

УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ

А.Н. Довбня¹, В.В. Закутин¹, Н.Г. Решетняк¹, В.П. Ромасько¹,
И.А. Чертищев¹, В.Н. Борискин¹, Н.А. Довбня¹, Т.А. Коваленко²

¹НИК «Ускоритель» ННЦ «ХФТИ»

1, Академическая, Харьков, 61108, Украина

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

4, пл. Свободы, 61077, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 20 июня 2006 г.

Приведены результаты исследования формирования и параметров электронного пучка, генерируемого ускорителем на основе вторичноэмиссионного источника электронов. Показано, что такой источник формирует электронный пучок с энергией электронов до 100 кэВ, током до 110 А, длительностью импульса 10...20 мкс с частотой повторения 3...5 Гц, с удельной мощностью на поверхности мишени ~ 3 МВт/см². Проведено облучение мишеней из различных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электронный пучок, электронный ускоритель, вторичноэмиссионный источник, модификация поверхности

Мощные электронные пучки являются одним из эффективных методов модификации поверхностных свойств материалов, что актуально для упрочнения и повышения износостойкости, коррозионной стойкости конструкционных реакторных материалов и увеличения срока службы элементов реакторов, авиационных и автомобильных двигателей, снятия отработанных покрытий и т.д. При воздействии пучка на материал его слой глубиной порядка пробега частиц в данном материале быстро нагревается до температур фазовых переходов, а затем охлаждается отводом тепла в толщу материала посредством теплопроводности. В результате этих процессов свойства поверхностного слоя изменяются. Скорость нагрева и охлаждения зависит от свойств материала и параметров пучка. В работах [1, 2] показано, что для модификации поверхности материалов оптимальные параметры электронного пучка следующие: энергия электронов 50...150 кэВ, плотность энергии 15...80 Дж/см², удельная мощность на поверхности обрабатываемого материала 1...5 МВт/см², длительность импульса 5...50 мкс. При таких параметрах пучка глубина модифицированного слоя составляет ~ 10...100 мкм.

Надежность и срок службы ускорительных установок в значительной степени определяются временем жизни источника электронов. В исследуемом ускорителе в качестве источника электронов используются магнетронные пушки с безнакальными холодными вторичноэмиссионными катодами. Такие пушки просты по конструкции, не теряют эмиссию после напуска атмосферы, срок службы может достигать 100 тыс. часов.

В настоящей работе приведены результаты исследований формирования электронного пучка в источнике электронов и его параметров на мишени в зависимости от амплитуды и распределения магнитного поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по исследованию формирования и параметров электронного пучка и его транспортировки проводились на макете ускорителя, схема которого показана на рис. 1.

Для питания источника электронов ускорителя необходим импульсный генератор с большой длительностью импульса напряжения (до 50 мкс). С этой целью, в генераторе 1 с накопительной емкостью и повышающим импульсным трансформатором, использованы нелинейные свойства материала сердечника импульсного трансформатора [3]. В данной схеме использовался полный разряд накопительной емкости C_1 , через корректирующую цепочку L_2R_2 на импульсный трансформатор РТ.

Разряд емкости C_2 обеспечивал получение импульса напряжения (рис. 2) с выбросом на вершине, который подавался на катод пушки 6. Амплитуда выброса напряжения составляет 30...160 кВ, длительность спада выброса ~ 0,3 мкс, амплитуда плоской части импульса – 10...100 кВ, длительность импульса составляет 30...15 мкс, а частота следования импульсов – 3...5 Гц. Анод 7 через резистор R_5 , подключен к «земле». Исследования проводились с магнетронными пушками коаксиальной геометрии, которые размещались в вакуумном объеме 3, давление в котором было ~ 10⁻⁶ Торр.

Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создавалось соленоидом 4, состоящем из 4-х секций, питание которых осуществлялось от источников постоянного тока 5. Амплитуду и продольное распределение магнитного поля можно было регулировать путем изменения величины тока в секциях соленоида.

В процессе исследований проводились измерения напряжения на катоде (делитель R_3R_4), тока электронного пучка на цилиндре Фарадея 8 и анодного тока (R_5). Цилиндр Фарадея представляет собой отрезок

коаксиальной линии с волновым сопротивлением $\sim 12 \Omega$, длина ~ 400 мм, диаметр цилиндра 120 мм. Торцевая часть цилиндра Фарадея, на которую попадает пучок, изготовлена из нержавеющей стали, охлаждается водой и находится на расстоянии 100 мм от пушки.

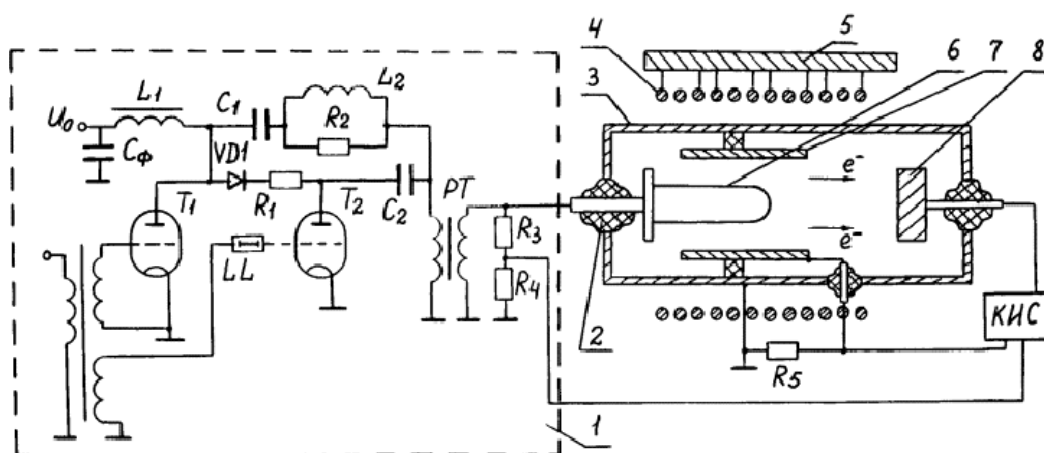


Рис.1. Схема установки.

1 - модулятор, 2 – изолятор, 3 - вакуумная камера, 4 - соленоид, 5 – источник питания соленоида, 6 - катод, 7 – анод, 8 - цилиндр Фарадея.

Обработка результатов измерений импульсов напряжения, тока пучка на цилиндре Фарадея, анодного тока и их стабильности проводилось с помощью компьютерной измерительной системы (КИС) [4], из последовательности (от 1 до 16-ти) импульсов, следующих друг за другом. Полученные данные выводились на экран компьютера.

Поперечные размеры пучка и распределение тока пучка по радиусу определялись при помощи отпечатков на мишенях из различных материалов (алюминий, нержавеющая сталь, медь и др.), размещённых на торцевой поверхности цилиндра Фарадея.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование формирования и параметров пучка в ускорителе производилось для нескольких геометрий магнетронных пушек. Как было показано [5], в коаксиальной геометрии пушки, первеанс и ток пучка определяется соотношением диаметров катода и анода $\alpha = d_k/D_a$. При малом α (при одинаковом напряжении на катоде) первеанс и, следовательно, ток пучка больше, однако, при этом электрическая прочность пушки невелика. Поэтому для повышения напряжения на катоде необходимо увеличивать диаметр катода и сохранять или даже увеличивать соотношение между диаметрами катода и анода. Таким образом, для получения заданных условий облучения мишеней необходимо для каждого диапазона энергий частиц пучка, использовать свою геометрию магнетронной пушки (диаметры катода и анода).

Были проведены экспериментальные исследования по формированию и измерению параметров электронных пучков в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами в ускорителе для обработки поверхности материалов. Исследования проводились с медным катодом диаметром 40 мм, а для перекрытия диапазона энергий электронов 10...100 кэВ, использовались аноды из нержавеющей стали с внутренним диаметром 70 мм и 78 мм. Измерения электрической прочности пушки показали, что для диапазона напряжений ~ 60 кВ необходимо использовать анод диаметром 70 мм, а для диапазона напряжений ~ 100 кВ диаметр анода должен составлять 78 мм. В указанных геометриях пушек исследовалось формирование пучка и влияние амплитуды и распределения магнитного поля на параметры электронного пучка.

Следует отметить, что исследование формирования и параметров пучка в магнетронной пушке с диаметром анода 70 мм достаточно подробно описано в [6]. Из этих результатов следует, что оптимальное распределение магнитного поля для генерации пучка (когда ток пучка максимален) имеет вид спадающего от катода к цилиндру Фарадея. При напряжении на катоде 50 кВ получен ток пучка 50 А, удельная мощность пучка на мишени составляет $\sim 0,6$ МВт/см², размеры пучка на мишени: наружный диаметр – 50 мм, внутренний – 44 мм. В этом случае ток пучка максимален, а коэффициент азимутальной неоднородности пучка минимален и составляет $K=1,1$.

В настоящей работе приведены результаты экспериментов с магнетронной пушкой с диаметром анода 78 мм при напряжении на катоде до 100 кВ.

Изучена зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от распределения магнитного поля вдоль канала транспортировки. На рис.3 приведены распределения продольного магнитного поля вдоль оси магнетронной

пушки и канала транспортировки пучка до цилиндра Фарадея (для трех различных соотношений токов в катушках соленоида), при которых проводились исследования. Там же показано расположение элементов магнетронной пушки и цилиндра Фарадея. Для двух случаев (рис.3, кривые 1 и 2) в области нахождения катода и анода магнитное поле было слабо спадающее к цилиндру Фарадея. В третьем случае поле было нарастающее (рис.3, кривая 3).

Как показали эксперименты, в спадающих магнитных полях (рис.3, кривые 1 и 2) при напряжении на катоде ~100 кВ магнетронная пушка формирует электронный пучок с током 110 А при длительности импульса 15 мкс, а анодный ток составляет ~0,3% тока пучка. В случае нарастающего магнитного поля в области транспортировки (рис.3, кривая 3, когда амплитуда магнитного поля в области катода практически не изменилась), ток пучка уменьшился на 15...20 %. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде и тока пучка показаны на рис.2.

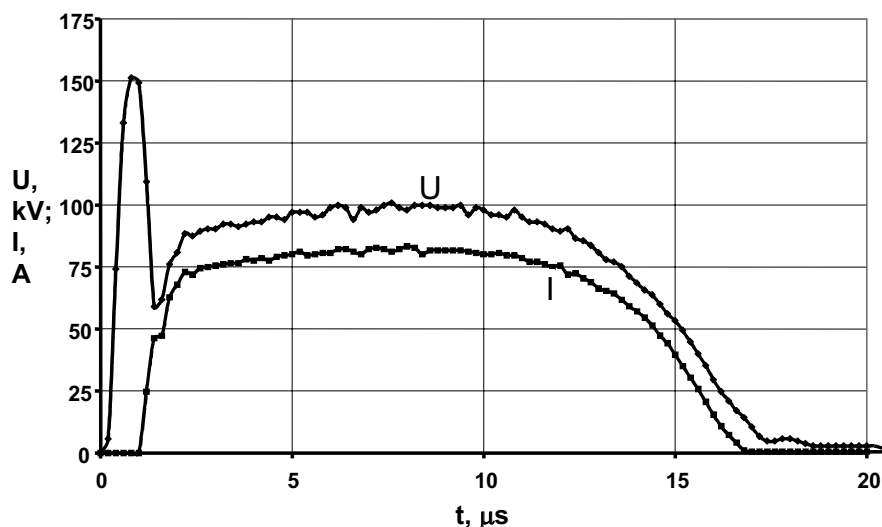


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на катоде (U) и тока пучка (I).

Изучена зависимость тока пучка на цилиндр Фарадея от напряжения на катоде. Показано, что эта зависимость подчиняется закону «3/2» в диапазоне напряжений 20...110 кВ. При этом в процессе измерений каждому фиксированному значению напряжения соответствовало оптимальное значение магнитного поля, при котором амплитуда тока пучка была максимальной.

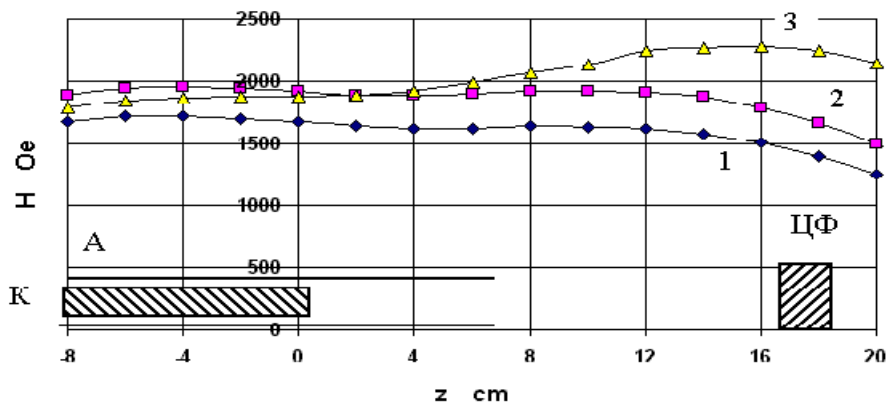


Рис.3. Распределение продольного магнитного поля для трех случаев.
А- анод, К- катод, ЦФ- цилиндр Фарадея.

Проведены измерения ширины зоны генерации электронного пучка по магнитному полю ΔH (где $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$, H_{\max} и H_{\min} – соответственно максимальная и минимальная величина магнитного поля для

генерации пучка) при различных напряжениях на катоде и различных видах распределения магнитного поля (спадающего и нарастающего). Результаты измерений показывают, что ширина зоны генерации ΔH зависит от вида распределения магнитного поля. В случае однородного или нарастающего к цилиндру Фарадея магнитного поля она шире и находится в пределах $\Delta H=400\dots 800$ Э, а в спадающем магнитном поле составляет $\Delta H=200\dots 300$ Э. При уменьшении амплитуды магнитного поля от границы ΔH снизу или увеличении сверху сначала изменяется форма импульса тока пучка, затем нарушаются условия вторичноэмиссионного размножения и происходит срыв процесса генерации электронного пучка.

Проведено исследование по получению максимальных параметров электронного пучка в спадающем магнитном поле при амплитуде напряжения ~ 100 кВ и токе пучка ~ 110 А. Показано, что формирование пучка начинается при магнитном поле на катоде ~ 1700 Э (рис.3, кривая 1), и сохраняется при увеличении амплитуды магнитного поля до ~ 2000 Э, т.е. зона генерации пучка по магнитному полю составляет $\Delta H \sim 300$ Э (рис.3, кривая 2). При этом амплитуда и форма импульса тока пучка на границах зоны генерации изменяется незначительно на ($\sim 2\dots 3\%$). Таким образом, значительная ширина зоны ΔH генерации формирования пучка весьма важна при использовании ускорителя с магнетронной пушкой в технологических целях.

При проведении экспериментов был получен многопиковый режим генерации электронного пучка [7], когда в течение одного импульса катодного напряжения возникало $8\dots 12$ микроимпульсов тока пучка (рис.4).

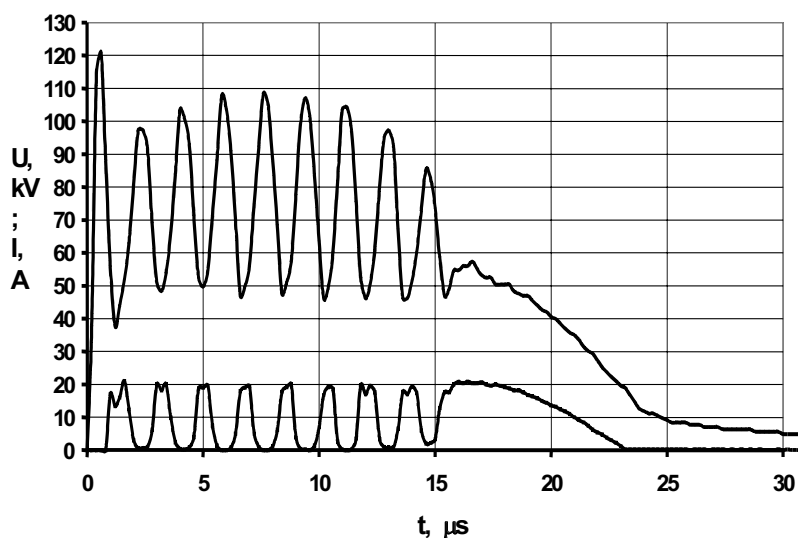


Рис.4. Оциллограммы напряжения на катоде (U), тока пучка (I) для многопикового режима генерации электронного пучка.

Этот режим реализован путём регулировки амплитуды и распределения магнитного поля вблизи нижней границы генерации пучка в диапазоне напряжений $30\dots 100$ кВ. Как видно из рис. 4, вершина импульса напряжения имеет модуляцию близкую к синусоидальной, а ток пучка имеет вид сгустков, расположенных по времени в тех местах, где синусоида имеет спад. Амплитуда тока сгустка составляла ~ 20 А, период следования сгустков $\sim 1,4$ мкс, длительность ~ 1 мкс. В этом случае энергетический спектр сгустков (микроимпульсов) тока пучка расположен в диапазоне энергий от ~ 50 кэВ до ~ 90 кэВ. Такой режим формирования пучка может представлять интерес для исследовательских задач физического материаловедения.

Проведены измерения размеров электронного пучка на мишенях из различных материалов (алюминий, нержавеющая сталь). При напряженности магнитного поля на катоде ~ 1500 Э и нарастающего к цилиндру Фарадея до 1750 Э и при напряжении на катоде 75 кВ, магнетронная пушка формирует кольцевой электронный пучок с током ~ 60 А, с наружным диаметром ~ 41 мм и толщиной стенки ≈ 2 мм (рис.5). Как видно из рисунка пучок имеет достаточно высокую азимутальную однородность, что согласуется с результатами [6]. На рис.6 приведено распределение плотности электронов пучка по радиусу в относительных единицах (график получен с помощью компьютерной обработки отпечатка).

Из рисунка видно, что однородность плотности электронов составляет $\pm 17\%$.

Проведено облучение мишеней из различных материалов, при этом использовалась инструментальная сталь (У12М, ХВГ, Х12Н), обладающая свойством поверхностной закалки, а также титан. Измерения показали, что имеет место увеличение микротвёрдости сталей в 2 раза.

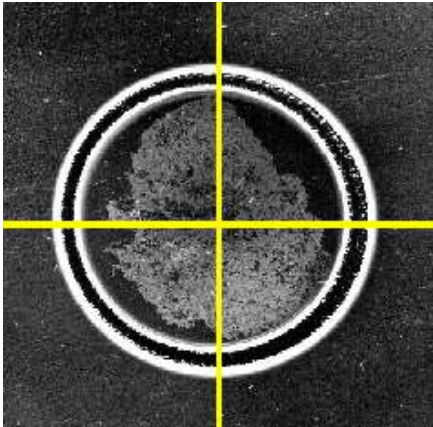


Рис.5. Отпечаток пучка.

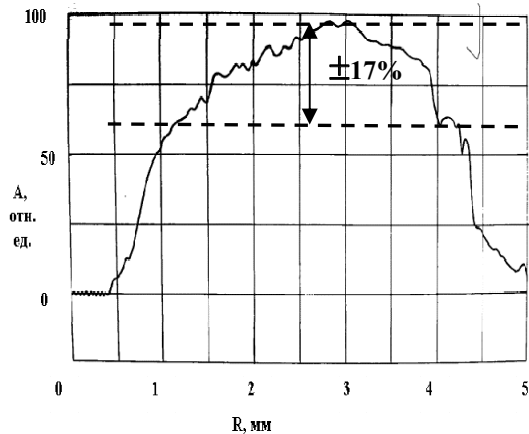


Рис.6. Распределение плотности электронов пучка по радиусу.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследований формирования пучка электронного ускорителя на основе магнетронной пушки с энергией ~ 100 кэВ, достигнут режим работы при котором ток пучка составляет ~ 110 А. При таких параметрах удельная мощность пучка на мишени достигает ~ 3 МВт/см² при длительности импульса ~ 15 мкс, что позволяет использовать пучок электронов ускорителя при проведении научных исследований и в технологических процессах для модификации поверхности материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelko V., Mueller G., Andreev A. et al. Pulsed electron beam facilities (GESAs) for surface treatment of materials. Tenth international conference on applied charged particle accelerators in medicine and industry. Proceeding. Russia, Saint-Petersburg, 1-4 October, 2001. - P.412-417.
2. Энгелько В.И., Кузнецов В.С., Вязьменова Г.А. Исследование возможности снятия отработанного защитного покрытия турбинных лопаток импульсным электронным пучком. Сборник докладов Десятого Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001), с.404-406.
3. Грязнов Н.М. Трансформаторы и дроссели в импульсных устройствах. - М.: Радио и связь, 1986. - 112с.
4. Boriskin V.N., Ayzatsky N.I., Gurin V.A. et al. Multichannel system for research of secondary-emission pulse electron beam generation. Abstract PCaPAC2002, INFN-LNF Frascati (Rome) Italy. October, 2002, p.30.
5. Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. Формирование электронных пучков в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами с большим аспектным соотношением //ЖТФ – 2002. - Т.72 - Вып.3. - С.76-79.
6. 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.
7. Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк. О формировании электронного пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом //Вестник Харьковского Национального университета, серия физическая “Ядра, частицы, поля” – 2002. - № 548. - Вып.1(17). - С.23-28.

**INVESTIGATION OF BEAM PRODUCTION IN ELECTRON ACCELERATOR WITH
SECONDARY-EMISSION SOURCE FOR MATERIAL SURFACE TREATMENT**
A.N. Dovbnya¹, V.V. Zakutin¹, N.G. Reshetnyak¹, V.P. Romas'ko¹, I.A. Chertishcev¹, V.N. Boriskin¹,
N.A. Dovbnya¹, T.A. Kovalenko²

¹Scientific-Production Complex “Accelerator”
National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”
Ukraine, 61108, Kharkov, 1, Academicheskaya St.

E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

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

It was carried out research of beam production in electron accelerator with secondary-emission source. It was shown that such source produces electron beam with energy up to 100 keV, current 110 A, in pulse duration 10...20 μ s with frequency repetition 3...5 Hz with specific power on target surface ~ 3 mwt/sm². Target irradiation of different materials was carried out.

KEY WORDS: electron beam, electron accelerator, secondary-emission source, surface modification