

УДК 537.533.9, 537.533.2

*М.С. ВОРОБЬЁВ\**, *Н.Н. КОВАЛЬ\*\*\**, *С.А. СУЛАКШИН\**, *В.В. ШУГУРОВ\****УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ С МНОГОАПЕРТУРНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ<sup>1</sup>**

Исследуются эмиссионные свойства многоапертурного плазменного катода с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы и вывод генерируемого электронного пучка из высоковольтного диодного ускоряющего промежутка в атмосферу через тонкую фольгу. На эмиссионную сетку с габаритными размерами 750×150 мм уложена маска из нержавеющей фольги. В маске выполнено такое же количество отверстий, как в опорной структуре выпускного фольгового окна, но несколько меньшего диаметра. Эти отверстия являются дискретными эмиссионными структурами плазменного эмиттера. Под действием постоянного ускоряющего напряжения, приложенного между эмиттером и анодом, роль которого выполняет выпускное фольговое окно ускорителя, с площади этих эмиссионных структур осуществляется эмиссия электронов. Юстировка отверстий в маске эмиссионной структуры и опорной решетке выпускного окна с достижением соосной плоскопараллельной геометрии ускоряющего промежутка позволяет минимизировать потери пучка в опорной решетке выпускного фольгового окна. Таким образом, электронный пучок представляет суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой. В экспериментах при ускоряющем напряжении 180 кВ, токе эмиссии 15 А и длительности импульсов 35 мкс в атмосферу было выведено около 70 % эмиссионного тока. Такой механизм извлечения, транспортировки и вывода электронного пучка не только повышает КПД ускорителя, уменьшая потери пучка в опорной решетке выпускного фольгового окна, но и позволяет увеличить среднюю мощность выведенного электронного пучка.

**Ключевые слова:** плазменный эмиттер, извлечение электронов, ускоритель электронов, электронный пучок, выпускное фольговое окно, потери пучка.

**Введение**

Ускорители электронов вне зависимости от типа применяемого катода находят широкое применение в промышленности, медицине, защите окружающей среды, переработке сельскохозяйственной продукции и т.д. На сегодняшний день существуют и активно реализуются технологии радиационного отверждения лаковых покрытий [1], обработки сточных вод от загрязнений [2], в плазмохимических процессах, инициируемых электронным пучком [3], радиационной стерилизации объектов медицинского назначения [4], накачки газовых лазеров [5]. В работе [6] описаны ускорители электронов, ориентированные на использование как в промышленных, так и в научных целях.

При рассмотрении широкоапертурных ускорителей электронов как непрерывного, так и импульсно-периодического действия, вывод пучка в атмосферу в которых осуществляется через выпускное фольговое окно, обязательно встает вопрос об эффективности вывода пучка и минимизации его потерь как в самой фольге, так и в опорной структуре выпускного фольгового окна, геометрическая прозрачность которого всегда много меньше 100 %. Так, например, в работе [7] исследуется влияние электронно-оптических факторов на коэффициент вывода пучка в системах, где формирование пучка большого сечения предполагает суперпозицию элементарных пучков, которые эмитируются отдельными катодными нитями и, перемешиваясь, создают общий поток электронов с характерным разбросом по поперечным скоростям. Сложность такой конструкции, многосеточное управление и введение дополнительных электродов для управления током пучка в таких ускорителях приводит к тому, что основной вклад в угловую расходимость (более 75 %) вносит экранирующая сетка. Примерно 20 % (с учетом последующего ускорения) дает катод. Оставшиеся менее 5 % приходятся на управляющую сетку. В итоге в экспериментах при ускоряющем напряжении 200 кВ достигнут максимальный коэффициент вывода тока из вакуумного ускоряющего промежутка в атмосферу  $\beta$  близкий 0.5 [8], равный отношению тока за фольговым выпускным окном  $I_b$  к току эмиссии  $I_e$  ( $\beta = I_b/I_e$ ). При этом для достижения возможности независимой регулировки тока пучка от величины ускоряющего напряжения и высокой равномерности тока пучка по его сечению до значений  $\pm 10$  % необходимо модернизировать электронно-оптическую

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 14-08-00997 и программы Президиума РАН №12 проект 8.

систему до тетродного типа [9], что также усложняет как конструкцию ускорителя, так и схемы его электропитания.

Использование ускорителей на основе вторичной ионно-электронной эмиссии с системой отверстий в опорной решетке и системы формирования ионов для бомбардировки катода [10] позволяет существенно уменьшить потери тока пучка на стенках опорной решетки, но ускоритель такого типа обладает недостатками, связанными со сложностью управления током пучка, зависимостью его от величины ускоряющего напряжения и низкой прочностью высоковольтного ускоряющего промежутка из-за напуска рабочего газа, необходимого для зажигания и горения вспомогательного разряда. Максимальный коэффициент вывода пучка через алюминиевую фольгу толщиной 30 мкм на ускорителе такого типа при ускоряющем напряжении 150 кВ составил 0.55, что можно объяснить как потерями в фольге, так и потерями в газонаполненном промежутке вспомогательного разряда.

Ускорители с катодами на основе взрывной электронной эмиссии при использовании выпускного фольгового окна обладают относительно низким коэффициентом вывода пучка  $\beta$ , поскольку потери тока пучка происходят как в фольге (максимально на фронте и спаде импульса ускоряющего напряжения, минимально на его плоской вершине), так и обратно пропорционально геометрической прозрачности опорной структуры. Кроме того, существуют значительные потери в каналах опорной решетки под действием угловой расходимости электронного пучка. Большая угловая расходимость в этом случае связана с тем, что граница эмиссии движется со скоростью, уменьшающейся во времени, и достигает величины меньшей скорости разлета частиц плазмы от катодного факела. Так, формирующиеся слои плазмы от вторичных эктонов могут догонять границу эмиссии, что объясняет колебания концентрации плазмы на границе эмиссии, приводящие к изменению скорости движения границы плазмы. В итоге это приводит к превращению диода в триод с сеткой – плазменным сгустком и впрыскиванию электронов в вакуумную область с относительно большой начальной скоростью [11]. Кроме того, в сильноточных ускорителях электронов важную роль играет собственное магнитное поле пучка, искажающее траектории ускоренных электронов.

Рассматриваемые в настоящей работе ускорители с плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы позволяют формировать электронные пучки с заранее прогнозируемой структурой, а также обладают большим сроком службы, нечувствительностью к вакуумным условиям, независимостью параметров пучка друг от друга и удовлетворительной однородностью распределения плотности тока по сечению пучка.

### Экспериментальная аппаратура и методики измерений

Измерения коэффициента вывода тока из вакуумного ускоряющего промежутка в атмосферу  $\beta$  проводились на импульсном ускорителе электронов «ДУЭТ» с сеточным плазменным катодом (рис. 1) [12], основные параметры которого сведены в таблицу.

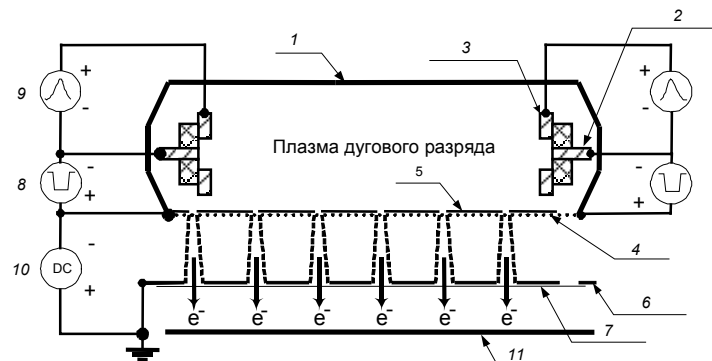


Рис. 1. Схема ускорителя электронов с сеточным плазменным эмиттером: 1 – полный анод, 2 – катод, 3 – поджигающий электрод, 4 – эмиссионная сетка, 5 – маска; 6 – опорная решетка, 7 – выпускная фольга, 8 – источник питания разряда, 9 – источник питания поджига, 10 – источник высокого напряжения, 11 – коллектор

Плазменный эмиттер представляет собой полый полуцилиндр из нержавеющей стали, на торцах которого закреплены два катодных узла на основе дуги низкого давления с иницированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика. Внутренняя поверхность полуцилиндра с размерами  $200 \times 150 \times 800$  мм играет роль общего полого анода 1 для двух источников плазмы. На эмиссионную сетку 4 с габаритными размерами  $750 \times 150$  мм уложена маска 5 из нержавеющей стали толщиной 200 мкм. Маска разделяет эмиссионную поверхность на 344 ячейки диаметром 12 мм, которые являются эмиссионными структурами плазменного эмиттера. Под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до 200 кВ, приложенного между эмиттером и выпускным фольговым окном ускорителя, с площади эмиссионной плазменной поверхности этих эмиссионных структур осуществляется отбор электронов. В опорной решетке 6 с общей геометрической прозрачностью 56 % имеется такое же количество отверстий, как и в маске эмиссионной структуры, но большего диаметра равного 15 мм. Юстировка отверстий в маске эмиссионной структуры и опорной решетке с достижением соосной плоскопараллельной геометрии ускоряющего промежутка позволяет минимизировать потери пучка в опорной решетке. Таким образом, широкий электронный пучок представляет суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой. Выпускное фольговое окно перекрыто фольгой 7 из алюминий-магниевого сплава АМг-2н толщиной 30 мкм. Измерения тока пучка, выведенного из ускоряющего промежутка в атмосферу, фиксировались коллектором 11 размером  $800 \times 200$  мм, который устанавливался на расстоянии 10 мм от выпускной фольги и был покрыт полиимидной пленкой толщиной 40 мкм для фиксации электронов, отраженных от коллектора, но неспособных в этом случае замкнуться по другой электрической цепи кроме коллектора.

Энергия электронов, кэВ	до 200
Ток эмиссии, А	5 – 100
Длительность импульса, мкс	35
Частота следования импульсов, Гц	до 50
Размеры пучка, мм	$750 \times 150$
Неоднородность плотности тока по сечению пучка, %	$\pm 15$

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 (кривая 1) представлена зависимость коэффициента вывода тока пучка  $\beta$  из ускоряющего промежутка в атмосферу без установленной в эмиттер маски, из которой видно, что по мере роста ускоряющего напряжения происходит увеличение коэффициента  $\beta$ .

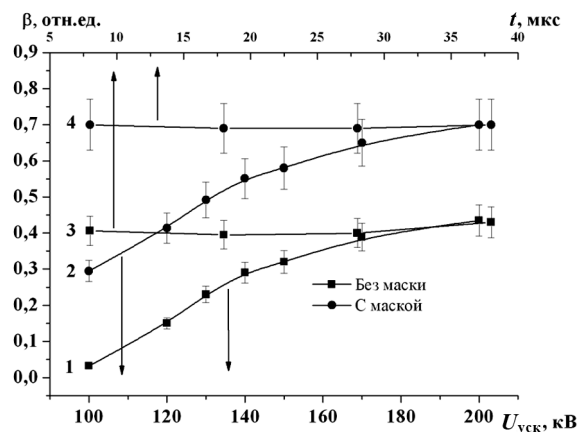


Рис. 2. Зависимости коэффициента вывода пучка  $\beta$  от величины ускоряющего напряжения и момента фиксации коэффициента  $\beta$  по длительности импульса

Сравнивая результаты эксперимента с данными, полученными в [13], можно определить, что в нашем случае увеличение коэффициента  $\beta$  происходит только за счет увеличения прозрачности фольги при увеличении энергии электронов. Таким образом, потери тока в опорной структуре выпускного фольгового окна практически не зависят от величины ускоряющего напряжения, что можно объяснить низкой начальной энергией (температурой) электронов, извлекаемых из плазменного эмиттера и малой угловой расходимостью сформированного электронного пучка. Слабая

зависимость коэффициента  $\beta$  от момента его фиксации по длительности импульса (рис. 2, кривая 3) подтверждает стабильность работы ускорителя во всем временном диапазоне импульса тока пучка, даже при допущении изменений параметров эмиссионной плазмы во времени. Измеренная неравномерность плотности тока по сечению пучка в этом случае составляла  $\pm 15\%$  от среднего значения.

В экспериментах по минимизации потерь в опорной структуре выпускного фольгового окна с установленной в эмиттер маской были получены зависимости, представленные на рис. 2 (кривые 2, 4). В этом случае потери тока в опорной структуре выпускного фольгового окна были уменьшены в 2 раза, что позволило при ускоряющем напряжении 180 кВ повысить среднюю выходную мощность ускорителя с 1.1 до 2.5 кВт при коэффициенте  $\beta \approx 0.7$ . Дальнейшее увеличение мощности было ограничено схемами электропитания плазменного эмиттера. При этом распределение плотности тока по сечению пучка осталось тем же, что и в отсутствие маски ( $\pm 15\%$ ). Сложностью юстировки и неидеальностью изготовления деталей ускорителя электронов можно объяснить оставшиеся потери тока электронного пучка в опорной структуре выпускного фольгового окна.

### Заключение

Проведенные исследования показывают, что простота реализации предложенного способа минимизации, а при точной юстировке и исключения потерь тока пучка на опорной структуре выпускного фольгового окна позволяет существенно повысить КПД ускорителя, увеличить надежность его работы с сохранением всех его основных преимуществ, а именно высокой равномерности плотности тока по сечению пучка, независимости основных параметров пучка (энергии, тока, длительности, частоты следования импульсов) друг от друга и возможности их варьирования в широких пределах, моноэнергетичности пучка, высокой частоты повторения импульсов тока пучка и слабой зависимости параметров пучка от вакуумных условий. Это открывает новые возможности использования ускорителей электронов такого типа как в научных, так и технологических целях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллин Э. Н., Чмух В. Н. // Химия высоких энергий. – 1979. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 181–182.
2. Хенце М. // Очистка сточных вод. – М: Мир, 2004. – 471 с.
3. Пушкарев А. И., Ремнев Г. Е., Власов В. А., Сосновский С. А., Ежов В. В. // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 59–62.
4. Ростов В. В., Алексеенко П. И., Выходцев П. В., Штейнле А. В., Мазин В. И., Красноженов Е. П., Муштоватова Л. С., Солодкова Т. В., Постников П. С., Кутанова К. В., Штейнле Л. А. // Сибирский медицинский журнал. – 2012. – Т. 27. – № 1. – С. 141–146.
5. Аброян М. А., Акулов В. В., Богомазов П. М., Косогоров С. Л., Манукян Г. Ш., Мотовилов С. А., Шведюк В. Я., Шапиро В. Б. // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 23. – № 8. – С. 751–752.
6. Соковнин С. Ю. // Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 224 с.
7. Аброян М. А., Зуев Ю. В., Косогоров С. Л., Шведюк В. Я. // ЖТФ. – 2003. – Т. 73. – Вып. 8. – С. 98–104.
8. Аброян М. А., Трубников Г. И. // ЖТФ. – 1989. – Т. 59. – Вып. 2. – С. 129–134.
9. Косогоров С. Л. // ЖТФ. – 2011. – Т. 81. – Вып. 7. – С. 115–119.
10. Аброян М. А., Успенский Н. А., Федяков В. П. // ПТЭ. – 1984. – № 4. – С. 24–26.
11. Месяц Г. А. // Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
12. Koval N. N., Kreindel Yu. E., Tolkachev V. S., Schanin P. M. // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1985. – V. EI-20. – P. 735–737.
13. Seltser S. M., Berger M. J. // Nucl. Instrum. and Methods. – 1974. – V. 119. – P. 157–179.

\*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

E-mail: vorobyovms@yandex.ru

Воробьев Максим Сергеевич, мл. науч. сотр.;

Коваль Николай Николаевич, д.т.н., зав. лабораторией ИСЭ СО РАН, профессор НИТГУ;

Сулакшин Степан Александрович, ведущ. инженер;

Шугуров Владимир Викторович, мл. науч. сотр.

M.S. VOROBYOV, N.N. KOVAL, S.A. SULAKSHIN, V.V. SHUGUROV

## ELECTRON ACCELERATOR WITH A MULTI-APERTURED PLASMA EMITTER

Emission properties of a multi-aperture plasma cathode and electron beam output from high- accelerating gap into the atmosphere are investigated. Electron-emitting plasma is generated by low pressure arc discharge in the anode chamber with dimensions  $200 \times 150 \times 800$  mm, one side of which is blocked by a fine-wire grid. Special stainless foil mask is located on this grid. Mask separates emission surface 344 of the cell 12 mm in diameter, which are emission structures of the plasma emitter. Under a constant accelerating voltage applied between the emitter and the anode, which performs the role of the foil support grid exit window of the accelerator, with an area of these emission structures takes electron emission. In the support grid has the same number of holes as an emission structure mask, but the larger diameter of 15 mm. Holes alignment in the emission structure mask and support grid with a plane-parallel coaxial geometry achievement accelerating gap allows to minimize a beam losses on the support grid. Thus, the electron beam total section  $750 \times 150$  mm is a superposition of elementary beams formed by separate emission structures, the plasma boundary is stabilized fine-metal mesh. In experiments with an accelerating voltage of 180 kV and an emission current of 15 A and a pulse duration of 35  $\mu$ s into the atmosphere was extracted 70 % emission current. Such a mechanism for extraction and transportation of the electron beam, not only increases the accelerator efficiency, reducing the loss of the beam on the support grid of the output foil window, but also increases the average power of the outputted electron beam, which reaches 2.5 kW in the experiments. Further increase of the average beam power was limited power supplies.

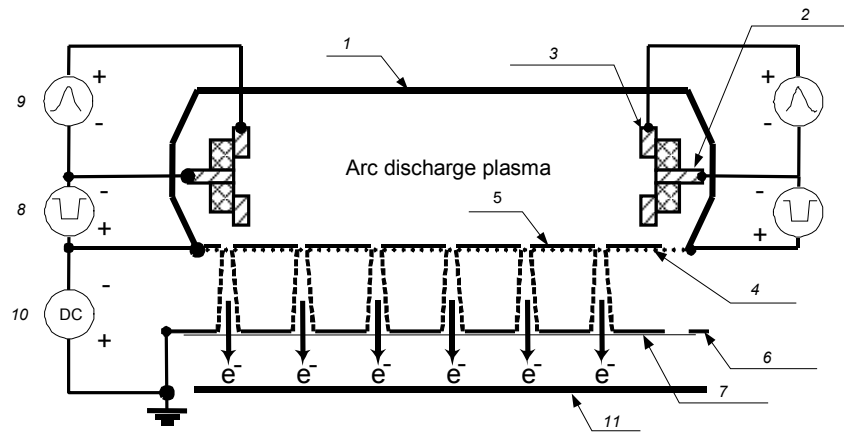


Fig. 1. Scheme of electron accelerator with grid-plasma emitter: 1 - hollow anode, 2 - cathode, 3 - igniter, 4-emission grid, 5 - mask; 6 - support grid, 7 - output foil, 8-discharge power supply, 9-ignition power supply, 10 - high voltage source, 11 - collector.

**Keywords:** plasma emitter, electron extracting, electron accelerator, electron beam output foil window, beam losses.

## REFERENCES

1. Abdullin E.N., Chmuh V.N. (1979). *High Energy Chemistry*, 13(2), 181–182.
2. Henze M. *Wastewater*. Moscow, Mir, 2004, 471 p.
3. Pushkarev A.I., Remnev G.E., Vlasov V.A., Sosnowskii S.A., Ezhov V.V. (2004). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 307(6), 59–62.
4. Rostov V.V., Alexeenko P.I., Vychodtsev P.V., Shteynle A.V., Mazin V.I., Krasnozhenov E.P., Mushtovatova L.S., Solodkova T.V., Postnikov P.S., Kutonova K.V., Shteynle L.A. (2012). *Siberian Medical Journal*, 27(1), 141–146.
5. Abroyan M.A., Akulov V.V., Bogomazov P.M., Kosogorov S.L., Manukyan G.Sh., Motovilov S.A., Shvedyuk V.Ya., Shapiro V.B. (1996). *Quantum Electronics*, 23(8), 751–752.
6. Sokovnin S.Y. *Nanosecond electron accelerators and radiation technologies based on them*. Ekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2007, 224 p.
7. Abroyan M.A., Zuev Y.V., Kosogorov S.L., Shvedyuk V.Ya. (2003). *Zh.*, 73(8), 98–104.
8. Abroyan M.A., Trubnikov G.I. (1989). *Zh.*, 59(2), 129–134.
9. Kosogorov S.L. (2011). *Zh.*, 81(7), 115–119.
10. Abroyan M.A., Uspenskii N.A., Fedyakov V.P. (1984). *PTE*, (4), 24–26.
11. Mesyats G.A. *Pulsed Power and Electronics*. M., Nauka, 2004, 704 p.
12. Koval N.N., Kreindel Yu.E., Tolkachev V.S., Schanin P.M. (1985). *IEEE Trans. Electr. Insul.*, (EI-20), 735–737.
13. Seltser S.M., Berger M.J. (1974). *Nucl. Instrum. and Methods*, (119), 157–179.