

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ АНОДНОГО ТОКА В МАГНЕТРОННОЙ ПУШКЕ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

*Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько,
И.А. Чертищев*

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Харьков, Украина*

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты исследования генерации и параметров анодного тока в магнетронной пушке с диаметром катода 40 мм и анода 70 мм в закрытом режиме, когда весь электронный ток шел на анод. Проведено обсуждение полученных результатов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проводятся исследования формирования и параметров электронного пучка с вторично-эмиссионных источников в скрещенных полях [1]. На основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом создан макет ускорителя с энергией частиц 100 кэВ и током пучка 110 А [2]. Принцип действия пушки основан на вторично-эмиссионном 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 [3]. В настоящей работе проведено исследование распределения токов и параметров электронного пучка, попадающего на анод, в магнетронной пушке с холодным вторично-эмиссионным катодом, в зависимости от величины и распределения продольного магнитного поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по изучению распределения потоков электронов в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом при изменении величины магнитного поля проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на Рис.1.

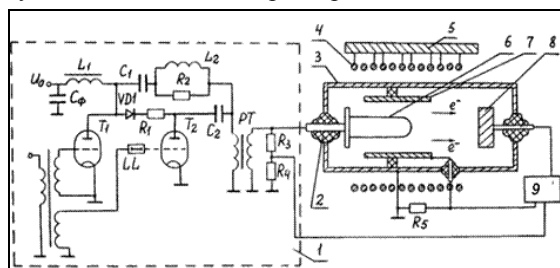


Рис.1. Схема установки:

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

Импульс напряжения от импульсного генератора 1 поступал на катод 6 магнетронной пушки, анод 7 через резистор R5 соединён с «землей». С этого ре-

зистора снимается импульс электронного тока, попадающего на анод. С цилиндра Фарадея 8 снимается импульс прямого тока. Длительность импульса напряжения составляла 10...50 мкс.

Для проведения исследований использовался цифровой осциллограф с запоминанием. Сигналы на него подавались с датчиков напряжения, анодного тока и цилиндра Фарадея. С помощью компьютерной измерительной системы 9 измерялись параметры тока пучка.

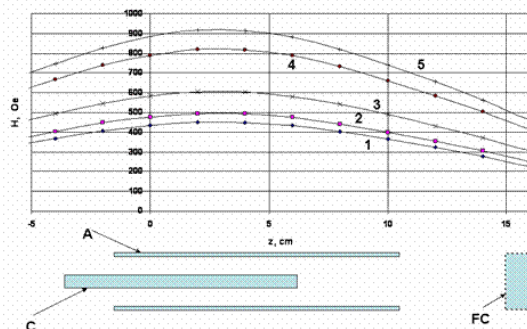


Рис.2. Распределение магнитного поля и элементов системы. А – анод, С – катод, FC – цилиндр Фарадея

Магнитное поле создавалось с помощью соленоида 4 и источника его питания 5. На Рис.2 показано расположение элементов пушки, распределение и амплитуда магнитного поля.

Эксперименты проводились с магнетронной пушкой с диаметром катода 40 мм и анода – 70 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принцип генерации электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом состоит во вторично-эмиссионном размножении и накоплении электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. На Рис.3 показана схема магнетронной пушки и направление электрического и магнитного полей.

При подаче на катод магнетронной пушки импульса напряжения и отсутствии магнитного поля генерация пучка отсутствует, поскольку первичные автоэлектроны, образовавшиеся за счёт автоэлектронной эмиссии, двигаются прямо на анод. При

включении слабого магнитного поля автоэлектроны отклоняются от прямолинейных траекторий и двигаются по криволинейной траектории на анод А.

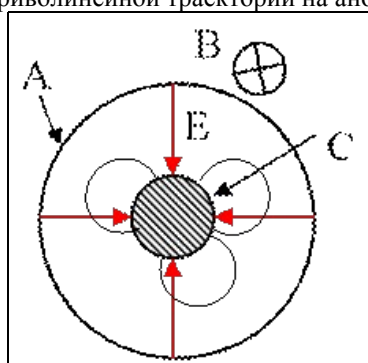


Рис.3. Поперечный разрез магнетронной пушки и траектории электронов в скрещенных полях

При дальнейшем увеличении магнитного поля автоэлектроны начинают двигаться так, что криволинейные траектории превращаются практически в окружность (Рис.3). Эти электроны начинают бомбардировать вторично-эмиссионный катод и выбивать из него, вследствие явления вторичной эмиссии, вторично-эмиссионные электроны, причём количество выбитых электронов превышает количество падающих электронов, пропорционально коэффициенту вторичной эмиссии.

Таким образом, происходит накопление вторичных электронов вблизи катода и образование электронного облака. При небольшом магнитном поле, плотность электронного облака невелика и электроны находятся практически во всём зазоре анод-катод, при этом некоторая часть электронов может двигаться в направлении анода и, попадая на анод, создавать анодный ток I_A . Схематически пушка показана на Рис.1. При увеличении магнитного поля электронное облако сжимается, его плотность увеличивается, наступает экранировка катода, вторично-эмиссионное размножение происходит вблизи поверхности. Из этого облака краевым полем коаксиальной конструкции пушки вытягивается и формируется электронный пучок (прямой ток пучка) I_b в направлении на цилиндр Фарадея.

Были проведены эксперименты для проверки приведенной модели генерации электронов. Амплитуда напряжения на катоде магнетронной пушки была постоянной и составляла ~ 30 кВ. На Рис.4 показаны импульсы анодного тока и прямого тока пучка магнетронной пушки при постепенном увеличении магнитного поля (кривые 1-5 на Рис.5), при этом вид распределения практически не меняется. Видно, что сначала наблюдается появление тока, идущего на анод (верхний график), а затем прямого тока, идущего на цилиндр Фарадея (нижний график). Из Рис.2 видно, что имеется область существования вторично-эмиссионного размножения электронов (зона генерации) по магнитному полю, которая составляет ~ 450 Э.

Условно можно рассматривать три случая: когда имеется анодный ток много больше прямого тока - закрытый режим, когда прямой ток много больше

анодного - открытый режим, когда прямой ток сравним с анодным - промежуточный режим.

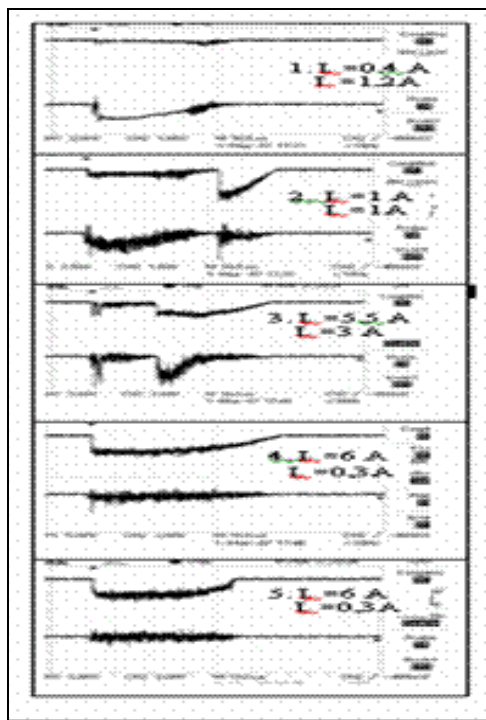


Рис.4. Осциллограммы импульсов анодного тока (внизу) и прямого тока (вверху) при различных величинах магнитного поля (1-5 на Рис.2) и величина прямого и анодного токов

Проведено исследование зависимости анодного тока от напряжения на катоде в диапазоне 10... 50 кВ. Эксперименты показали, что в закрытом режиме при напряжении на катоде ~ 10 кВ ток на анод составлял ≥ 2 А, а при 30 кВ этот ток составлял ~ 7 А. На Рис.5 приведены типичные осциллограммы импульса напряжения и анодного тока, полученные с помощью компьютерной измерительной системы, при напряжении на катоде $U_p \sim 28$ кВ ток на анод составлял $\sim 4,6 \dots 5$ А при длительности импульса ~ 44 мкс.

При напряжении на катоде ~ 40 кВ через время ~ 30 мкс возникал небольшой ток на цилиндр Фарадея. Это связано с тем, что при уменьшении напряжения на катоде и при постоянной амплитуде магнитного поля происходит усиление магнитной изоляции электронного потока. При этом происходит усиление вторично-эмиссионных процессов на катоде, происходит «подсадка» напряжения и, как следствие, возникает прямой ток пучка на цилиндр Фарадея. Т.е., в одном импульсе напряжения осуществлялись два режима генерации тока: закрытый в течение ~ 30 мкс и промежуточный режим в течение ~ 18 мкс.

Как видно из осциллограмм на Рис.6 (при $U \sim 45$ кВ) происходит генерация анодного тока ~ 8 А, а также с самого начала появлялся небольшой осевой ток. Когда напряжение на катоде уменьшается через 26 мкс до $\sim 28 \dots 30$ кВ, то происходит увеличение осевого тока до 7 А за счет механизма, приведенного выше.

Промежуточный режим характеризуется генерацией примерно равных токов, идущих на цилиндр Фарадея и на анод. Этот режим был получен и исследован при напряжении 20...30 кВ.

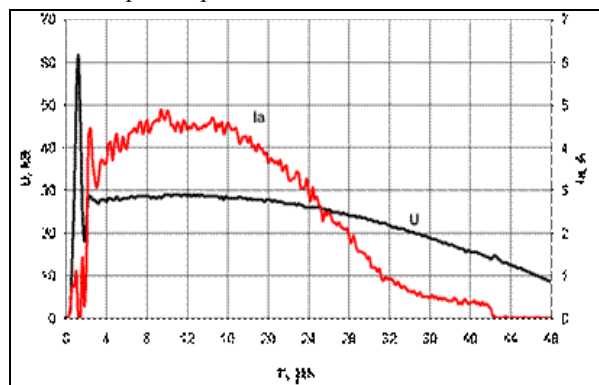


Рис.5. Типичные осциллограммы импульсов напряжения (U) и анодного тока (I_a)

При напряжении на катоде ~20 кВ ток на анод составлял ~2,1 А, а в осевом направлении – ~2,2 А при напряженности магнитного поля в центре катода ~580 Э при длительности ~48 мкс.

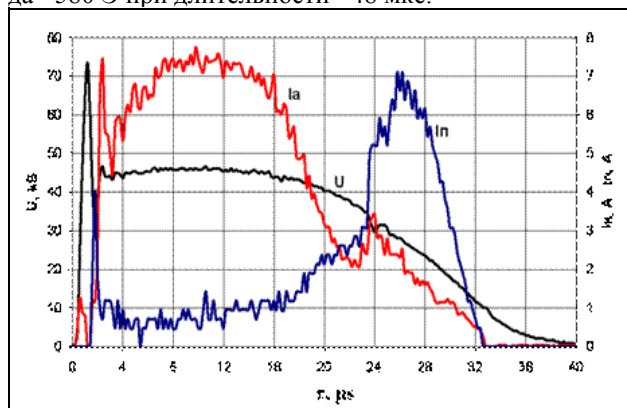


Рис.6. Типичные осциллограммы импульсов напряжения (U), анодного тока (I_a), прямого тока (I_n)

При проведении экспериментов были обнаружены режимы работы электронной пушки, когда при сохранении процессов вторично-эмиссионного размножения электронов на катоде ток шел на анод и характеризовался его колебаниями. В колебательном режиме генерации анодного тока продольное магнитное поле H немного больше поля отсечки Хэлла:

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

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

Как видно из полученных осциллограмм импульса напряжения и тока на анод (Рис.7), их можно разбить на три части. Первая часть импульса характеризуется возникновением типичной формы анодного тока длительностью ~4 мкс. На втором участке напряжение увеличивается и при данном значении магнитного поля магнетронная пушка не может поддержать этот режим генерации анодного тока, так как для этого необходимо увеличить амплитуду магнитного поля. Поэтому происходит срыв вторично-эмиссионного размножения и ток резко уменьшается. При резком уменьшении тока I_a происходит воз-

растание импеданса пушки и получается всплеск напряжения. В момент, когда напряжение уменьшается, снова генерируется анодный ток, так как удовлетворяются условия для вторично-эмиссионного размножения электронов. Новые импульсы тока продолжают до тех пор, пока напряжение на катоде не станет меньше критического, затем наблюдается типичная форма анодного тока до окончания импульса напряжения.

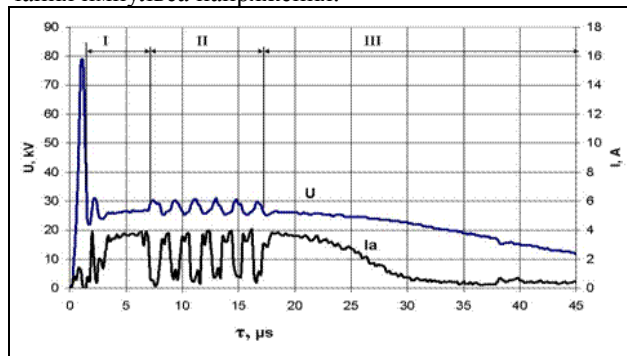


Рис.7. Осциллограммы режима генерации сгустков анодного тока

При магнитном поле на катоде ~ 500 Э и напряжении на катоде ~ 14 кВ ток на анод был ~ 3 А. Когда напряжение на катоде увеличивалось до 16 кВ возникал колебательный режим и наблюдалось до 10...12 сгустков анодного тока, модулированных по интенсивности на 85...95%. Частота модуляции составляет ~ 5 МГц.

Следует отметить, что магнетронная пушка в промежуточном режиме также способна работать в колебательном режиме. Как видно из полученных осциллограмм на импульсах напряжения и тока на цилиндр Фарадея и на анод (Рис.8) на них можно выделить две характерные области. Первая область характеризует колебательный режим генерации тока на анод и тока на цилиндр Фарадея. Вторая – обычный режим генерации пучка.

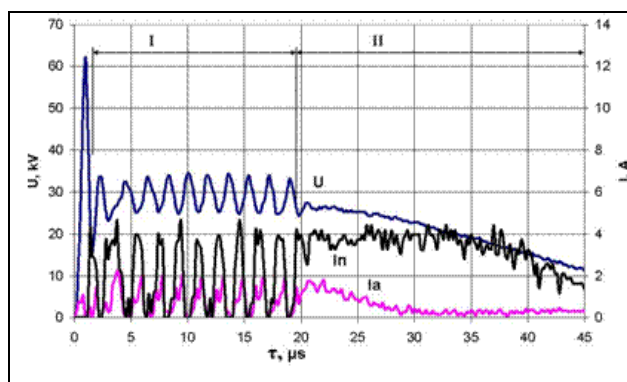


Рис.8. Осциллограммы режима генерации сгустков анодного и прямого токов

ВЫВОДЫ

Показано, что в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом можно осуществлять изменение направления электронного тока от осевого (вдоль направления магнитного поля) к радиальному (поперек направления магнитного поля), регулируя амплитуду и распределение магнитного поля при сохранении вторично-эмиссионных процессов

на катоде. Исследованы два режима генерации анодного тока: закрытый – электронный ток направлен на анод, а ток вдоль оси отсутствует; и промежуточный – электронные токи вдоль оси и на анод примерно равны. Показана возможность получения сгустков электронного тока в этих режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. Получение мощных электронных пучков в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами // *ЖТФ*. 2002, т.72, №12, с.98-102.
2. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторично-эмиссионным источником // *Вестник Харьковского Национального университета. Серия Физическая. «Ядра, частицы, поля»* (№732). 2006, №2(30), с.96-100.

3. А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. Исследование азимутальной однородности электронного пучка магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом // *Вестник Харьковского Национального университета. Серия Физическая. «Ядра, частицы, поля»* (№642). 2004, №3(25), с.91-103.

Статья поступила в редакцию 08.10.2007 г.

INVESTIGATION OF ANODE CURRENT GENERATION IN THE MAGNETRON GUN WITH A SECONDARY-EMISSION CATHODE

N.I. Ayzatsky, A.N. Dovbnya, V.V. Zakutin, N.G. Reshetnyak, V.P. Romas'ko, I.A. Chertishchev

Results of investigation generation and parameters of anode current in magnetron gun is representative. Regime generation is closed, when all electron current go to the anode (diameter cathode 40 mm and diameter anode 70 mm). Obtained results are discussed.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАЦІЇ АНОДНОГО СТРУМУ В МАГНЕТРОННІЙ ГАРМАТІ З ВТОРИННО-ЕМІСІЙНИМ КАТОДОМ

М.І. Айзацький, А.М. Довбня, В.В. Закутін, М.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, І.А. Чертіщев

Приведено результати дослідження генерації та параметрів анодного струму в магнетронній гарматі з діаметрами катода 40 мм та анода 70 мм в закритому режимі, коли весь струм йшов на анод. Проведено обговорення отриманих результатів.