

ПОВЫШЕНИЕ ТОКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

*А. Н. Довбня, В. В. Закутин, Н. Г. Решетняк, Н. И. Айзацкий,
В. Н. Борискин, Н. А. Довбня*

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Приводятся параметры электронного пучка ускорителя прямого действия, в котором в качестве источника используется магнетронная пушка с вторично-эмиссионным катодом. Рассматриваются проблемы повышения тока пучка и расширения области применимости. Экспериментально показано, что при создании магнитного поля перелега от 5 до 10% в непосредственной близости от катода ток пучка увеличивается на 70–80% по сравнению с однородным магнитным полем. При напряжении на катоде ~ 35 кВ магнетронная пушка создает электронный пучок с током ~ 100 А.

Reported are the parameters of the beam produced by the direct-action electron accelerator, where a magnetron gun with a secondary-emission cathode is used as a particle source. Problems of increasing the beam current and extending the fields of application of the accelerator have been considered. The experiments have shown that with creation of magnetic field overshoot by 5 to 10% in the vicinity of the cathode end the beam current increases by 70–80% as compared with the uniform magnetic field. At a cathode voltage of ~ 35 kV, the magnetron gun generates the electron beam of ~ 100 A current.

PACS: 29.90.+g

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проводятся исследования по генерации и применению электронного пучка, формируемого магнетронными пушками с вторично-эмиссионными катодами [1, 2], и численному моделированию процессов в них [3]. На основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом создан ускоритель, в котором при напряжении на катоде 100 кВ получен ток пучка ~ 110 А [1] и который используется для облучения различных металлических мишеней из различных материалов. Однако для повышения тока электронного пучка и, соответственно, удельной мощности на мишени необходимо либо увеличивать напряжение на катоде, причем электрическая прочность межэлектродного промежутка пушки в данной геометрии может оказаться недостаточной, либо искать другие способы решения проблемы.

В [2] увеличение тока электронного пучка достигалось за счет накопления и удержания электронов в магнетронном диоде. Для этого применялись неоднородные электрическое или магнитное поля для создания аксиальной тормозящей силы и создания условий для аксиальных колебаний электронов и увеличения их кинетической энергии.

Наиболее эффективным методом оказалось создание локального изменения магнитного поля на небольшой длине катода с помощью кольцевого магнита и образования магнитной ловушки, в которой происходит накопление и удержание электронов. Уменьшение магнитного поля в середине катода позволило увеличить первеанс электронного пучка [2].

В данной работе приведены результаты исследования влияния локального изменения магнитного поля на различных расстояниях от начала ввода катода в анод магнитного кольца из материала NdFeB и изучение параметров электронного пучка как с провалом, так и с выбросом магнитного поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по повышению тока электронного пучка проводились при напряжении 15–40 кВ по схеме, приведенной на рис. 1. Ускоритель электронов состоит из следующих основных узлов: высоковольтного импульсного генератора 1, магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом 2 с рефлектором 8, внутри которого размещается кольцевой магнит М, и анодом 3, вакуумной камеры 7, цилиндра Фарадея 4, соленоида 5, создающего продольное магнитное поле, компьютерной измерительной системы 6 для измерения параметров пучка.

Импульсный генератор 1 обеспечивал получение импульса напряжения специальной формы, который подавался на катод с амплитудой выброса напряжения до 80 кВ, длительностью $\sim 0,5$ мкс, амплитудой плоской части до 50 кВ, длительностью плоской части ~ 40 мкс, частотой следования импульсов ~ 3 Гц.

Магнетронная пушка коаксиальной геометрии (2 — алюминиевый катод диаметром ~ 52 мм, 3 — анод диаметром 70 мм) размещалась в вакуумной камере, давление в которой составляло $\sim 10^{-6}$ Торр. Внутри катода размещался кольцевой магнит (М) из материала NdFeB.

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

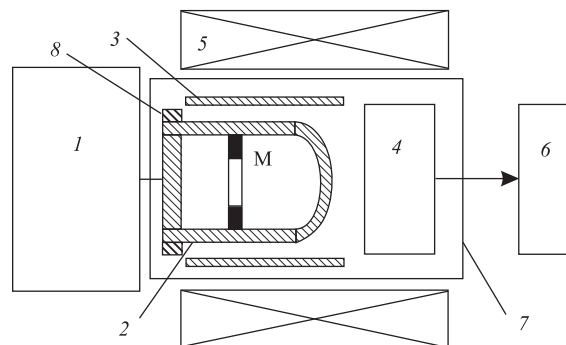


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — импульсный генератор; 2 — катод; 3 — анод; 4 — цилиндр Фарадея; 5 — соленоид; 6 — компьютерная измерительная система; 7 — вакуумная камера; 8 — рефлектор; М — кольцевой магнит

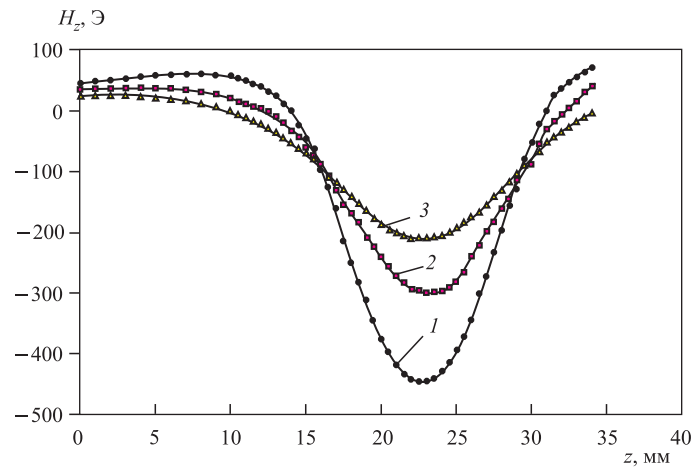


Рис. 2. Распределение магнитного поля H_z кольца на расстоянии от наружной поверхности 1 — 4 мм, 2 — 6 мм, 3 — 8 мм

Для изучения параметров пучка использовался 8-секционный охлаждаемый цилиндр Фарадея 4 с 12-канальной компьютерной измерительной системой на основе персонального компьютера.

Для создания локального изменения малой протяженности использовалось рассеянное магнитное поле со стороны наружного радиуса тонкого магнитного кольца (М) длиной ~ 3 мм и диаметром 31 мм. Было проведено измерение распределения рассеянного магнитного поля кольца на различных расстояниях от наружного радиуса (рис. 2). Видно, что амплитуда максимума магнитного поля на расстоянии 4 мм от наружной поверхности составляет 450 Э, при удалении от кольца амплитуда уменьшается, а ширина распределения увеличивается.

Были проведены измерения при различных направлениях поля кольца относительно направления поля в соленоиде.

Когда магнитное поле кольца направлено навстречу основному полю, то на обычном распределении магнитного поля для генерации пучка возникает провал поля небольшой протяженности 20–25 мм. Если направление поля кольца совпадало с основным полем, то возникал выброс на распределении основного магнитного поля. Эти измерения в сочетании с изучением влияния магнитного поля соленоида в пределах 700–1500 Э на магнитный материал и амплитуду максимального магнитного поля кольцевого магнита позволили выбрать конструкцию магнетронной пушки, чтобы создать в ней провал или выброс поля ~ 5 –10 % при магнитных полях, необходимых для генерации пучка 1000–1400 Э при напряжении 20–40 кВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены экспериментальные исследования по влиянию локального изменения магнитного поля на небольшом участке катода на амплитуду тока пучка, спектр колебания на вершине импульса тока, колебательный режим генерации тока в магнетронной пушке. Исследования проводились для трех случаев: 1 — магнитное поле имеет провал (поле магнитного кольца направлено навстречу полю соленоида), 2 — магнитное поле

имеет выброс (направление полей кольца и соленоида совпадают), 3 — магнитное поле однородное (кольцо отсутствует).

Измерения с одним кольцевым магнитом проводились при расположении его на различных расстояниях от места входа катода в анод ($L_1 \sim 6$ мм, $L_2 \sim 24$ мм и $L_3 \sim 70$ мм, соответственно, точки a , b , c на рис. 3). Для этих случаев проведено измерение амплитуды тока пучка от напряжения на катоде, коэффициента азимутальной однородности, размеров пучка, вида и спектра колебаний на вершине импульса тока.

На рис. 4 приведено распределение магнитного поля вдоль оси пушки, при котором проводились исследования по генерации электронных пучков в диапазоне напряжений 20–35 кВ, а кольцевой магнит был расположен в точке c .

Для случаев, показанных на рис. 3, проведены эксперименты по измерению тока пучка. Результаты измерений показывают, что амплитуда тока пучка возрастает при положении кольца в точке a — 6 мм на ~ 5 –8%, в точке b — 24 мм на 10–15% по сравнению с однородным полем (без магнитного кольца).

При наличии выброса магнитного поля (рис. 4, кривая 1) создается комбинированная ловушка для электронов за счет совместного действия электрического и магнитного полей. Со стороны ввода катода в анод отражающее электрическое поле создается рефлектором δ диаметром 60 мм, а со стороны выхода пучка — выбросом, созданным магнитным полем кольца. В этом случае происходит существенное увеличение амплитуды тока электронного пучка (на ~ 70 –80%) по сравнению с экспериментами, выполненными при отсутствии магнитного кольца с однородным магнитным полем. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде (U) и токов с сегментов цилиндра Фарадея (I_n) показаны на рис. 5, а коэффициент азимутальной неоднородности пучка составляет 1,2 (рис. 6).

Как показали экспериментальные исследования, при провале магнитного поля (на 5–10%) (рис. 4, кривая 2) амплитуда тока пучка уменьшается примерно в 2–2,5 раза по

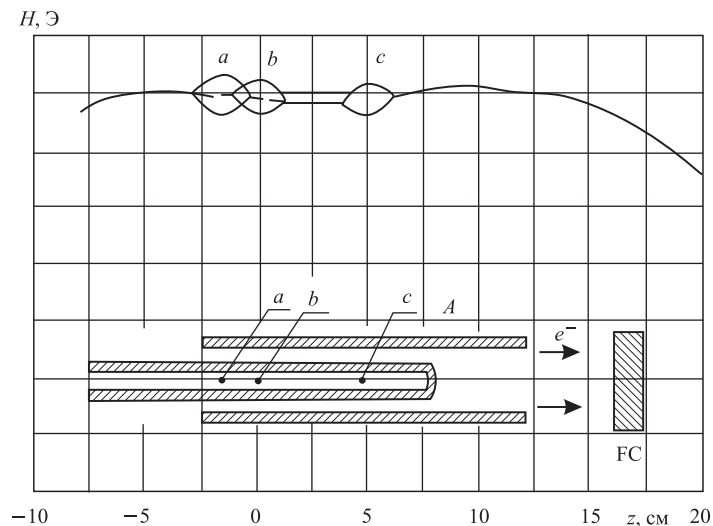


Рис. 3. Распределение основного магнитного поля вдоль оси пушки и расположение элементов; a , b , c — места расположения магнита

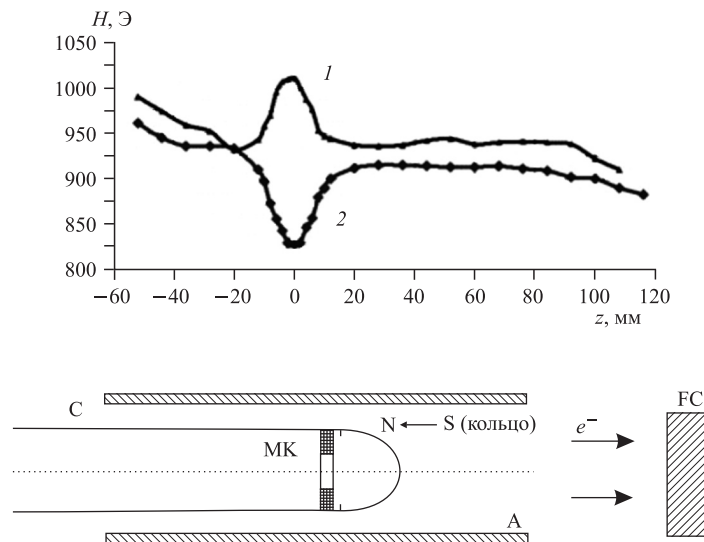


Рис. 4. Распределение основного магнитного поля вдоль оси пушки и расположение элементов: 1 — направление полей кольца и соленоида совпадают; 2 — поле кольца направлено навстречу полю соленоида; С — катод; А — анод; МК — кольцевой магнит; FC — цилиндр Фарадея

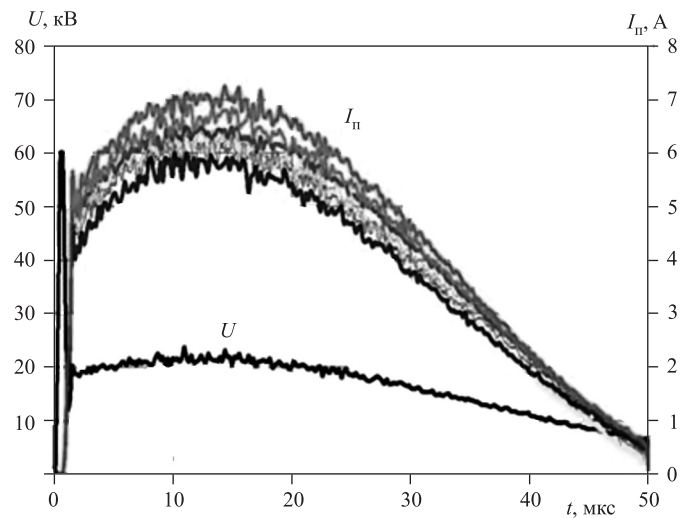


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на катоде и токов на цилиндре Фарадея

сравнению с выбросом магнитного поля при одинаковых условиях проведения экспериментов, а также она меньше по сравнению с экспериментами, проведенными с однородным магнитным полем (при отсутствии магнитного кольца).

Проведены измерения зависимости тока пучка от напряжения на катоде для трех случаев распределения магнитного поля вдоль оси системы (рис. 7). Как видно из рисунка, результаты измерений соответствуют закону «3/2», причем наибольшая плотность элек-

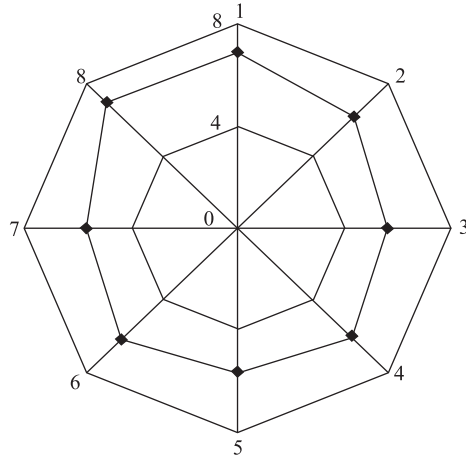


Рис. 6. Распределение тока пучка по азимуту

тронного облака и, соответственно, тока пучка получена в случае выброса магнитного поля (кольцо находится в точке c), например, при напряжении на катоде 26 кВ ток пучка составляет ~ 70 А, а при отсутствии кольца (однородное поле) составляет ~ 40 А. Это связано с тем, что в случае выброса магнитного поля часть электронов отражается от области выброса и происходит их накопление и удержание в комбинированной ловушке.

Было проведено измерение толщины электронного пучка на мишенях из различных материалов (медь, нержавеющая сталь, медная пластинка, на которую был нанесен слой из SiC толщиной 1 мкм с максимумом свечения на длине волны $\lambda \sim 450$ нм), кото-

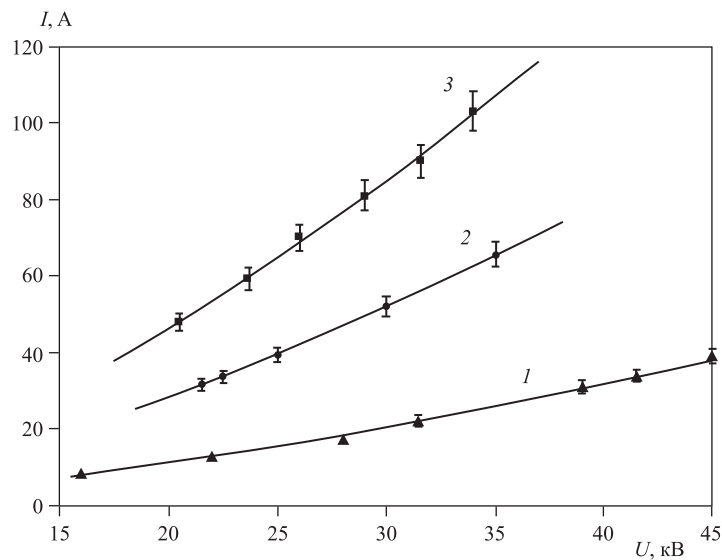


Рис. 7. Зависимость тока пучка от напряжения на катоде. 1 — магнитное поле с провалом; 2 — однородное магнитное поле; 3 — магнитное поле с выбросом

рые крепились на цилиндре Фарадея. На рис. 8 приведено свечение пучка на медной пластинке, посередине которой была сделана прорезь шириной $\sim 1,5$ мм. Оценки показывают, что в этом случае толщина пучка измеряется более точно (по сравнению с отпечатком на мишени [1]) и составляет $\sim 0,5$ мм. В зависимости от условий эксперимента, напряжения на катоде, величины амплитуды и вида распределения (спадающего, нарастающего или однородного) продольного магнитного поля толщина пучка изменяется в пределах 0,4–1,2 мм.

Изменяя амплитуду и распределение магнитного поля (рис. 4, кривая I), можно было получить магнетронный режим работы пушки, когда весь ток шел в радиальном направлении, а ток в аксиальном направлении практически отсутствовал. При напряжении на катоде ~ 21 кВ анодный ток составлял ~ 16 А (рис. 9), что значительно больше, чем при отсутствии кольца (4–6 А).



Рис. 8. Свечение пучка на мишени

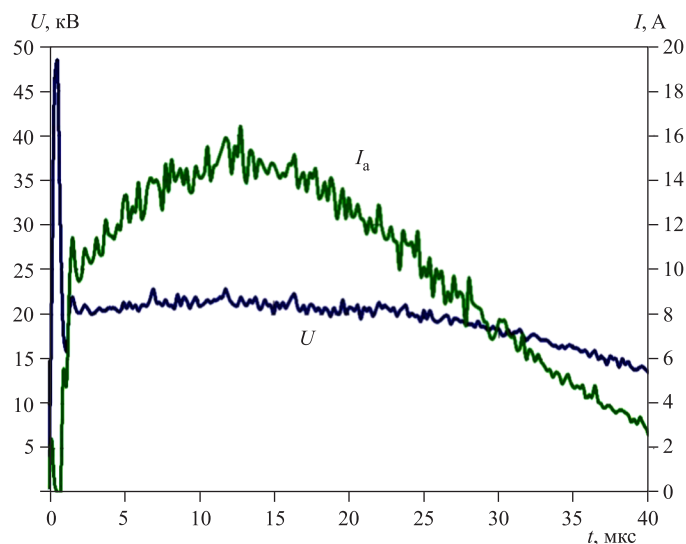


Рис. 9. Осциллограммы напряжения на катоде (U) и тока на анод (I_a)

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования по увеличению плотности электронного облака вокруг вторично-эмиссионного катода при создании ловушки электронов показали, что в этом случае имеется увеличение плотности электронного облака и, как следствие, увеличение тока пучка на 70–80 %. При напряжении на катоде ~ 35 кВ магнетронная пушка формирует электронный пучок с током ~ 105 А. Оценки показывают, что в аналогичной геометрии магнетронной пушки с увеличенным зазором анод–катод при напряжении на катоде ~ 100 кВ ток пучка будет составлять ~ 500 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довбня А. Н. и др. Исследования формирования пучка в ускорителе электронов с вторично-эмиссионным источником // Вестн. Харьковск. нац. ун-та. Сер. физ. «Ядра, частицы, поля». 2006. № 732, вып. 2(30). С. 96–100.
2. Saveliev Y. M., Sibbett W., Parkes D. M. Self-excitation and Operational Characteristics of the Crossed-Field Secondary Emission Electron Source // Rev. Sci. Instr. 1999. V. 70, No. 12. P. 4502–4514.
3. Агафонов А. В., Тараканов В. П., Федоров В. М. Динамика нарушения магнитной изоляции и самоорганизация электронного потока в магнетронном диоде // ЖТФ. 2004. Т. 74, вып. 1. С. 93–103.
4. Айзацкий Н. И. и др. Формирование электронных пучков в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами с большим аспектным соотношением // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 3. С. 76–79.
5. Айзацкий Н. И. и др. Формирование сгустков электронного тока в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом // Вестн. Харьковск. нац. ун-та. Сер. физ. «Ядра, частицы, поля». 2008. № 794, вып. 1(37). С. 85–89.