

УДК 621.384.659

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ВЫВОДОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

© 2013 г. Г. А. Баранов*, Л. В. Бодакин*, В. А. Гурашвили, И. Д. Джигайло, О. В. Комаров*,
С. Л. Косогоров*, В. Н. Кузьмин, В. И. Сень, Д. Ю. Ткаченко, Н. А. Успенский*, В. Я. Шведюк*

ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Россия, 142190, Троицк Московской обл., ул. Пушкиových, владение 12

*НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова

Россия, 196641, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 3

Поступила в редакцию 28.02.2012 г.

Описаны конструктивные особенности и результаты исследований ускорителя электронов на энергию до 200 кэВ с пучком большого сечения. Ускоритель разработан на основе ряда дискретных протяженных термоэммиттеров и работает в непрерывном режиме. Сечение выводимого в атмосферу пучка составляет $40 \times 50 \text{ см}^2$, максимальная плотность тока выведенного пучка электронов — до 100 мкА/см^2 . Неоднородность распределения плотности тока электронного пучка по сечению не превышает 10%.

DOI: 10.7868/S0032816213010047

Широкоапертурные электронные ускорители, генерирующие пучки низкой энергии (до 300 кэВ) большого сечения, находят широкое применение в радиационных технологиях, плазмохимических реакторах, газовых электроионизационных лазерах и др. Их важной особенностью является возможность одновременного облучения поверхностей или газовых объемов большого поперечного сечения. Анализ общих требований к пучкам большого сечения, подробный обзор их практического применения и перспектив использования дан в работе [1]. Широко известны ускорители на основе ряда протяженных проволочных термоэммиттеров с планарными электронно-оптическими системами (э.о.с.) (например, [2, 3]).

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований широкоапертурного ускорителя с э.о.с. триодного типа, генерирующего в непрерывном режиме электронный пучок низкой энергии (до 200 кэВ) большого сечения.

От ранее исследованных систем, работающих в импульсно-периодическом режиме, рассматриваемый ускоритель отличается примененными конструктивными решениями и режимами управления ускорителем. Так, в ускорителе [2] использована пассивная триодная э.о.с. с сеткой, находящейся под потенциалом катода; в ускорителе [3] применена тетродная э.о.с. с различными положительными потенциалами обеих сеток, при этом вторая сетка выполнена в виде перфорированной круглыми отверстиями пластины. В рассматриваемом ускорителе сетка выполнена в виде ряда стержней, параллельных нитям термоэммиттеров, причем ее геометрия рассчитана таким образом, что-

бы управление ускорителем осуществлялось в области отрицательных сеточных потенциалов. Эти решения, а также соответствующая геометрия охлаждаемой опорной решетки, не использовавшейся ранее, позволили повысить плотность вы-

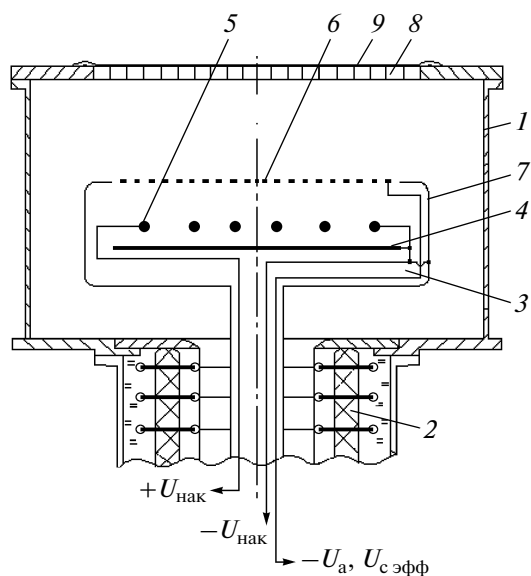


Рис. 1. Принципиальная схема ускорителя. $+U_{\text{нак}}$, $-U_{\text{нак}}$, $U_{\text{с эфф}}$ — напряжения питания накала термоэммиттеров и сетки, подаются под общим ускоряющим напряжением $-U_{\text{а}}$ относительно земли. 1 — вакуумная камера, 2 — проходной высоковольтный изолятор, 3 — катодно-сеточный блок, 4 — тепловой экран, 5 — термоэммиттеры, 6 — сетка, 7 — электростатический экран, 8 — опорная решетка, 9 — фольга.

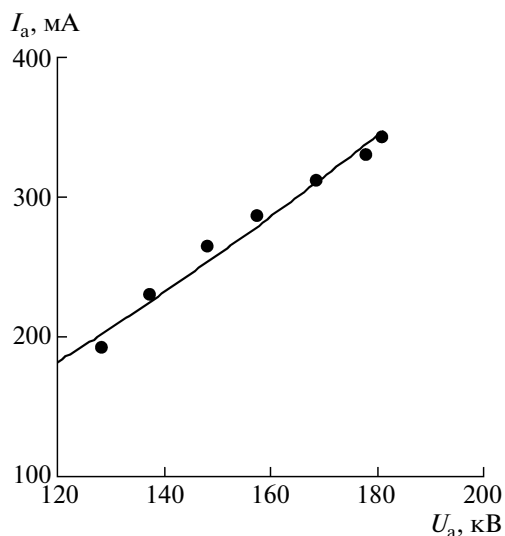


Рис. 2. Анодная вольт-амперная характеристика ускорителя — зависимость тока нагрузки от ускоряющего напряжения при $U_c = -60$ В.

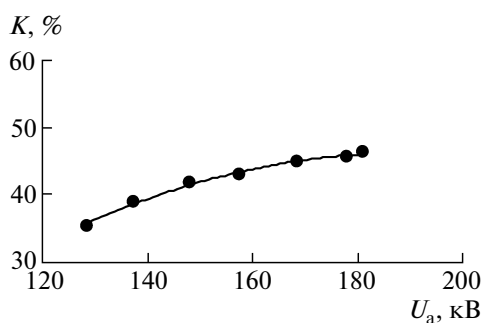


Рис. 3. Зависимость коэффициента вывода тока электронного пучка от ускоряющего напряжения.

веденного электронного пучка и его коэффициент вывода [4].

Конструктивной особенностью рассматриваемого ускорителя является возможность его работы с электронно-оптической системой как триодного, так и тетродного типа. Реализация тетродной э.о.с. предусмотрена в конструкции и обеспечивается введением еще одного сеточного электрода, который может быть установлен между плоскостью термоэмиттеров и плоскостью сетки в триоде.

Конструктивная схема ускорителя представлена на рис. 1. В вакуумной камере 1 ускорителя на проходном высоковольтном изоляторе 2 установлен катодно-сеточный блок 3. Последний содержит плоский тепловой экран 4, ряд прямонакальных эмиттеров 5 из вольфрамового сплава, размещенных с определенным шагом, и сетку 6 в виде параллельных стержней из вольфрама диаметром 3 мм, расположенных с шагом 9 мм. Элементы катодного блока заключены в электростатический

экран 7. С целью уменьшения тепловых деформаций при работе ускорителя конструкция катодного блока выполнена секционированной.

Анодом ускорителя является выводное окно сечением 50×40 см², состоящее из опорной решетки 8 и фольги 9 из алюминиевого сплава толщиной 30 мкм. Охлаждаемая опорная решетка выполнена из закаленной хромистой бронзы, перфорирована щелевыми отверстиями, причем оси щелей перпендикулярны осям эмиттеров и стержней сетки [4]. Опорная решетка имеет геометрическую прозрачность 64%. Окно рассчитано на вывод электронного пучка с плотностью тока до 100 мкА/см².

Вакуумная система ускорителя обеспечивает рабочее давление в вакуумной камере ускорителя в диапазоне $3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$ Па и выполнена на основе двух диффузионных агрегатов НД-400 с быстрой откачки каждого до 7000 л/с при давлении не хуже $4 \cdot 10^{-4}$ Па. В качестве рабочей жидкости в насосах используется ненасыщенный полифениловый эфир с высокой антиокислительной способностью и низким давлением насыщенных паров.

Насосы снабжены водоохлаждаемыми ловушками лабиринтного типа и установлены на общий вакуумпровод диаметром $D_y = 400$ мм, соединенный с вакуумной камерой ускорителя через шибер 23ВЭ-400. Конструкция вакуумной системы обеспечивает эффективную быстроту откачки не менее 1080 л/с на срезе фланца вакуумной камеры. В качестве средств форвакуумной откачки использованы два насоса 2НВР-60Д. Такая вакуумная система выбрана из соображений экономичности при высокой производительности, простоты и надежности, устойчивости при возможных аварийных нарушениях вакуума (например, прорывах фольги).

Система высоковольтного питания на основе промышленного трансформатора ИОМ-100/100 с выпрямителем, собранным по схеме удвоения, обеспечивает выходное напряжение до 200 кВ при токе до 0.36 А. Питание накала эмиттеров и питание сетки осуществляются от генератора напряжения с частотой 400 Гц через соответствующие разделительные трансформаторы, установленные в отдельном, заполненном маслом баке. Связь между элементами высоковольтной системы питания и ускорителем осуществляется с помощью высоковольтных кабелей на напряжение до 300 кВ типа КПВ-1/300 и КПВ-7/300.

Накал термоэмиттеров обеспечивается постоянным током, ток в двух соседних нитях протекает во встречных направлениях, что снижает влияние магнитного поля тока накала на угловые характеристики электронного пучка, падающего на опорную решетку [4].

Предварительный расчет параметров электронно-оптической системы как для триодного,

так и для тетродного вариантов проводился в соответствии с методикой, изложенной в [5]. В триодном варианте геометрия управляющей сетки выбрана таким образом, чтобы при достаточной электрической прочности ускоряющего промежутка сетка–анод обеспечить управление током ускорителя в области отрицательных сеточных потенциалов для исключения потерь тока на сетке.

При исследовании ускорителя снимались анодные и анодно-сеточные вольт-амперные характеристики: зависимость тока, падающего на опорную решетку (тока нагрузки I_a), от ускоряющего напряжения U_a при фиксированном сеточном потенциале и зависимость тока нагрузки от сеточного потенциала при фиксированном значении U_a . На рис. 2 представлен пример анодной вольт-амперной характеристики.

Необходимо отметить следующее. Для предотвращения аварийных разрушений в катодно-сеточном блоке при возможных высоковольтных пробоях в ускорителе применена схема его включения с общей сеткой. В этом случае эффективный потенциал сетки $U_{сэфф}$ определяется алгебраической суммой значений напряжения уставки U_c и отрицательного напряжения автоматического смещения $U_{смеш}$, равного падению напряжения на выходном резисторе сеточного источника при протекании по нему тока нагрузки [5]. Прямые измерения сеточных потенциалов нами не проводились. Для определения U_c использовались результаты предварительной калибровки тракта сеточного питания по измеряемому значению переменного напряжения на входе сеточного разделительного трансформатора $U_{с-}$.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента вывода электронного пучка от ускоряющего напряжения, характеризующая эффективность ускорителя. Коэффициент вывода определялся как отношение тока электронного пучка, выведенного из ускорителя, к току нагрузки I_a . Измерение тока нагрузки осуществлялось с помощью датчика тока в земляной цепи высоковольтного выпрямителя, измерение тока выведенного пучка – методом полного перекрытия пучка алюминиевым коллектором, установленным на расстоянии 30 мм от фольги и заземленным через шунт. При этом измеряемый потенциал коллектора не превышал 0.3 В. Коэффициент вывода электронного пучка составил 46% при $U_a = 185$ кВ, что можно считать весьма удовлетворительным для ускорителей данного класса.

На рис. 4 представлена зависимость средней плотности тока электронного пучка от ускоряющего напряжения. Средняя плотность тока пучка определялась как отношение тока электронного пучка, выведенного из ускорителя, к площади апертуры выводного окна. На расстоянии 30 мм от фольги получены значения средней плотности

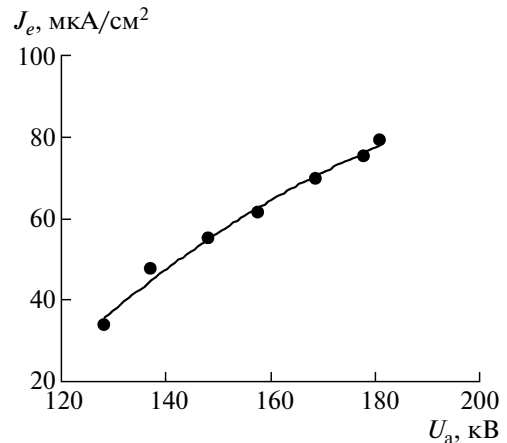


Рис. 4. Зависимость средней плотности тока электронного пучка от ускоряющего напряжения. $I_a = 350$ мА.

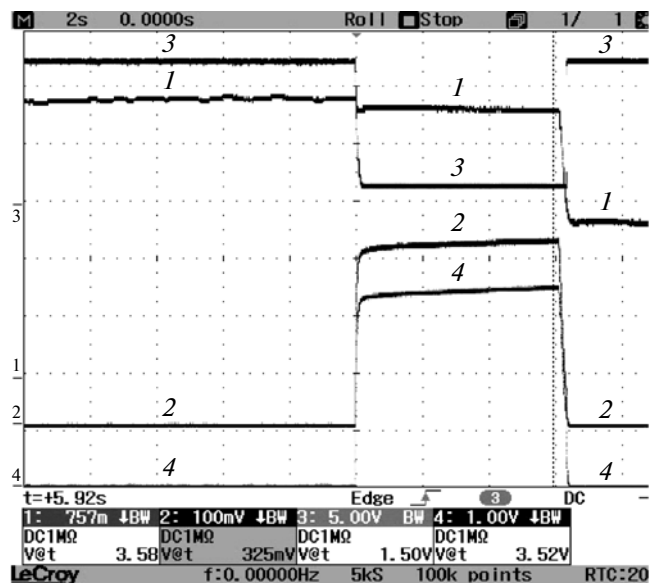


Рис. 5. Осциллограмма пуска ускорителя. 1 – ускоряющее напряжение U_a (масштаб по вертикали 40 кВ/деление); 2 – ток с коллектора электронов $I_{пуч}$ (50 мА/деление), коллектор в 30 мм от фольги; 3 – сеточное напряжение U_c (–200 В/деление); 4 – ток нагрузки I_a (100 мА/деление). Масштаб по горизонтали – 2 с/деление.

тока электронного пучка $J_e = 80$ мкА/см² при $U_a = 185$ кВ и $I_a = 350$ мА. В центральной части апертуры пучка на площади $\geq 20 \times 45$ см² средняя плотность тока составила 100 мкА/см² при $U_a = 185$ кВ. Замеченное нами снижение плотности тока на периферии апертуры объяснено ниже.

На рис. 5 приведена характерная осциллограмма одного из пусков ускорителя длительностью 6 с. Осциллограмма демонстрирует временное поведение параметров ускорителя: ускоряющего

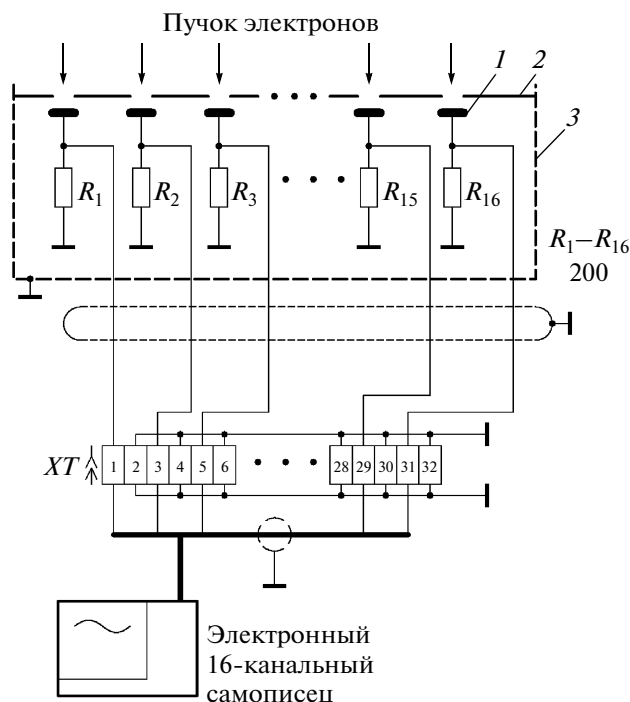


Рис. 6. Схема измерения распределения плотности тока электронного пучка. 1 – коллектор; 2 – маска; 3 – экран.

напряжения U_a , тока пучка $I_{\text{пуч}}$, сеточного напряжения U_c и тока нагрузки I_a .

Небольшое нарастание токовых параметров в пуске обусловлено повышением давления в вакуумной камере, которое затем стабилизируется. Выходное напряжение высоковольтного источника питания стабилизировано с помощью тиристорного стабилизатора с фазоимпульсным управлением. Небольшой спад ускоряющего напряжения в течение ~ 0.2 с в начале работы ускорителя связан с конечным временем выхода системы стабилизации на режим.

Измерение распределения плотности тока выведенного из ускорителя пучка электронов проводилось с помощью измерительной линейки, состоящей из расположенных последовательно с шагом 33 мм шестнадцати плоских коллекторов в виде пластинок из Al размером 40×15 мм. Каждый коллектор заземлялся через измерительный резистор сопротивлением 200 Ом. Точность всех резисторов не хуже $\pm 0.5\%$. Линейка закрыта маской, предотвращающей попадание электронов на изоляторы крепления коллекторов. Маска выполнена из нержавеющей стали толщиной 1 мм и имеет прямоугольные отверстия 38×14 мм напротив каждого коллектора. Расстояние между коллекторами и маской 1 мм. Сигналы с 16 измерительных резисторов подавались на электронный самописец. Схема измерения распределения плот-

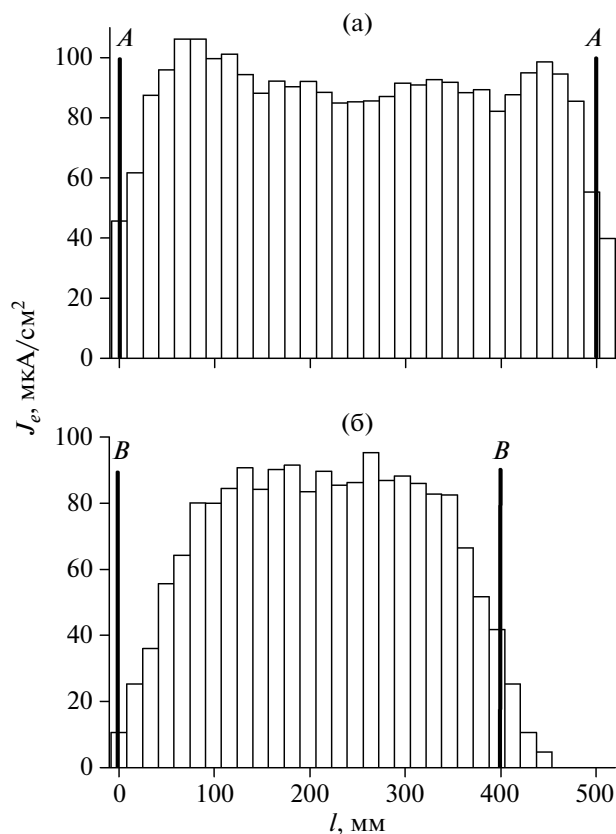


Рис. 7. Распределение плотности тока электронного пучка вдоль оси выводного устройства: а – параллельной его длинной стороне (поперек катодов), б – короткой стороне (вдоль катодов). $U_a = 185$ кВ, $I_a = 335$ мА (А–А, В–В – апертуры выводного окна).

ности тока по сечению выведенного из ускорителя электронного пучка представлена на рис. 6.

На рис. 7 представлены результаты, полученные при снятии распределения вдоль осей выводного устройства ускорителя, параллельных его длинной и короткой сторонам. Пучок выводился в атмосферу, коллекторы установлены на расстоянии 30 мм от фольги.

Анализ рис. 7 показывает, что ширина выведенного пучка вдоль короткой стороны выводного устройства (вдоль нитей термоэмиттеров) заметно меньше 400 мм (см. рис. 7б), тогда как вдоль длинной стороны (рис. 7а) – близка к 500 мм. Это можно объяснить следующим. В ускорителе с триодной э.о.с. вытягивание тока электронов обеспечивается полем анода, провисающим сквозь управляющую сетку, на краях апертуры катодно-сеточного блока провисание электрического поля слабее. Краевой эффект от длинной стороны апертуры экрана катодно-сеточного блока (вдоль термоэмиттеров) более заметен, так как потенциальные условия извлечения эмиссионного тока с катода не одинаковы по длине эмиттера.

Исключить влияние данного эффекта можно, например, либо увеличением короткого размера апертуры в высоковольтном экране катодно-сеточного блока с соответствующим увеличением длины стержней сетки и эмиттеров, либо использованием тетродной электронно-оптической системы с двумя сетками в катодном блоке. В тетроде отбор тока с катодов обеспечивается не за счет провисания поля анода, а за счет потенциала первой сетки. Такое техническое решение подтверждено нами экспериментально [5] и конструктивно предусмотрено в рассматриваемом ускорителе.

Таким образом, представлен широкоапертурный ускоритель электронов на основе ряда протяженных проволочных термоэмиттеров с выводом электронного пучка с высокой плотностью тока. Ускоритель содержит триодную электронно-оптическую систему с управлением в области отрицательных сеточных потенциалов. Ускоритель устойчиво работает при средней плотности тока электронного пучка на расстоянии 30 мм от фольги 80 мкА/см^2 при ускоряющем напряжении 185 кВ

и коэффициенте вывода пучка 46%. При этом максимальное значение плотности тока электронного пучка на площади не менее $20 \times 45 \text{ см}^2$ (45% от общей площади выводного окна) составляет 100 мкА/см^2 , а неоднородность распределения плотности тока электронного пучка не превышает 10%.

В ускорителе конструктивно предусмотрена возможность установки тетродной электронно-оптической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 112.
2. Аброян М.А., Богомазов П.М., Зверев С.Ф. и др. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 28.
3. Аброян М.А., Богомазов П.М., Желтов В.А. и др. // ВАНТ. Сер. "Электрофизическая аппаратура". Л.: Энергоатомиздат, 1989. Вып. 24. С. 48.
4. Аброян М.А., Зуев Ю.В., Косогоров С.Л. и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 98.
5. Косогоров С.Л. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 115.