ускоритель»
Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-Технический Институт»
Украина, 61108, Харьков, Академическая, 1
E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

²Харьковский Национальный Университет
Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4
Поступила в редакцию 4 ноября 2003 г.

Проведены исследования по определению области эмиссии первичных электронов в магнетронных пушках с холодным вторичноэмиссионными катодами. Показано, что механизм появления первичных электронов связан с автоэмиссией из микроострий на поверхности катода. Предложена физическая картина генерации электронного пучка в магнетронной пушке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнетронная пушка, автоэмиссия, вторичная эмиссия, электронный пучок

В последние годы, широкий интерес вызывает исследование источников электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии, в скрещенных электрическом и магнитном полях [1-6]. Интерес к таким источникам связан с рядом преимуществ (большое время жизни, высокая плотность тока, относительная простота конструкции и т.д.), которые дают возможность использования магнетронных инжекционных пушек с холодными вторичноэмиссионными катодами в ускорительной технике [7] и при создании мощных долговечных с.в.ч. источников [8]. Принцип работы магнетронных пушек основан на обратной бомбардировке катода электронами и их вторичноэмиссионном размножении. Начальная стадия вторичноэмиссионного размножения начинается с того, что на спаде катодного напряжения, первичные электроны, возвращаемые магнитным полем, бомбардируют поверхность катода. При своём движении по криволинейным траекториям к катоду, на спаде импульса напряжения, электроны набирают энергию пропорциональную изменению электрического поля за время пролёта. При определённых условиях, энергия падающих электронов становится выше первого критического потенциала, при котором коэффициент вторичной эмиссии материала катода становится больше единицы и, при дальнейшем увеличении числа электронов, вблизи катода образуется электронное облако. При колебаниях пространственного заряда электронного облака, образуются электрические поля, обеспечивающие самоподдерживающийся процесс вторичноэмиссионного размножения и генерацию пучка (стационарная стадия).

В работе [9] анализировалось движение электронов в электростатическом поле магнетрона с вторичноэмиссионным катодом на начальной стадии генерации пучка. В краевой области распределение электрического поля неоднородно в продольном и поперечном направлении. Электроны, эмитированные из краевых областей и движущиеся по орбитам, оторванным от поверхности катода, могут отбирать энергию у ВЧ – поля в течение большего времени, и, следовательно, их кинетическая энергия в момент соударения с катодом может быть существенно большей, чем у электронов движущихся в центральной области магнетрона.

До настоящего времени недостаточно полно изучена начальная стадия генерации пучка в магнетронной пушке. В представленной работе приведены результаты экспериментального исследования и области эмиссии первичных электронов, формирования и генерации пучка в магнетронных инжекционных пушках с холодными металлическими вторичноэмиссионными катодами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Импульсный генератор 1, формирует импульс напряжения специальной формы, с выбросом на вершине и длительностью плоской части импульса ~ 8 мксек, частотой следования до 50 Гц [5]. Импульс напряжения через изолятор 2 подводится к катоду магнетронной пушки 5, анод 6 заземлён, 8 – катодный фланец (экран), не позволяющий электронам попадать на изолятор 2. В вакуумной камере 3 размещается магнетронная пушка, магнитное поле создаётся соленоидом 4. Ток пучка, попавший на цилиндр Фарадея 7, измеряется с помощью резистора r , а импульс напряжения измеряется с помощью делителя R_1R_2 . На рис.2 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде U и тока электронного пучка I с цилиндра Фарадея.

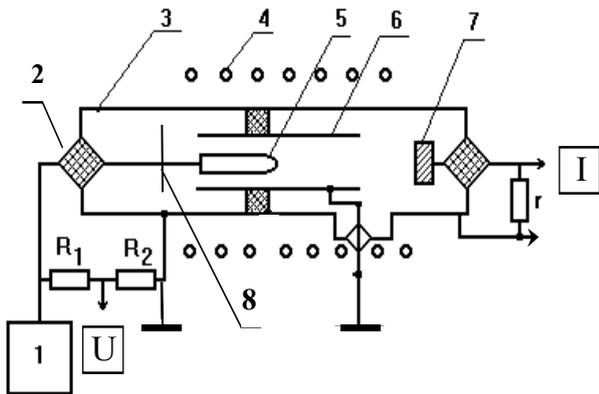


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

1 - импульсный генератор, 2 - изолятор, 3 - камера, 4 - соленоид, 5 - катод, 6 - анод, 7 - цилиндр Фарадея, 8 - катодный фланец (экран).

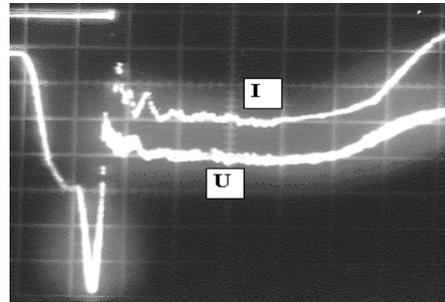


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на катоде U и тока пучка I.

Масштаб по вертикали: U - 8 кВ/дел, I - 8 А/дел; по горизонтали - 1 мкс/дел.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены эксперименты с магнетронной пушкой с холодным металлическим вторичноэмиссионным катодом для изучения начальной стадии формирования и генерации электронного пучка.

Одним из важных вопросов, касающихся развития вторичноэмиссионных процессов, является вопрос об эмиссии первичных электронов из металлического холодного катода. В работах [1,2,10] высказывались предположения о появлении первичных электронов за счёт автоэмиссии, эмиссии с поверхности диэлектрических вкраплений или ионизации остаточного газа в неровностях микрорельефа на катоде. Нами были проведены эксперименты по выяснению механизма появления первичных электронов в магнетронной пушке с диаметром катода – 5 мм, диаметром анода – 26 мм; длина катода и анода - 140 мм. В первом случае катод был полирован по всей длине, во втором случае по всей поверхности катода были сделаны шероховатости, приводящие к образованию микроострий на поверхности катода. Проведенные эксперименты показали, что во втором случае, при наличии шероховатостей на катоде генерация пучка начиналась при меньших значениях напряжения (~12 кВ), чем в первом случае (~15 кВ), а пробивное - соответственно понизилось. Во втором случае, при одинаковом напряжении, стабильность генерации пучка также была выше. Аналогичные результаты были получены при исследовании генерации пучка в магнетронной пушке с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 40 мм, на поверхности которого, вдоль его оси, были сделаны 12 канавок шириной 1,2 мм и глубиной 1,2 мм для улучшения стабильности генерации пучка.

Полученные результаты можно объяснить автоэмиссией электронов с катода. Поскольку амплитуда напряжения на выбросе большая (см. рис.2), то напряжённость электрического поля на микроостриях достигает значительной величины, что вызывает появление автоэлектронной эмиссии. На шероховатой поверхности количество микроострий значительно больше, и количество автоэлектронов, даже при более низких напряжениях, значительно. Это обуславливает формирование электронного облака и генерацию пучка при более низких напряжениях. Другим аргументом в пользу автоэмиссионного характера является появления первичных электронов за достаточно короткое время. Так, например, в работе [11], при исследованиях с наносекундной длительностью выброса напряжения (~4...5 нсек), получено вторичноэмиссионное размножение электронов и генерация пучка. Очевидно, что другие механизмы эмиссии не могут за столь короткое время дать достаточное количество первичных электронов. Таким образом, первичными электронами, вызывающими вторичноэмиссионные процессы, являются автоэмиссионные электроны, а их источником – микроострия на катоде.

Другим важным вопросом при исследовании генерации пучка в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами является определение области катода с которой происходит эмиссия первичных автоэлектронов. С этой целью проводились измерения тока электронного пучка магнетронной пушки с диаметром анода 26 мм и диаметром катода 5 мм и 16 мм, в которой изменялась длина катодной ножки (расстоянии от края анода 6 до экрана 8) от 40 мм до 130 мм (с соответственным уменьшением глубины погружения катода в анод). При увеличении длины катодной ножки стабильность генерации пучка возрастала. Это связано, очевидно, с увеличением числа первичных электронов при увеличении площади ножки катода, что облегчает формирование электронного облака и генерацию пучка. В других экспериментах, на катод между краем анода 6 и экраном 8, одевалась керамическая трубка, расстояние от конца трубки до края анода

составляло ~ 10 мм. В магнетронной пушке с диаметром катода 16 мм ток пучка при наличии керамической трубки уменьшался, а при диаметре катода 5 мм генерация пучка вообще отсутствовала.

Эти результаты согласуются с данными исследований по генерации пучка во вторичноэмиссионной системе с 8-ю катодами и общим анодом [6] при различных конструкциях ввода катода в анод (диаметр катодов 5 мм, наружный диаметр анода – 78 мм, внутренний – 20 мм, длина системы- 210 мм) (рис.3). В экспериментах было обнаружено, что конструкция области ввода катодов в анод системы в значительной степени влияет на устойчивость генерации пучка. Исследовалась генерация пучка в двух типах конструкций. В первой конструкции (рис.3а), катоды вводились в систему через отверстия во фланце, соединяющем анодные цилиндры, расположенном со стороны ввода катодов. В этой конструкции происходила устойчивая генерация пучка. С целью увеличения электрической прочности промежутка катод - анод исследовалась конструкция, в которой ввод катодов в анод осуществляется через щель, образованную промежутком между цилиндрами анода, а соединяющий фланец расположен в месте выхода пучков (рис.3в). В этом случае генерация пучка была устойчива, однако ток пучка был значительно ниже. Эксперименты, проведенные с модифицированной (показано пунктиром на рис.3в) конструкцией этого типа, в которых анод имел конусный участок в месте ввода катодов, показали, что ток пучка имеет два участка - стабильный участок генерации короткой длительности (0,5...1,0 мкс) и последующий нестабильный участок (3...4 мкс).

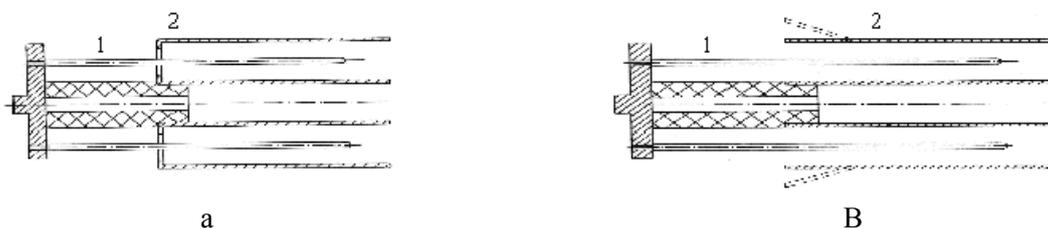


Рис.3. Схема 8-ми катодной вторичноэмиссионной системы. 1- катоды, 2- анод.

а - катоды вводились в систему через отверстия во фланце, соединяющем анодные цилиндры, расположенном со стороны ввода катодов;

в - катоды вводились в анод через щель, образованную промежутком между цилиндрами анода, а соединяющий фланец расположен в месте выхода пучков

Таким образом, полученные результаты показывают, что образование электронного облака происходит за счёт автоэмиссии электронов из области катода, расположенной вблизи ввода катода в анод. При изменении конструкции ввода катодов, изменяются условия развития вторичноэмиссионных процессов на начальной стадии формирования пучка. Количество первичных автоэлектронов определяется площадью электродов, поэтому при закрытии поверхности катода керамической трубкой их количество резко уменьшается и стабильность генерации пучка ухудшается, а при малой поверхности катода генерация пучка отсутствует. Участок ввода катодов в анод является участком, определяющим развитие вторичноэмиссионного процесса. Аналогичные результаты, связанные с конструкцией ввода катодов в аноды, были получены для штыревой системы, описанной в [4]. Это говорит о том, что имеется возможность воздействовать на запуск вторичноэмиссионных процессов, путём создания участка системы с заданным распределением неоднородного электрического поля.

В магнетронной пушке имеется три участка, на которых радиальное E_r и продольное E_z электрическое поле имеет различное пространственное распределение. На рис.4 приведено расчётное распределение электрических полей E_r и E_z вдоль оси пушки (без пучка), на расстоянии от катода 0,5 мм) и показаны эти участки. Расчёты выполнены для двух длин погружения катода в анод - 90 мм и 10 мм. Для длины катода 90 мм (сплошная линия): 1 – участок ввода катодов в анод, в которой имеется нарастающее поле E_r и почти постоянное поле E_z , 2 – коаксиальный участок пушки с однородным радиальным электрическим полем E_r , составляющая электрического поля E_z отсутствует, 3– участок, в котором имеются обе эти составляющие, причём поле E_z обеспечивает вывод электронов из пушки. Для длины катода 10 мм (штриховая линия) участок 2 с однородным радиальным электрическим полем E_r отсутствует и вывод электронов производится продольным электрическим полем E_z из области неравномерного радиального поля E_r .

Электроны, эмитированные с краевых участков катода, под действием продольного электрического поля приобретают осевую составляющую скорости и движутся в нарастающем радиальном электрическом поле. Поскольку в таком поле на первом полуобороте циклоид электроны ускоряются более слабым радиальным полем, чем тормозятся на втором полуобороте, орбиты электронов отрываются от поверхности катода. Образование автоэлектронов в области нарастающего электрического поля, т. е. в области, расположенной в месте ввода катода в анод, вызывает их движение в анод и накопление в промежутке катод-анод. На спаде выброса напряжения (рис.2), электроны изменяют свою потенциальную энергию, и центры их орбит смещаются в радиальном направлении [9].

Были проведены эксперименты, в которых изменялась глубина погружения катода в анод. В первом случае - диаметр катода 16 мм, анода – 26 мм, глубина погружения катода в анод составляла 90 мм и 40 мм (длина ножки катода оставалась постоянной ~ 50 мм), во втором - диаметр катода 5 мм, диаметр анода 26 мм, длина анода – 140 мм, глубина погружения катода в анод составляла ~ 90мм и ~ 10 мм (рис.4).

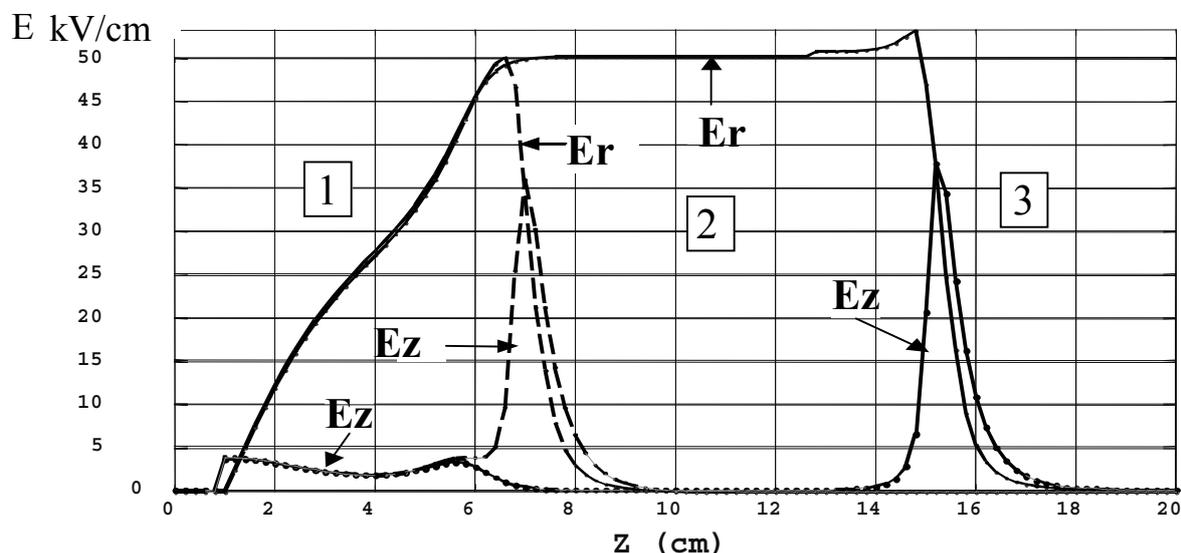


Рис.4. Расчетное распределение радиального и продольного электрического поля в магнетронной пушке вдоль оси диаметра катода – 5 мм, диаметр анода - 26 мм, глубина погружения катода в анод 10 мм (- - -) и 90 мм (----), напряжение катод – анод 50 кВ.

Результаты измерений в первом случае показывают, что при изменении глубины погружения катода в пушке почти в два раза, от 90 мм до 40 мм ток пучка практически не уменьшается, зависимость тока пучка от напряжения подчиняется закону "3/2".

Во втором случае изменение глубины погружения катода от 90 мм до 10 мм приводит к уменьшению тока пучка в несколько раз (в зависимости от условий эксперимента), зависимость тока пучка от напряжения при длине 10 мм – близка к линейной.

Из этих результатов можно сделать вывод о том, что участок неоднородного электрического поля (ввод катода в анод и начальная часть пушки - участок 1 на рис.4) определяет начальную стадию и накопление электронов в облаке и стационарный самоподдерживающийся процесс вторичноэмиссионного размножения в электрических полях, возникающих при колебаниях плотности электронного облака. Роль области 2 на процессы вторичноэмиссионного размножения на стационарной стадии генерации пучка, как показывают эксперименты, не является определяющей, однако значительно влияет на величину тока пучка.

Исходя из вышеизложенного можно представить физическую картину генерации электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом следующим образом. При подаче на катод импульса напряжения, в области 1 (с ножки катода) за счёт автоэмиссии происходит выход электронов в межэлектродный промежуток и, при дальнейшем росте напряжения (и, следовательно, электрического поля) до вершины выброса (см. осциллограмму импульса напряжения U на рис.2), эти электроны удаляясь от катода, накапливаются в промежутке катод-анод. Следует отметить, что микроострия расположены на поверхности катода хаотично, вследствие этого эмиссия автоэлектронов также будет неравномерна.

Однако за счёт большого количества периодов циклоиды процесс накопления электронов носит статистический характер, что приводит к формированию облака первичных электронов достаточно однородным по плотности в азимутальном и продольном направлении. На спаде выброса эти электроны набирают энергию и бомбардируют катод. Энергетический спектр этих электронов широкий, электроны с энергиями выше первого и ниже второго критического потенциала, при бомбардировке катода вызывают процессы вторичноэмиссионного размножения и образование электронного облака. При накоплении большого количества электронов и достижения режима экранировки катода наступает стационарная стадия вторичноэмиссионного размножения и генерации пучка. За счёт развития колебаний пространственного заряда возникает самоподдерживающийся вторичноэмиссионный процесс генерации электронного пучка. Другая часть электронов, попадая на катод, нагревает его.

Эту картину подтверждают исследования стабильности амплитуды тока электронного пучка в вторичноэмиссионных системах, которая составляет 2...5% (рис.5) [12]. Стабильность амплитуды пучка определяется многими факторами, в частности тем, что должно быть стабильное количество первичных

электронов в промежутке катод-анод. Это достигается тем, что микроострия на катоде в процессе автоэмиссии изменяются слабо (из-за отсутствия взрывной эмиссии). Такая величина стабильности тока пучка достигается, по нашему мнению, благодаря наличию практически однородного и протяжённого облака первичных электронов. Это говорит в пользу приведенной выше физической картины начальной стадии генерации пучка во вторичноэмиссионных системах.

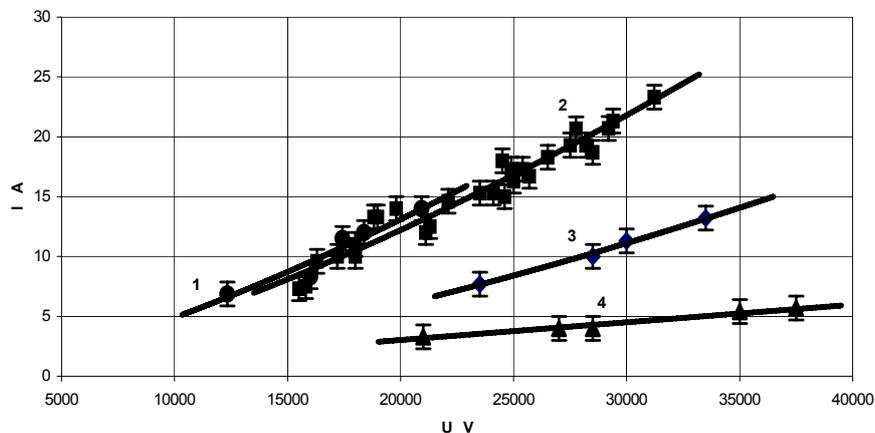


Рис.5. Зависимость тока электронного пучка от напряжения на катоде для магнетронных пушек от глубины погружения катода в анод:

диаметр анода 26 мм, диаметр катода 16 мм: 1 - длина катода 90 мм, 2 - длина катода 40 мм; диаметр анода 26 мм, диаметр катода 5 мм: 3 - длина катода 90 мм, 4 - длина катода 10 мм. Сплошная линия – закон «3/2».

Как показали эксперименты, поверхность катода вблизи места ввода катода имеет сиреневый цвет, плавно переходящий в желтовато-оранжевый цвет меди к концам катода, что указывает на повышенную бомбардировку поверхности электронами. Это подтверждает предположение о том, что участок катода, на котором происходит самоподдерживающийся процесс вторичноэмиссионного размножения и генерации пучка расположен на участке ввода катода в анод и начальной части пушки (область 1 на рис.4).

Следует отметить, что важная роль принадлежит выбору материала катода [13, с.26-27;14, с.123-127] вторичноэмиссионных источников электронов, который определяет основные параметры электронного пучка. Материал катода должен иметь коэффициент вторичной эмиссии больше единицы, низкую величину первого критического потенциала, быть устойчивым к электронной бомбардировке.

Были проведены эксперименты с магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом, изготовленными из различных металлов: меди, алюминия, титана, нержавеющей стали (диаметр катода 40 мм, анода – 78 мм, длина пушки – 140 мм). В экспериментах, несмотря на то, что коэффициент вторичной эмиссии алюминия и титана меньше единицы, во всех случаях наблюдалась генерация электронного пучка, зависимость тока пучка от напряжения подчиняется закону «3/2» (рис.6).

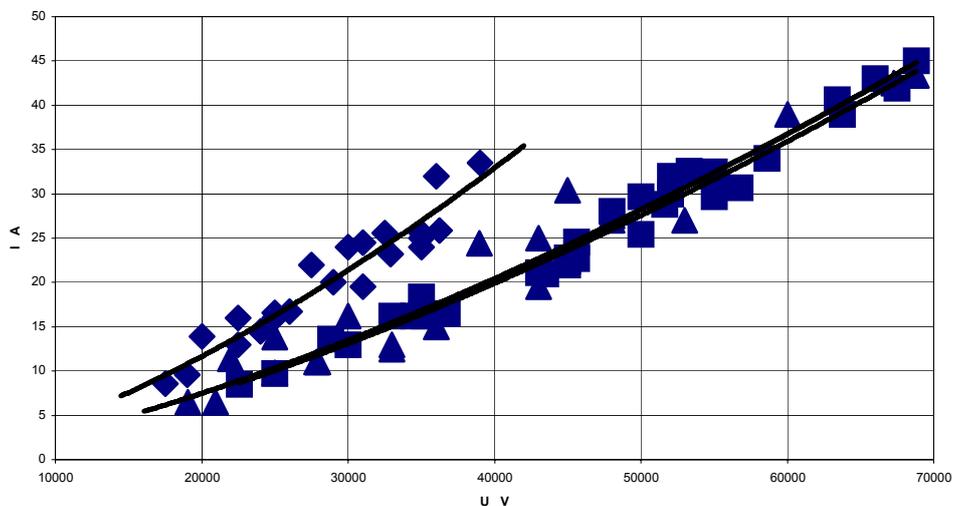


Рис.6. Зависимость тока пучка для катодов из различных материалов

алюминий - ромбы, медь - квадраты, титан - треугольники. Сплошная линия – закон «3/2»

Как показали эксперименты, процессы вторичноэмиссионного размножения, по-видимому, происходят на слоях окислов на поверхности катода, образующихся при техническом вакууме менее $10^{-5} \dots 10^{-6}$ Торр и при наличии органических материалов внутри камеры. (Следует отметить, что в любом случае, образование первичных электронов связано с автоэмиссией с поверхности катода). Как видно из рис. 6, ток пучка при использовании алюминиевого катода был выше, чем в случае других материалов катода. Другим фактором увеличения коэффициента вторичной эмиссии материала является обработка катода, на что указывают результаты работы [15]. Увеличение тока пучка при большом коэффициенте вторичной эмиссии катода может происходить за счёт образования нескольких слоёв электронного облака по радиусу [16, 17], однако этот эффект требует проведения дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что механизм появления первичных электронов в магнетронных пушках с холодными металлическими катодами связан с автоэмиссией из микроострий, находящихся вблизи ввода катода в анод. Показано, что амплитуда тока электронного пучка слабо зависит от длины погружения катода в анод. Предложена физическая картина генерации электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным металлическим холодным катодом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. Получение электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом. // ЖТФ. - 2001. - Т.71. В. 2. С. 98 - 104.
2. Saveliev Y.M., Sibbett W., Parkes D.M. Crossed-field secondary emission electron source. //Phys. Plasmas. - 1997.-V.4.- P.2319.
3. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. Получение мощных электронных пучков в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами. //ЖТФ. - 2001. - Т.71. - В. 7. - С. 88-91.
4. Айзацкий Н.И., Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н. и др. Формирование пространственно-периодических пучков в системе магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами //Письма в ЖТФ. - 2001. - Т. 27. - В. 23. - С. 25-30.
5. Dovbnya A.N, Reshetnyak N.G., Romas'ko V.P. at all. Pulsed modulators for feeding the 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. Айзацкий Н.И., Борискин В.Н., Довбня А.Н. и др. Генерация электронных пучков в многокатодном вторично-эмиссионном источнике. //ЖТФ. - 2003. - Т 73. - В. 2. - С. 113-117.
7. Довбня А.Н., Закутин В.В., Пархоменко А.А. и др. Электронные пучки для радиационных технологий. //ВАНТ, сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (82), 2002, №6, с.152-153.
8. Dovbnya A.N, Aizatsky N.I., Boriskin V.N. at all. On creation of a cathode units for the X-band klystron. //Abstract. of the Part.Accel.Conf., Portlend, Oregon, USA, 12-19 May, 2003, p. 42-43.
9. Глушихин В.Н., Соминский Г.Г. О воздействии краевых полей на накопление пространственного заряда в устройствах М-типа с вторичноэмиссионными катодами. //Электронная техника, сер. Электроника СВЧ. М., 1983, вып.11, с.8-11.
10. Кульварская Б.С., Татарнинова Н.В. //Радиотехника и электроника. – 1992. - Т. 37 - Вып. 2 - С.262-266.
11. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным металлическим катодом //ЖТФ. - 2001. - Т. 71. - В. 9. - С. 134-136.
12. Dovbnya A.N, Aizatsky N.I., Boriskin V.N. at all. Stability of electron beam parameters in sources with cold secondary-emission cathodes. //Abstract. of the Part.Accel.Conf., Portlend, Oregon, USA, 12-19 May, 2003, p. 227.
13. В.П.Ковалёв. Вторичные электроны. М.: Энергоатомиздат, 1987. - 177 с.
14. И.М.Бронштейн, Б.С.Фрайман. Вторичная электронная эмиссия. Изд. «Наука», Главная редакция физ-мат. литературы. Москва, 1969. - 407 с.
15. R.E.Kirby, F.K.King. SLAC-PUB-8212, October, 2000, 10 p.
16. Чурюмов Г.И. О неустойчивости электронного облака в докритическом режиме магнетронного диода. // «Радиотехника и электроника». – 1996. – Т. 41, - № 11. - С.1348-1352.
17. Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. Формирование электронных пучков в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами с большим аспектным соотношением. //ЖТФ. - 2002. - Т. 72. - В. 3. - С. 76-79.

ABOUT GENERATION OF ELECTRON BEAMS IN MAGNETRON GUNS WITH SECONDARY-EMISSION CATHODE

A.N. Dovbnya¹, V.V. Zakutin¹, N.G. Reshetnyak¹, T.A. Kovalenko², T.A. Semenets¹

¹Scientific-Production Complex «Accelerator»

National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology»
Ukraine, 61108, Kharkov, 1, Academicheskaya St.,61108, Kharkov, Ukraine

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

²Kharkov National University
Ukraine, 61077, Kharkov, sq.Svobody, 4

The investigations on definition of primary electron emission region in magnetron guns with the cold secondary-emission cathodes have been carried out. It is shown that primary electron origination mechanism is connected with autoemission from micropoints on the cathode surface. A physical picture of electron beam generation in a magnetron gun is offered.

KEY WORDS: magnetron gun, autoemission, secondary emission, electron beam.