Энергетический спектр электронного пучка большого сечения, генерируемый в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом

М.С. Воробьев, Е.Х. Бакшт, Н.Н. Коваль, В.Ф. Тарасенко, С.Ю. Дорошкевич

ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН

634055 Россия, Томск

e-mail: vorobyovms@yandex.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-106-113

Используя преимущество большинства источников электронов с сеточной (слоевой) стабилизацией границы эмиссионной (катодной) плазмы, связанного с возможностью слабо зависимого изменения параметров генерируемого электронного пучка друг от друга (энергии электронов, амплитуды тока пучка, длительности и частоты следования импульсов) в ускорителе электронов с таким широкоапертурным (750×150 мм) катодом продемонстрирована принципиальная возможность прогнозирования энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу через тонкую металлическую фольгу. Энергетические спектры, полученные при разных ускоряющих напряжениях (110–160 кэВ), восстанавливались методом регуляризации Тихонова при минимальных априорных предположениях с использованием экспериментально полученных кривых ослабления электронного пучка при его прохождении через тонкие металлические фольги. Показано, что в условиях эксперимента форма энергетического спектра слабо зависит от рабочего давления газа в ускоряющем зазоре ускорителя, а расширение спектра, прежде всего, связано с рассеянием пучка в выводной фольге и воздухе атмосферного давления. Показано, что контролируемое изменение ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка, выведенного в атмосферу, приводит к прогнозируемому расширению его энергетического спектра и смещению его максимума в область меньших энергий, что, прежде всего, может быть полезно для конкретных применений таких ускорителей как в научных, так и технологических целях.

Введение

Перспективность использования ускорителей электронов с выводом генерируемого пучка в атмосферу уже неоднократно продемонстрирована [1–3], что позволяет смело утверждать о перспективности дальнейшего развития этого направления.

Особые научную и технологическую ниши занимают ускорители, энергии пучка в которых не превышают 500 кэВ. Для вывода пучка в атмосферу в таких ускорителях чаще всего используется тонкая металлическая фольга. В ряде работ показано [4, 5], что при прохождении пучка через фольгу и слой воздуха атмосферного давления происходит расширение энергетического спектра электронного пучка. При этом широкий энергетический спектр пучка в

атмосфере может быть полезен в ряде применений, например, таких как полимеризация лаковых покрытий [6, 7]. В работе [7] было показано, что в этом направлении большую технологическую эффективность имеют ускорители электронов, способные обеспечивать импульсно-периодический характер воздействия пучка на объект, что приводит к снижению ингибирующего эффекта кислорода воздуха в отличие от ускорителей непрерывного действия, а широкий спектр электронного пучка в этом случае позволяет проводить более эффективную модификацию (полимеризацию) поверхностного слоя за счет различной глубины проникновения ускоренных электронов пучка вглубь лакового покрытия. При этом в работах [6, 7] использовался ускоритель электронов с взрывоэмиссионным

катодом [8], принцип действия которого обеспечивает наиболее широкий спектр генерируемого электронного пучка в отличие от ускорителей с другими типами катодов, поскольку форма импульса ускоряющего напряжения в таких ускорителях чаще всего имеет сложную форму (иногда даже с отсутствием плоской вершины у импульса ускоряющего напряжения), сильно зависящую от паразитных параметров электрического контура, что, кроме этого, приводит к появлению в ускоряющем зазоре электронов, энергии которых недостаточно для преодоления выводной фольги, и, соответственно, к нагреву последней [9, 10]. Кроме этого, поскольку форма импульса ускоряющего напряжения в таких ускорителях зависит от нагрузки, являющейся в данном случае очень нестабильной, данное явление сопровождается соответствующим изменением энергетического спектра пучка от импульса к импульсу.

Контролируемое изменение ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка может осуществляться при использовании импульсно-периодических ускорителей электронов с сетчатым плазменным катодом [11–14], генерация пучка в которых осуществляется путем зажигания и горения в электродной системе плазменного катода какого-либо разряда, в котором осуществляется генерация объемной эмиссионной плазмы, граница которой стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой, через ячейки которой осуществляется отбор электронов из эмиссионной плазмы. Форма импульса тока пучка в таких ускорителях определяется импульсом тока разряда, форма которого чаще всего имеет квазипрямоугольную форму. Для поддержания постоянного ускоряющего напряжения в таких ускорителях используются высоко-

вольтные конденсаторные батареи, емкость которых стараются выбрать такой, чтобы при максимальном произведении тока пучка на длительность его импульса ($I_0 \cdot t$) снижение напряжения на конденсаторной батарее не превышало (5–10)%, что прежде всего позволяет снизить тепловую нагрузку на выводную фольгу, а широкий энергетический спектр электронного пучка получается в результате взаимодействия электронного пучка с выводной фольгой и слоем воздуха атмосферного давления. Однако, поскольку изменение ускоряющего напряжения ΔU в течение импульса t зависит только от емкости высоковольтной конденсаторной батареи и суммарного заряда, который был из нее забран:

$$\Delta U = \frac{I_0 \cdot t}{C} = \frac{q}{C}, \quad (1.1)$$

это позволяет осуществлять контролируемое изменение величины ΔU в течение импульса путем подбора соответствующей емкости конденсаторной батареи при известном произведении ($I_0 \cdot t$).

Именно поэтому целью настоящей работы являлось измерение суммарного энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, используя широкоапертурный ускоритель электронов с сетчатым плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, с учетом изменения ускоряющего напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее в течение импульса тока пучка.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде [15], упрощенная схема которого представлена на рис. 1. Данный ускоритель электронов позволяет

формировать электронный пучок сечением $750 \times 150 \text{ мм}^2$ в импульсно-

периодическом режиме с параметрами, представленными в таблице 1.

Рис. 1. Схема источника электронов с сеточным плазменным эмиттером: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – маска; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка выпускного фольгового окна; 9 – выпускная фольга; 10 – источник питания разряда; 11 – источник питания поджига; 12 – источник высокого напряжения (конденсаторная батарея); 13 – фольговый фильтр; 14 – набор алюминиевых фольг; 15 – коллектор

Таблица 1.

Энергия электронов, кэВ	(100÷200)
Амплитуда тока пучка (в атмосфере), А	(5÷30)
Длительность импульсов тока пучка, мкс	(10÷100)
Частота следования импульсов, с^{-1}	(1÷50)
Размеры пучка, мм	750×150
Неоднородность плотности тока по сечению пучка,	± 10
Максимальная мощность пучка (в атмосфере), кВт	4

Плазменный катод 2 (рис. 1) в таком ускорителе представляет собой полый полуцилиндр из нержавеющей стали, на торцах которого закреплены два катодных узла на основе дуги низкого давления с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе между полым катодом 4 и поджигающим электродом 3 [16]. Внутренняя поверхность полуцилиндра играет роль общего полого анода 7 для двух катодных узлов. На эмиссионную сетку с габаритными размерами $(750 \times 150) \text{ мм}$ уложена маска 6 из нержавеющей стали толщиной 200 мкм. Маска разделяет эмиссионную

поверхность на 344 ячейки $\varnothing 12 \text{ мм}$, которые являются отдельными эмиссионными структурами плазменного катода. Полый анод электрически соединен с эмиссионной сеткой через сопротивление $R=10 \text{ Ом}$, что необходимо для переключения тока разряда в область эмиссионной сетки. Под действием постоянного ускоряющего напряжения U_0 величиной до 200 кВ, приложенного между катодом и выпускным фольговым окном ускорителя, с плазменной поверхности этих эмиссионных структур осуществляется отбор электронов. Выпускное фольговое окно

состоит из медной опорной решетки 8 толщиной 20 мм и выводной фольги 9 из алюминий-магниевого сплава АМг-2н толщиной 30 мкм, использование которой позволяет выводить через нее электроны при $U_0 \geq 80$ кВ [17]. В опорной решетке с общей геометрической прозрачностью 56% имеется такое же количество отверстий, как и в маске 6, но несколько большего диаметра, равного $\varnothing 15$ мм. Так, широкий электронный пучок представляет собой суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована мелко-структурной металлической сеткой.

Измерение энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, осуществлялось, так называемым, методом фольг [4], позволяющего в том числе определить среднюю энергию электронов. Суть метода заключается в следующем. На расстоянии 15 мм от выводной фольги 9 располагался экранированный коллектор 15 диаметром 65 мм, фиксирующий часть тока пучка, выведенного в атмосферу. Конструкция такого коллектора, представленная на рис. 2, позволяет изменять толщину фольги-фильтра 14, через которую ускоренные электроны попадают на коллектор 15, либо набором тонких фольг, либо заменой одной фольги на другую более толстую. В данных экспериментах толщина фольги-фильтра обеспечивалась путем набора алюминиевых фольг, толщина каждой из которых была около 9 мкм.

Как было отмечено ранее, данный ускоритель был выбран в качестве основного объекта исследований, благодаря одному из своих технических преимуществ перед ускорителями на основе других типов катодов, а именно возможности независимого управления параметрами электронного пучка

(энергией электронов, амплитудой тока пучка, длительностью и частотой следования импульсов) за счет использования сеточной (слоевой) стабилизации границы эмиссионной плазмы, которая незначительно изменяет свое пространственное положение в широком диапазоне параметров генерируемого электронного пучка. На рис. 3 приведены характерные осциллограммы токов в ускоряющем промежутке I_0 и соответствующие им изменения напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее в течение импульса тока пучка. Согласно выражению (1.1), квазипрямоугольная форма тока I_0 приводит к линейному уменьшению ускоряющего напряжения, а, следовательно, к уменьшению начальной энергии электронного пучка, также изменяющейся по линейному закону.

Рис. 2. Схема фольгового фильтра: 13 – фольговый фильтр; 14 – набор алюминиевых фольг; 15 – коллектор; 16 – изолятор; 17 – патрубок для вакуумной откачки (в экспериментах не использовался)

Нужно отметить, что поскольку произведение $(I_0 \cdot t)$ в широкоапертурных ускорителях электронов импульсно-периодического действия с выводом генерируемого пучка в атмосферу может достигать больших значений в том числе за счет роста площади электронного пучка, это может приводить к еще большему снижению ускоряющего напряжения ΔU , либо к

сохранению или даже уменьшению величины ΔU путем увеличения емкости высоковольтной конденсаторной батареи, компенсирующей спад напряжения ΔU .

Из рис. 3 также видно, что в отличие от ускорителей с взрывоэмиссионными катодами, в ускорителе электронов с сетчатым плазменным катодом форма ускоряющего напряжения легко прогнозируется, используя выражение 1.1, особенно, если учесть, что амплитуда импульса тока пучка постоянна во времени. Известная величина ускоряющего напряжения в каждый момент времени позволяет определить суммарный энергетический спектр за весь импульс по кривым ослабления тока пучка в тонких металлических фольгах, полученным при соответствующих ускоряющих напряжениях. Подобная задача была решена в работе [4] с помощью метода регуляризации Тихонова [18], используя формулы из работы [19].

Рис. 3. Характерные осциллограммы тока в ускоряющем промежутке I_0 и просадки напряжения на высоковольтной

конденсаторной батарее ΔU : $I_0=10$ А (а); $I_0=40$ А (б)

Самая большая ценность изложенного в [4] метода генерации решения «некорректной задачи» состоит в том, что он дает устойчивое приближение к формально точному решению уравнения при стремлении заданной невязки к нулю. Степень доверия к точности исходных данных, то есть величина ожидаемой невязки, определяет и степень достоверности полученного решения.

Так, на рис. 4 приведены кривые ослабления тока пучка при различных ускоряющих напряжениях. Нужно отметить, что при замене нескольких фольг-фильтров на одну с эквивалентной толщиной величина тока на коллектор I_{col} несколько возрастает. Вероятнее всего, в случае использования набора фольг-фильтров меньшее значение тока I_{col} связано с отклонением пучка на границе раздела фольга-воздух и ростом, таким образом, эквивалентной толщины каждой следующей фольги-фильтра. Таким образом, погрешность измерений с ростом количества фольг-фильтров возрастает.

Рис. 4. Кривые ослабления тока пучка на коллектор I_{col} в зависимости от толщины фольги фильтра N при разных ускоряющих напряжениях

Рис. 5. Кривые ослабления тока пучка на коллектор I_{col} при $U_0=160$ кВ и разных давлениях рабочего газа

Нужно отметить, что величина тока I_{col} не зависит от давления газа в ускоряющем промежутке, что видно из зависимостей, представленных на рис. 5, из чего также можно сделать вывод, что электронный пучок до взаимодействия с выводной фольгой имеет узкий спектр, а его расширение происходит в результате его взаимодействия с выводной фольгой и воздухом.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для каждой экспериментальной кривой ослабления тока пучка, приведенных на рис. 4, строились соответствующие спектры и расчетные кривые ослабления тока пучка, пример которых представлен на рис. 6. Восстановленные энергетические спектры пучка, полученные при различных ускоряющих напряжениях, представлены на рис. 7. Видно, что при снижении ускоряющего напряжения происходит смещение максимума спектра в область более низких энергий.

Предположение о том, что средняя энергия электронного пучка соответствует максимуму энергетического спектра, было проверено экспериментально, путем измерения энергосодержания электронного пучка стандартным

калориметром ТПИ-2М.1 с чувствительностью 100 мкВ/Дж, имеющего приемную площадь (6×6) см². Так, зная среднюю плотность тока электронного пучка в атмосфере (также экспериментально измеренную), среднюю энергию электронного пучка можно оценить, используя выражение:

$$E_0 = \frac{E}{j \cdot t} \quad (1.2)$$

где E , j , t – измеренная плотность энергии, плотность тока и длительность импульса электронного пучка. Расчеты показывают, что при $U_0=160$ кВ средняя энергия электронного пучка составляет около $E_0=110$ кэВ, что совпадает с результатами, приведенными на рис. 7.

Суммарный энергетический спектр электронного пучка, представленный на рис. 8, был получен путем сложения спектров, полученных для различных ускоряющих напряжений в диапазоне от 110 до 160 кВ. Видно, что в результате снижения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка происходит расширение его энергетического спектра и смещение максимума спектра в область меньших энергий.

Рис. 6. Экспериментальная (точки) кривая ослабления электронного пучка в тонких металлических фольгах и расчетная кривая ослабления (линия), полученная на основе рассчитанного энергетического спектра пучка при ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ

Рис. 7. Энергетические спектры электронного пучка, выведенного в атмосферу, снятые при различных ускоряющих напряжениях. Условия эксперимента: выводная фольга АМг-2н толщиной 30 мкм, расстояние от фольги до коллектора 15 мм

Рис. 8. Суммарный энергетический спектр электронного пучка, выведенного в атмосферу, при изменении ускоряющего напряжения за длительность импульса тока пучка со 160 кВ до 110 кВ

Заключение

Поскольку при выводе электронного пучка в атмосферу происходит существенное расширение его энергетического спектра, это позволяет использовать метод регуляризации Тихонова, наиболее подходящий при восстановлении достаточно гладких спектров. В результате, при использовании такого метода была решена задача восстановления энергетического спектра импульсно-периодического электронного пучка, выведенного в атмосферу через тонкую металлическую

фольгу, используя ускоритель электронов с сетчатым плазменным катодом. Показано, что за счет изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка происходит расширение его энергетического спектра и смещение максимума спектра в область меньших энергий электронного пучка. Поскольку в таких ускорителях электронов форма импульса тока пучка имеет квазипрямоугольную форму и определяется формой импульса тока разряда, а также слабо зависит от величины ускоряющего напряжения, это позволяет легко рассчитывать величину ускоряющего напряжения в каждый момент импульса тока пучка, и, соответственно, определять его суммарный энергетический спектр, информация о форме которого необходима для конкретных применений этих ускорителей как в научных, так и технологических целях.

Авторы выражают благодарность А.В. Козыреву за полезные дискуссии, связанные с анализом полученных экспериментальных данных.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00091).

Литература

1. С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. Электронные пучки большого сечения. // М.: Энергоатомиздат. 1984. 112 с.
2. С.Ю. Соковнин // Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. – Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 224 с.
3. В.В. Ростов, П.И. Алексеенко, П.В. Выходцев, А.В. Штейнле, В.И. Мазин, Е.П. Красноженов, Л.С. Муштоватова, Т.В. Солодкова, П.С. Постников, К.В. Кутонова, Л.А. Штейнле. // Сибирский медицинский журнал. 2012. Т. 27. № 1. С.141-146.

4. A.V. Kozyrev, V.Yu.Kozhevnikov, M.S. Vorobyov, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, N.N. Koval, V.F. Tarasenko // *Laser and Particle Beams*, 2015. P.1–10. Cambridge University Press. – 0263-0346/15.
5. Ю.В. Григорьев, Л.П. Шантурин // *ПТЭ*. 1979. №4, С. 194-196,.
6. Э.Н. Абдуллин, В.Н. Чмух // *ХВЭ*. 1979. Т.13. В.2. – С. 181–182.
7. В.Н. Чмух. Радиационное отверждение ненасыщенных олигоэфиров наносекундными сильноточными пучками электронов // *Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук.* – Томск, 1983. – 175 с.
8. Г.А. Месяц. Взрывная электронная эмиссия. // М.: Издательство физико-математической литературы, 2011. – 280 с.
9. Г.Е. Ремнев, Э.Г. Фурман, А.И. Пушкарёв, С.Б. Карпузов, Н.А. Кондратьев, Д.В. Гончаров // *ПТЭ*. 2004. №3. С. 130–134.
10. Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин // *ПТЭ*. 1997. №4. С. 84–86.
11. S.W.A. Gielkens, P.J.M. Peters, W.J. Witteman, P.V. Borovikov, A.V. Stepanov, V.M. Tskhai, M.A. Zaivjalov, V.I. Guschenets, N.N. Koval. // *Rev. Sci. Instr.* 1996. Vol.67, №7. P.2449-2452.
12. Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко // *Эмиссионная электроника*. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
13. V.A. Burdovitsin, E.M.Oks // *Laser and Particle Beams*. 2008. Т. 26. № 4. С.619-635.
14. Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких, В.А. Шитов // *Письма в ЖТФ*. 2005. Т. 31. Вып.3. С. 72–78.
15. М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // *ПТЭ*. 2015. №5. С.112–120.
16. M.S. Vorobyov, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, V.V.Shugurov // *IOP Journal of Physics: Conference Series* Vol. 652 (2015) 012066(1-6).
17. S.M. Seltser, M.J. Berger.// *Nucl. Instrum. and Methods*. 1974. V.119. P. 157-179.
18. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач // – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1979. – 288 с.
19. T. Tabata, R. Ito // *Nucl.Instr. and Methods*. 1975. V.127. P. 429–434.