

04;10;11;12

Генерация электронных пучков в многокатодном вторично-эмиссионном источнике

© Н.И. Айзацкий, В.Н. Борискин, А.Н. Довбня, В.В. Закутин, В.А. Кушнир,
В.А. Митроченко, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец

Научно-исследовательский комплекс „Ускоритель“
Национальный научный центр „Харьковский физико-технический институт“,
61108 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2002 г.)

Проведено исследование генерации электронных пучков в системе из восьми вторично-эмиссионных катодов, периодически расположенных по азимуту внутри коаксиального цилиндрического анода в скрещенных электрическом и магнитном полях. В такой системе с неоднородным по азимуту электрическим полем реализовано вторично-эмиссионное размножение электронов и получена генерация пучка. При напряжении на катодах ~ 37 кВ и напряженности магнитного поля ~ 3000 Ое суммарный ток всех пучков составлял ~ 35 А, при этом микроперванс каждого пучка составлял $\sim 0.7 \mu\text{A}/V^{3/2}$.

Введение

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]. Принцип генерации пучка во вторично-эмиссионных системах в скрещенных полях хорошо известен. На спаде импульса напряжения первичные электроны, двигаясь в спадающем электрическом и постоянном магнитном полях по циклоидальным траекториям, набирают энергию и бомбардируют катод. При достаточно резком уменьшении электрического поля на катоде электроны приобретают энергию, достаточную для выбивания вторичных электронов (с коэффициентом вторичной эмиссии σ больше единицы). В этот момент происходит лавинообразное увеличение числа электронов, как бомбардирующих, так и выбиваемых. При этом число электронов возле катода увеличивается, пока не достигнет некоторого критического значения, при котором наступает динамическое равновесие, устанавливается стационарная стадия вторично-электронного размножения и начинается генерация пучка. Первичные электроны в системе могут образоваться как за счет автоэмиссии, эмиссии из диэлектрических вкраплений на поверхности катода или эмиссии с дополнительного термо катода [1,2].

Для генерации электронного потока за счет вторично-эмиссионного размножения необходимо создание соответствующих скрещенных электрических и магнитных полей вблизи катода. В силу граничных условий вблизи поверхности катода электрическое поле всегда нормально к поверхности металла. Из этого следует, что в любой системе цилиндрических вторично-эмиссионных катодов будут существовать условия, при которых генерация электронного пучка за счет вторично-эмиссионного размножения возможна в системах, не обладающих азимутальной симметрией во всей области межэлектродного промежутка.

Описание и исследование подобной системы, содержащей штыревые аноды и вторично-эмиссионные катоды, проведено в работе [7]. В такой системе штыревые аноды расположены на пересечении осей, образующих квадраты в плоскости xu , а штыревые катоды расположены между ними на пересечении диагоналей и образуют систему ячеек. В каждой ячейке азимутальная зависимость электрического поля изменяется от практически однородной (вблизи поверхности штыревых катодов) до сильнонеоднородной (на расстоянии от катода порядка половины расстояния до анодных штырей и более). Такая конструкция допускает периодическое расположение ячеек с вторично-эмиссионными катодами и соответственно электронных пучков, число которых можно увеличивать как в одну (линейный пучок), так и в обе стороны (образуя любую конфигурацию пучка в плоскости xu). При исследовании генерации пучка в четырех ячейках при напряжении на катоде ~ 28 кВ и напряженности магнитного поля ~ 2200 Ое получены электронные пучки с суммарным током пучка ~ 22 А.

Представляет интерес исследование неоднородной системы подобной линейной системе со штыревыми анодами и катодами, выполненной в цилиндрической геометрии. Такая система состоит из коаксиального цилиндрического анода, между цилиндрами которого периодически по азимуту расположены вторично-эмиссионные катоды. В настоящей работе проведены исследования генерации электронных пучков в многокатодной вторично-эмиссионной системе с коаксиальным анодом в скрещенных электрических и магнитных полях.

Экспериментальная установка и методика исследования

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Импульс напряжения специальной формы амплитудой до 100 кВ с длительностью

плоской части импульса $\sim 5 \mu\text{s}$ и частотой следования импульсов 12...15 Hz от импульсного модулятора 1 (*FL* — формирующая линия, *L* — зарядный дроссель, U_0 — зарядное напряжение, *R* — зарядное сопротивление, *DL* — линия задержки, *C* — формирующая емкость, *PT* — повышающий импульсный трансформатор), через проходной изолятор 2, подавался на катоды системы 6, а анод 7 заземлен через резистор *R3*. Необходимая для генерации пучка вершина импульса напряжения формировалась на катодах системы при сложении короткого импульса от отдельного генератора с помощью тиратрона *T2* и импульса напряжения модулятора с плоской вершиной с помощью тиратрона *T1* [8]. Длительность спада напряжения составляла $\sim 0.3 \mu\text{s}$, а крутизна спада — $\sim 150 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Использовалась девяти-ячеечная формирующая линия с волновым сопротивлением 12Ω и с длительностью импульса на полувысоте $\sim 7 \mu\text{s}$.

Многокатодная система размещалась в вакуумной камере 3, в которой поддерживалось разряжение $\sim 10^{-6}$ Торр. Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом 4 (состоящим из 4 секций), питание которого осуществлялось от источника постоянного тока 5. Напряженность и продольное распределение магнитного поля в вакуумной камере можно было регулировать путем изменения величины тока в секциях соленоида. Неоднородность продольного магнитного поля в системе и канале транспортировки до цилиндра Фарадея составляло $\pm 8\%$.

В процессе исследований проводились измерения напряжения на катоде, тока электронного пучка на цилиндре Фарадея и анодного тока. Измерение параметров импульса напряжения производилось с помощью резистивного делителя *R1R2*, анодного тока — с помощью измерительного сопротивления *R3*. Цилиндр Фарадея 8 представляет собой отрезок коаксиальной линии с волновым сопротивлением $\sim 12 \Omega$, длина линии $\sim 400 \text{ mm}$, диаметр цилиндра 120 mm. Торцевая часть цилиндра Фарадея, на которую попадает пучок, изготовлена из нержавеющей стали и имеет водяную систему охлаждения. Время установления тока пучка в измерительной цепи составляет 1...1.5 ns. Измерение размеров пучков

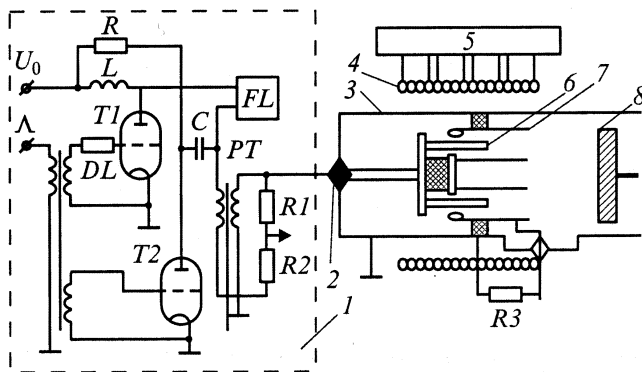


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

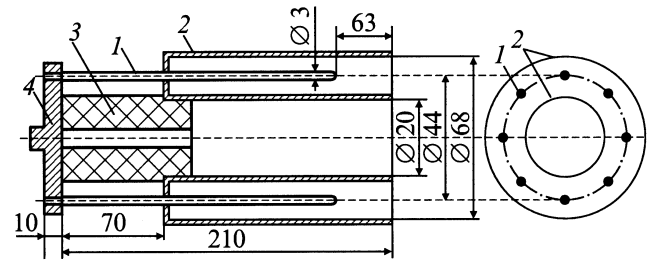


Рис. 2. Многокатодная система: 1 — вторично-эмиссионные катоды, 2 — анод, 3 — изолятор, 4 — металлический диск.

производилось с помощью отпечатка на алюминиевой или молибденовой фольге. Для оценки стабильности формы и амплитуды импульсов напряжения на катоде и тока пучка на цилиндре Фарадея кроме осциллографических измерений использовалась двухканальная измерительная система с персональным компьютером.

Исследуемая система с цилиндрическим анодом, в котором размещены вторично-эмиссионные катоды, показана на рис. 2. Как видно, система содержит восемь медных катодов 1 (диаметром 5 mm), которые закреплены на металлическом диске 4. На этом диске с помощью изолятора 3 крепится коаксиальный анод 2. Наружный диаметр анодного цилиндра равен 68 mm, диаметр внутреннего — 20 mm. Цилиндры анода изготовлены из нержавеющей стали и соединяются между собой с помощью металлического фланца с отверстиями, в которые вводятся катоды.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В экспериментах реализовано вторично-эмиссионное размножение электронов и получена генерация электронных пучков. Суммарный пучок на выходе пушки состоял из 8 электронных пучков. При амплитуде напряжения $\sim 37 \text{ kV}$ и напряженности магнитного поля $\sim 3000 \text{ Oe}$ суммарный ток всех пучков составлял $\sim 35 \text{ A}$, анодный ток достигал значения 1.5...2 A. В экспериментах получена устойчивая генерация пучка при крутизне спада $\sim 150 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

На рис. 3, а приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде и суммарного тока пучков на цилиндре Фарадея. Видно, что генерация пучка начинается на спаде выброса. Проведенные измерения времени нарастания импульса тока пучка показали, что оно составляет 10...12 ns. На рис. 3, б приведены осциллограммы импульса суммарного тока пучков на цилиндре Фарадея и анодного тока. Видно, что передний фронт импульса тока пучка формируется на спаде импульса напряжения.

Из рис. 3, б видно, что анодный ток повторяет форму тока пучка и составляет $\sim 3\%$ от тока пучка. На осциллограмме анодного тока в начальной части ви-

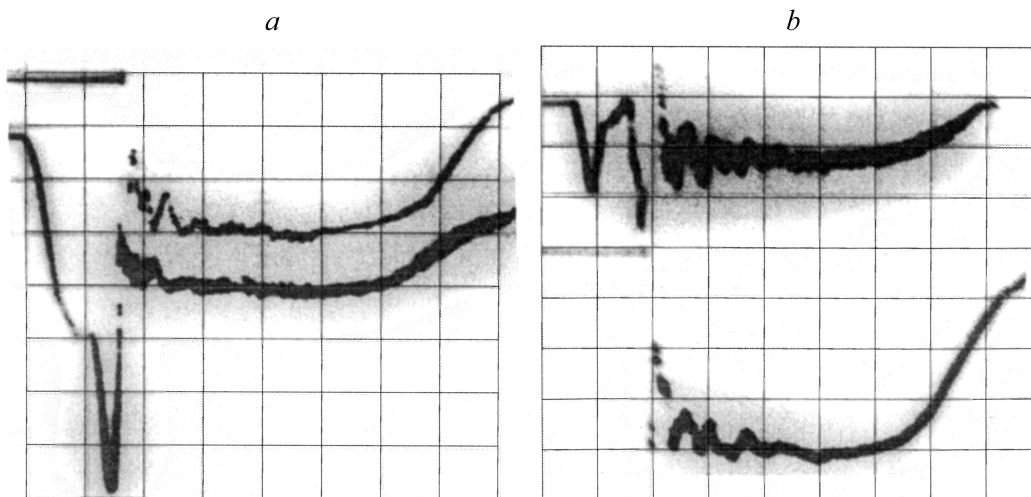


Рис. 3. Типичные осциллограммы импульсов: *a* — импульс напряжения на катоде (внизу) и импульс тока пучка на цилиндре Фарадея (вверху). Масштаб по вертикали 8 kV/div и 8 A/div, по горизонтали — 1 μs/div. *b* — импульс тока пучка на цилиндре Фарадея (внизу) и анодного тока пушки (вверху). Масштаб по вертикали 8 A/div для тока пучка, 1 A/div — для анодного тока, по горизонтали — 1 μs/div. Напряженность магнитного поля ~ 2500 Oe.

ден сигнал, связанный с дифференцированием выброса на импульсе напряжения. Измерена зависимость тока пучка на цилиндр Фарадея от напряжения на катоде. Эта зависимость подчиняется закону $3/2$. При этом в процессе измерений магнитное поле соответствовало максимальной амплитуде суммарного тока пучка.

При проведении экспериментов было обнаружено, что конструкция области ввода катодов в анод системы в значительной степени влияет на устойчивость генерации пучка и его амплитудное значение. С этой целью исследовалась генерация пучка в двух типах конструкции. В первой конструкции фланец, соединяющий анодные цилиндры, расположен со стороны ввода катодов. Во второй соединяющий фланец расположен в месте выхода пучков, а ввод катодов в анод осуществляется через промежуток между внутренним и наружным цилиндрами анода. Как показали эксперименты, в первой конструкции происходила устойчивая генерация тока пучка, во втором случае устойчивая генерация сохранялась, но ток пучка был меньше, чем в конструкции первого вида. Во второй конструкции, в которой анод имел конусный участок в месте ввода катодов (с целью увеличения электрической прочности), ток пучка имел два участка — стабильный участок генерации с длительностью плоской вершины 0.5...1.5 μs в начальной части импульса и последующий (нестабильный) участок пикового характера с амплитудой пиков $\sim 5...10$ A. Увеличение магнитного поля приводило к увеличению длительности плоской части вершины (до 1.5 μs), но не влияло на характер генерации последующей части пучка.

Отмеченные эффекты связаны с тем, что в месте ввода катодов при изменении конструкции нарушаются условия развития вторично-эмиссионных процессов на начальной стадии формирования пучка. При изменении

величины и распределения краевого электрического поля в месте ввода катодов в анод может изменяться как количество первичных электронов, так и условия набора энергии этими электронами. При большой величине электрического поля количество электронов велико и набор энергии электронами происходит быстрее и до больших величин. При меньшем значении электрического поля уменьшается как количество первичных электронов, так и величина их энергии и генерация пучка становится неустойчивой. С другой стороны, многокатодная система является системой с неоднородным полем. В этом случае, как показывают расчеты, движение электронов в значительной степени изменяется вплоть до отсутствия самоподдерживающегося процесса вторично-эмиссионного размножения. Таким образом, конструкция с цилиндрическим участком ввода катодов в анод является как бы стабилизирующим участком, определяющим развитие вторично-эмиссионного процесса. Эти результаты показывают, что имеется возможность воздействовать на запуск вторично-эмиссионных процессов путем создания участка системы с сильно неоднородным электрическим полем.

Проведены измерения поперечных размеров и положения электронных пучков при получении отпечатков пучков на мишенях на различных расстояниях от анода (рис. 4). Измерения показали, что на выходе анода данная система формирует 8 электронных пучков, имеющих вид эллипсов с большой осью, равной 6.5...7 mm, и малой осью 5.5...6 mm и расположенных в местах, соответствующих расположению катодов. Толщина отпечатка пучка ~ 1 mm. Оси эллипсов наклонены под углом $\sim 45^\circ$ к окружности, на которой находятся катоды (рис. 1). При изменении направления магнитного поля наклон оси эллипсов изменяется на 90° . Размеры эллип-

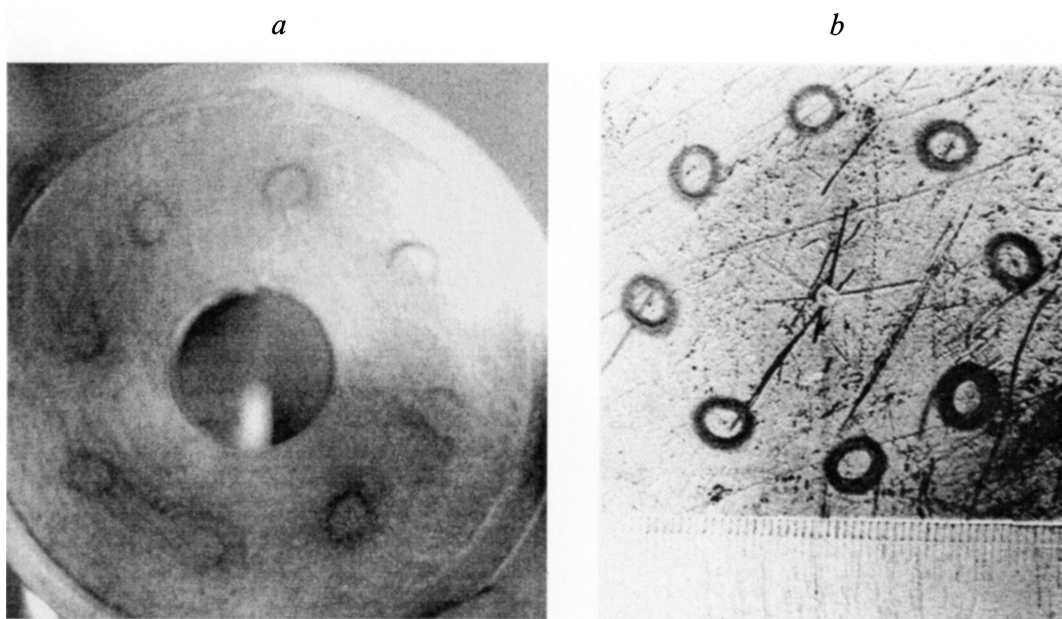


Рис. 4. Отпечатки пучков: *a* — на срезе анода, *b* — на расстоянии 72 мм от среза анода.

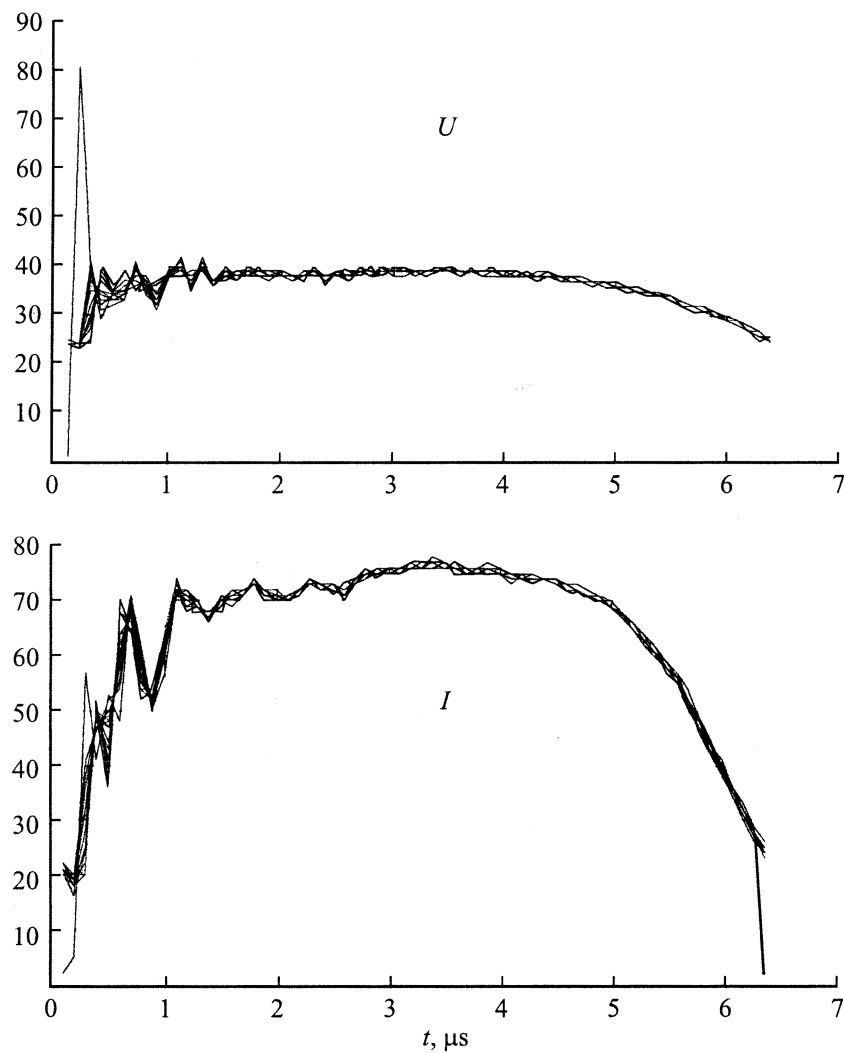


Рис. 5.

сов не изменяются при измерениях на выходе анодного блока и на расстоянии 72 mm от среза анодного блока.

Физическая картина получения отпечатков такого вида состоит в следующем. Распределение электрического поля в поперечном сечении системы неоднородно, расчеты показывают, что неоднородность радиального электрического поля вблизи поверхности катода по азимуту составляет $\sim 20\%$, причем большая величина поля соответствует точкам катода, расположенным ближе к аноду. Это обуславливает радиальный дрейф электронов, что изменяет форму поперечного сечения пучка, превращая его из окружности в эллипс, повернутый относительно оси пучка на некоторый угол.

Следует отметить, что величина магнитного поля в многокатодной системе превышает величину магнитного поля для одиночной магнетронной пушки с близкими размерами (диаметром катода 5 mm и диаметром анода 26 mm, амплитуде катодного напряжения 37 kV и напряженности магнитного поля 1900...2000 Oe) примерно в 1.5 раз. Например, для устойчивой генерации пучка в многокатодной системе при амплитуде напряжения на катоде 36 kV магнитное поле составляло 3000 Oe.

Это может быть связано с изменением распределения электрического поля в исследуемой системе. Область однородности электрического поля вблизи катода в поперечном направлении при отсутствии электронного облака занимает малую область пространства. При образовании электронного слоя (со значительным пространственным зарядом) электрическое поле вблизи катода выдавливается из области, которую занимает электронный слой, и область однородности заметно уменьшается. Это требует соответственно большей величины магнитного поля для формирования пучка.

Проведены измерения импульсов напряжения на катоде и тока пучка на цилиндре Фарадея с помощью автоматизированной двухканальной системы измерений. Экспериментальные точки получены выборкой из текущих осциллограмм с периодом выборки 200 ns (амплитуда напряжения 34 kV, ток пучка 30 A). Это позволило оценить стабильность генерации пучка в 16 импульсах, следующих друг за другом, т. е. стабильность амплитуды от импульса к импульсу. На рис. 5 приведены эти результаты. Из рисунка видно, что имеется достаточно высокая стабильность генерации пучка.

Выводы

Таким образом, в электронных пушках со скрещенными полями на основе штыревых катодных систем с неоднородным распределением электрического поля реализуется самоподдерживающийся процесс генерации электронных пучков на основе вторичной эмиссии. Существенное влияние на характеристики пучков, получаемых на выходе пушки, оказывает распределение электрического поля в области входа штырей в анодную систему. Потоки электронов, формируемые на выходе

пушки, представляют собой N (N — число катодов, в нашем случае $N = 8$) четко выраженных пучков. На выходе анодного блока наблюдается эллиптическая форма пучка, которая практически не изменяется в области транспортировки.

Список литературы

- [1] Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 98–104.
- [2] Saveliev Y.M., Sibbett W., Parkes D.M. // Phys. Plasmas. 1997. Vol. 4. N 7. P. 2319–2321.
- [3] Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 3. С. 78–80.
- [4] Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 2, 3. (29, 30). Т. 1. С. 134–140.
- [5] Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования (35). 1999. № 4. С. 11–13.
- [6] Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 9. С. 134–136.
- [7] Айзацкий Н.И., Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. Т. 27. Вып. 23. С. 25–30.
- [8] Dovbnya A., Reshetnyak N., Romasko V. et al. // Proc. Part. Accel. Conf. (PAC-2001). Chicago, 2001. Vol. 5. P. 3759–3761.