

Электронный источник с плазменным анодом и выводом электронного пучка через фольговое окно в атмосферу

Э.Н. Абдуллин*, Г.Ф. Басов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**abdullin@lhfe.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Представлены результаты экспериментов по генерации электронных пучков с поперечным сечением 100–200 см² в электронном источнике со взрывоэмиссионным катодом, плазменным анодом и фольговым окном для вывода пучка в атмосферу. При ускоряющих напряжениях ~200 кВ электронный источник обеспечивает получение пучка, поступающего на коллектор с поперечным сечением 74 см², током до 2.5 кА, длительностью 5 мкс. Энергия пучка, рассчитанная путем интегрирования по времени произведения осциллограмм ускоряющего напряжения и тока коллектора, составляет до 1 кДж. Значения энергии пучка, выделяемой в коллекторе, рассчитанные по результатам измерений температуры коллектора, составили 650–850 Дж. Выполнены измерения тока пучка при включении в цепь коллектора малых сопротивлений, а также после прохождения пучком алюмомагниевого фольги АМг-2н толщиной 30 мкм с одновременной регистрацией тока коллектора и тока фольги.

Ключевые слова: микросекундный электронный источник, взрывоэмиссионный катод, плазменный анод, алюмомагниевого фольга.

1. Введение

Разработан электронный источник со взрывоэмиссионным катодом, плазменным анодом и фольговым окном и выполнены эксперименты по получению электронных пучков и выводу их в атмосферу с использованием внешнего продольного магнитного поля. Интерес к применению плазменного анода в электронном источнике с фольговым окном обусловлен возможностями получения микросекундных электронных пучков с повышенными значениями плотности тока и энергии пучка, возможностью управления током пучка, решения задачи увеличения ресурса катода. К настоящему времени электронный источник позволяет получать при ускоряющих напряжениях ~200 кВ электронные пучки круглого или прямоугольного поперечного сечения 100–200 см² с током до 2.5 кА, длительностью 5 мкс. Источником питания являлся генератор Маркса на основе длинных линий с квазипрямоугольной формой импульса выходного напряжения. Энергия пучка, рассчитываемая как интеграл произведения осциллограмм ускоряющего напряжения и тока пучка, поступающего на коллектор диаметром Ø 170–180 мм, размещенный в электронном источнике за плазменным анодом, составляла до 1.4–1.6 кДж и до 1 кДж при диаметре коллектора Ø 97 мм. Значения энергии пучка, получаемые из результатов измерений температуры коллектора Ø 97 мм с помощью термосопротивлений, составляли до ~650–850 Дж/импульс или до ~0.8–0.9 от значений, рассчитанных из осциллограмм. Наблюдалось значительное (до двух раз) уменьшение тока и энергии электронного пучка после прохождения пучком алюмомагниевого фольги АМг-2н толщиной 30 мкм, устанавливаемой в электронном источнике между плазменным анодом и коллектором [1]. Максимальная энергия пучка, выводимого через окно с геометрической прозрачностью 80 %, закрытое алюмомагниевого фольгой толщиной 30 мкм, в атмосферу, зарегистрированная калориметрами ТПИ-2М, составляла 250–270 Дж/импульс.

Ранее в [1] были высказаны предположения, что наблюдаемое уменьшение тока и энергии пучка после прохождения фольги в большой степени могут быть связаны с изменением конфигурации области дрейфа при установке фольги, а также присутствием в составе пучка медленных электронов с энергией, меньшей соответствующей ускоряющему напряжению, подаваемому от генератора.

Для проверки этих предположений в настоящей работе выполнены измерения тока пучка при отрицательном (тормозящем) потенциале коллектора. Продолжены эксперименты по измерению тока, проходящего через фольгу, отличающиеся от экспериментов [1] одновременной регистрацией с током коллектора тока фольги.

2. Методика и результаты экспериментов

Ранее о регистрации медленных электронов в микросекундном магнитоизолированном вакуумном диоде в сильном магнитном поле сообщалось в [2]. Медленные электроны образовывались в пространстве дрейфа в результате ионизации остаточного газа электронным пучком и обнаруживались по уменьшению тока на коллектор при установке заземленной сетки перед коллектором.

Известно о появлении в пучке большого количества электронов с энергиями, меньшими соответствующих ускоряющему напряжению, при развитии пролетной неустойчивости (transit-time instability). Неустойчивость наблюдалась при взаимодействии электронного пучка с высокочастотным излучением, генерируемым в вакуумных диодах мощных KrF лазеров. Подавление неустойчивости достигалось применением поглотителей в конструкции катода, что позволяло увеличить коэффициент пропускания выводных окон [3].

Известным механизмом, приводящим к понижению энергии электронного пучка при распространении в плазме, является передача части энергии электронов пучка плазме в процессе плазменно-пучкового взаимодействия [4].

В электронном источнике с плазменным анодом рассчитанные по тепловому воздействию на коллектор значения энергии электронного пучка, как правило, оказываются меньше значений, полученных из осциллограмм ускоряющего напряжения и тока, что может быть связано с присутствием медленных электронов в составе пучка.

Устройство электронного источника схематически показано на Рис.1.

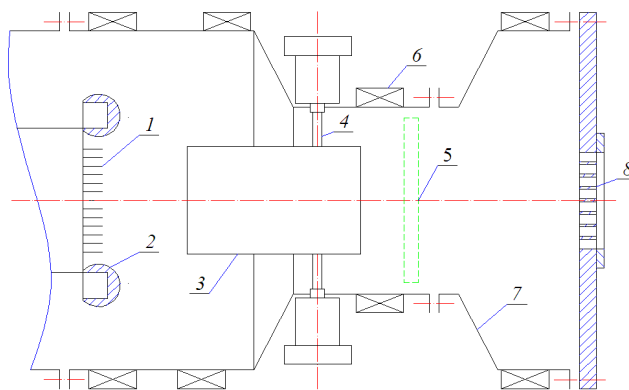


Рис.1. Устройство электронного источника: 1 – катод, 2 – катодный электрод, 3 – плазменный анод, 4 – плазменные пушки, 5 – коллектор, 6 – катушки магнитного поля, 7 – патрубок, 8 – решетка выводного окна.

В электронном источнике использовался многоострый катод и плазменный анод в виде отрезка тонкостенной трубы диаметром 100–120 мм или трубы прямоугольного сечения 90×180 мм², заполняемых плазмой. Катод и отрезки труб располагались соосно. Инжекция плазмы в направлении оси источника при формировании плазменного анода осуществлялась с помощью 8 коаксиальных плазменных пушек с разрядом по поверхности диэлектрика. Коллектора пучка в виде дисков диаметром Ø 97 мм или Ø 180 мм устанавливались на оси электронного источника за плазменным анодом. Коллектор Ø 97 мм, толщиной 10 мм

изготовлен из меди, снабжен термосопротивлением и выполнял дополнительно функцию калориметра.

При измерениях тока коллектора в тормозящем поле в цепь коллектора диаметром 180 мм включались сопротивления 0.01–0.5 Ом.

В экспериментах с прохождением пучка через фольгу, как и в работе [1], использовался заземленный коллектор $\varnothing 97$ мм, перед которым устанавливался лист алюмомагниевого фольги АМг-2н толщиной 30 мкм. В отличие от [1], диаметр листа был уменьшен с 200 мм до 180 мм, при этом контакт фольги с корпусом был устранен и обеспечивалась возможность регистрации задержанного фольгой тока. Для ограничения поперечного размера пучка на оси камеры между фольгой и плазменным анодом устанавливался дополнительный заземленный дюралюминиевый диск с отверстием 90 мм. В целом устройство представляло собой вариант фольгового спектрометра, обеспечивающего возможность проведения измерений тока коллектора и тока фольги в одном импульсе при неизменной геометрии дрейфового пространства. Формирование пучка осуществлялось с использованием слабонервномерного продольного магнитного поля 300–600 Гс.

В ходе экспериментов производилась регистрация ускоряющего напряжения U , тока пушек I_g , тока пучка, поступающего на коллектор, I_c , полного тока, поступающего от генератора, I_t и тока фольги I_f . Измерения напряжения выполнялись с помощью резистивного делителя напряжения. Для измерения тока генератора и тока фольги использовался резистивный шунт. Измерения тока пушек и тока пучка, поступающего на коллектор, выполнялись с помощью поясов Роговского. Оценки энергии, поступившей от генератора в электронный источник E_t , а также энергии пучка, поступившего на коллектор, E_c , получали в результате интегрирования по времени произведений осциллограмм ускоряющего напряжения на токи генератора и коллектора, соответственно. Также производились измерения тепловой энергии E_{th} , выделенной в коллекторе, с помощью термосопротивления.

В результате измерений получали значения транспортируемого за фольгу тока и энергии электронного пучка, что позволяло сделать предварительные заключения об эффективности транспортировки.

Для уменьшения влияния инжектированной плазмы и цепей питания пушек на результаты измерения тока коллектора использовались режимы работы электронного источника с малым временем протекания тока пушек (4–6 мкс). При этом импульс тока заканчивался к моменту подачи высокого напряжения на межэлектродный промежуток. Кроме того, большая часть экспериментов, связанных с измерением тока коллектора в вакууме, выполнялась в отсутствие непосредственного электрического контакта электродов плазменных пушек и плазменного анода с землей. Предполагалось, что при таких соединениях инжектированная плазма находится под плавающим потенциалом относительно заземленного коллектора, что ограничивает поступление тока из плазмы на коллектор в процессе работы электронного источника.

Осциллограммы тока коллектора в отсутствие и с включением сопротивления 0.5 Ом в цепь коллектора приведены на Рис.2. Видно, что срабатывание пушек не приводит к появлению тока коллектора, ток коллектора обусловлен генерацией пучка и появляется после подачи высокого напряжения на межэлектродный промежуток. В отсутствие сопротивления в цепи коллектора и благодаря его большому поперечному сечению электронный пучок полностью поступает на коллектор, при этом осциллограммы тока коллектора и тока генератора практически совпадают. При токе пучка 1.5 кА и сопротивлении 0.5 Ом в цепи коллектора потенциал коллектора составляет примерно –50 В, что приводит к незначительному уменьшению тока коллектора ~50–100 А. Уменьшение тока

коллектора свидетельствует о поступлении на коллектор медленных электронов, однако, число их, по крайней мере, с энергиями до 0.75 кэВ, оказывается мало.

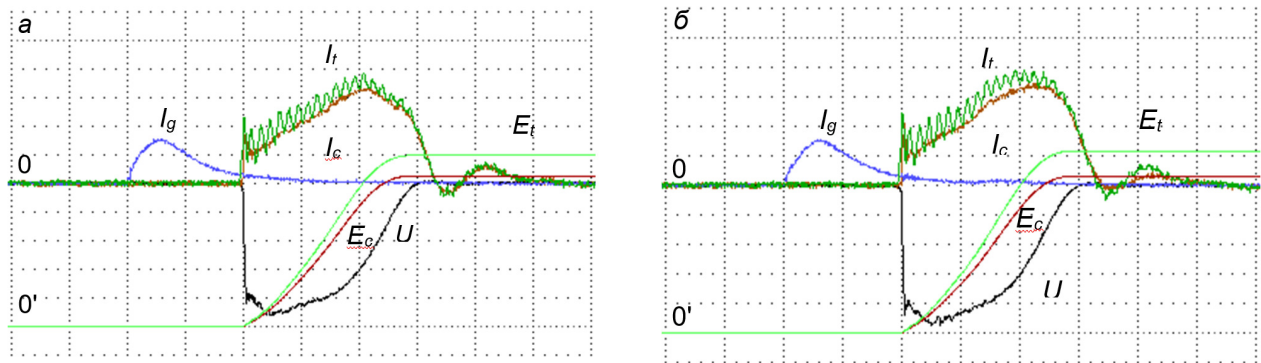


Рис.2. Осциллограммы ускоряющего напряжения U , тока пушек I_g , генератора I_g , коллектора I_c и зависимости энергии, поступающей на коллектор E_c и полной энергии, поступающей в электронный источник E_t , при отсутствии сопротивления (а) и сопротивлении 0.5 Ом (б) в цепи коллектора, от времени. Для удобства графики зависимостей $E_c(t)$ и $E_t(t)$ смещены вниз от нулевой линии. Масштабы по вертикали: 50 кВ/дел., 500 А/дел., 0.2 кДж/дел. Развертка 2 мкс/дел.

Осциллограммы напряжения U , тока коллектора I_c и тока фольги I_f , иллюстрирующие прохождение электронного пучка через диафрагму 90 мм на коллектор в отсутствие и при наличии перед коллектором алюмомагнетитовой фольги показаны на Рис.3. Рис.3а соответствует случаю отсутствия фольги. Уменьшение тока коллектора I_c по отношению к току генератора I_t по сравнению с Рис.2 связано с уменьшением размеров коллектора. При ускоряющем напряжении 200 кВ, $t \approx 1.4$ мкс величина тока, поступающего на коллектор, составляет $I_c \approx 425$ А, максимальное значение тока коллектора 800 А. Величина энергии, поступающей на коллектор, полученная из осциллограмм, составляет $E_c \approx 450$ Дж, при этом энергия, поступающая на коллектор, по данным измерения температуры составляет $E_{th} = 355$ Дж.

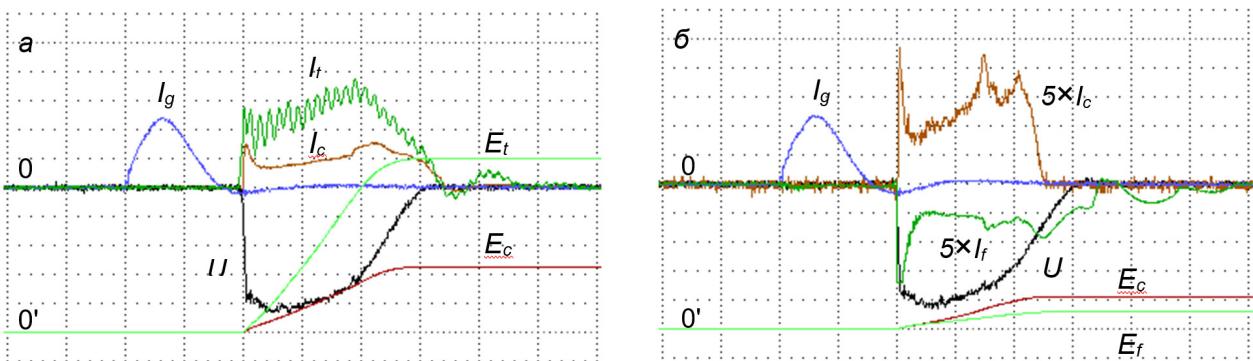


Рис.3. Осциллограммы ускоряющего напряжения U , тока пушек I_g с током коллектора I_c и током генератора I_t (а), током коллектора I_c и током фольги I_f , умноженными на 5 (б), и зависимости энергии, поступающей от генератора E_t на коллектор E_c и выделяемой в фольге E_f , от времени. Графики зависимостей $E_t(t)$, $E_c(t)$ и $E_f(t)$ смещены вниз от нулевой линии. Масштабы по вертикали: 50 кВ/дел., 500 А/дел., 0.2 кДж/дел. Развертка 2 мкс/дел.

Осциллограммы Рис.3б соответствуют случаю прохождения пучком алюмомагнетитовой фольги 30 мкм. Видно, что в близких условиях (ускоряющее напряжение 200 кВ, $t \approx 2$ мкс) величина тока коллектора составляет $I_c \approx 235$ А, величина тока фольги $I_f \approx 105$ А. Полагая, что полный ток, поступающий на фольгу, равен сумме тока коллектора и тока фольги

~340 А, найдем, что доля тока пучка, проходящего за фольгу и поступающего на коллектор при ускоряющем напряжении 200 кВ, составляет ~0.7. Величина энергии пучка, проходящей через фольгу на коллектор за импульс, по данным тепловых измерений составляет $E_{th} \approx 186$ Дж, или ~0.5 от первоначальной энергии 355 Дж.

Полученные значения меньше известных данных по коэффициентам пропускания алюминиевой фольги по числу частиц и энергии для случая моноэнергетического начального потока с энергией электронов 200 кэВ, равных соответственно 0.92 и 0.84 [5, 6].

Оценки показывают, что в случае моноэнергетического потока коэффициент пропускания алюминиевой фольги толщиной 30 мкм по числу частиц ~0.7 соответствует достаточно малой энергии электронов ~120–130 кэВ.

Таким образом, полученные данные подтверждают возможность снижения энергии пучка в электронном источнике с плазменным анодом по сравнению с соответствующей приложенному напряжению, что приводит к уменьшению тока и энергии электронного пучка при прохождении фольги. Вероятным механизмом снижения энергии пучка может быть плазменно-пучковое взаимодействие. Возможно образование и поступление низкоэнергетичных электронов на коллектор также при инжекции плазмы, формировании двойных слоев, приобретении плазмой отрицательных потенциалов относительно коллектора. При этом рекомендациями для увеличения выхода тока и энергии электронного пучка могут быть увеличение ускоряющего напряжения и магнитного поля.

3. Заключение

Выполнены измерения токов и энергии электронного пучка в электронном источнике с плазменным анодом с включением сопротивления смещения в цепь коллектора, а также после прохождения пучка через алюмомагнелиевую фольгу АМг-2н толщиной 30 мкм. Не зарегистрировано значительных изменений тока пучка при отрицательном потенциале коллектора относительно земли до –750 В. При регистрации тока коллектора и тока фольги, а также энергии электронного пучка в одном импульсе, оценены коэффициенты пропускания фольги по числу частиц и энергии, составившие при величине ускоряющего напряжения 200 кВ, 0.7 и 0.5, соответственно.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Томской области (РФФИ Проект № 18-48-700034).

5. Список литературы

- [1] Abdullin E.N., Basov G.F., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2064**, 012115, 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012115
- [2] Дейчули М.П., Кошелев В.И., Попов В.А., *ПТЭ*, **4**, 52, 1992.
- [3] Friedman M., Swanekamp S., Obenschain S., Chan Y., Lundeking L., Smithe D., *Appl. Phys. Lett.*, **77**(7), 1053, 2000; doi: 10.1063/1.1288520
- [4] Александров А.Ф., Кузелев М.В., *Радиофизика. Физика электронных пучков и основы высокочастотной электроники*. (Москва: КДУ, 2007).
- [5] Seltzer S.M., Berger M.J., *Nucl. Instr. and Meth.*, **119**, 157, 1974; doi: 10.1016/0029-554X(74)90747-2
- [6] Николаев В.Б., *ЖТФ*, **46**, 1555, 1976.