

10

## Генерация низкоэнергетических высокоинтенсивных импульсных электронных пучков в „канальной искре“

© Г.Е. Озур, С.А. Попов, В.Ф. Федущак, А.В. Саушкин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: ozur@lve.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2006 г.

Исследован процесс формирования плотного низкоэнергетического (5–10 keV) импульсного электронного пучка в пушке типа „канальной искры“. В экспериментах продемонстрировано, что интенсивная предыонизация канала транспортировки в сочетании с импульсной подачей ускоряющего напряжения на катод позволяет получать пучки со скоростью нарастания тока более  $10^{11}$  A/s, плотностью более  $10 \text{ kA/cm}^2$ , а амплитуда тока пучка превышает ток Альфвена примерно в 1.5–2 раза.

PACS: 41.75.Fr

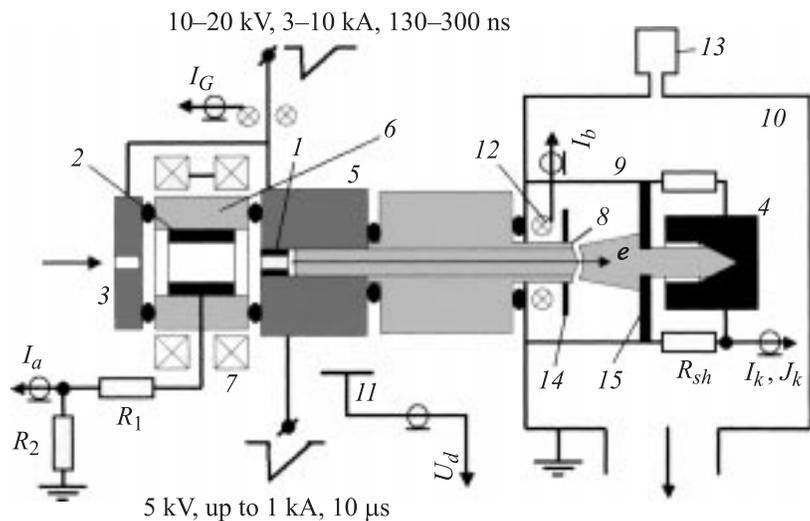
Одним из перспективных направлений использования высокоинтенсивных ( $> 10 \text{ kA/cm}^2$ ) низкоэнергетических (5–10 keV) импульсных ( $\sim 100 \text{ ns}$ ) электронных пучков малого диаметра (единицы миллиметров) является электронно-лучевая абляция — сверхскоростное испарение твердотельных мишеней для осаждения тонких пленок высокого качества. Электронно-лучевая абляция является одной из альтернатив более развитой в настоящее время лазерной абляции, поскольку обладает рядом преимуществ, среди которых важнейшими являются низкая стоимость оборудования (5–10% от стоимости лазерных установок), более высокий к.п.д., возможность абляции прозрачных мишеней [1,2].

Для повышения качества пленок и уменьшения потерь на теплоотвод в глубь мишени следует уменьшать длительность импульса, что для электронного пучка означает необходимость увеличения скорости нарастания тока. Это предъявляет соответствующие требования не только к генератору высоковольтных импульсов, питающему электронную пушку, но и к скорости формирования эмиссионной поверхности

на катоде, равно как и к скорости формирования плазменного анода, одновременно служащего каналом транспортировки пучка.

В электронных пушках [1,2], названных авторами Channel Spark („канальная искра“), полый катод питается от малоиндуктивного конденсатора, одна из обкладок которого (соединенная с катодом) находится под отрицательным статическим потенциалом. Давление рабочего газа составляет 1–3 Па. Запуск пучка осуществляется с помощью зажигания вспомогательного импульсного слаботочного газового разряда. Плазма разряда проникает в отверстие в полем катоде и возбуждает эмиссию с его поверхности. Роль канала, обеспечивающего узкую направленность пучка, электроизоляцию, защиту катода от запыления продуктами эрозии мишени, играет стеклянная или керамическая трубка. По мере роста концентрации плазмы в канале двойной слой, в котором ускоряются электроны, со скоростью порядка  $10^6$  м/с перемещается к выходному торцу трубки. Ввиду того что натекание плазмы в катодную полость является сравнительно медленным процессом, данная схема не может обеспечить высоких скоростей нарастания тока пучка, а значит и высоких скоростей ввода энергии пучка в мишень. Другой причиной, ограничивающей скорость нарастания тока, являются потери пучка на создание плазменного канала, поскольку характерное время ионизации  $t_i = (n_0\sigma_i u)^{-1}$  в данном случае сравнимо с длительностью импульса ( $n_0$  — концентрация нейтралов,  $\sigma_i$  — сечение ионизации электронным ударом,  $u$  — скорость электронов пучка). Полученные в [1,2] скорости нарастания тока пучка не превышают  $10^{10}$  А/с, амплитуда — не более 1.5 кА.

Устройство электронной пушки (рис. 1), использовавшейся в наших экспериментах, аналогично [1,2]. Основное отличие заключается в заблаговременном создании плазменного столба между катодом и коллектором с помощью прямого сильноточного (до 1 кА) разряда, инициируемого в данном случае пеннинговским разрядом. Изучение осциллограмм горения разряда (без подачи основного импульса на катод) показало, что время переключения тока из пеннинговской разрядной ячейки на коллектор быстро уменьшается с увеличением скорости расхода рабочего газа (аргон) и при расходе  $6 \text{ см}^3/\text{min}$  не превышает  $1.5 \mu\text{s}$ . Напряжение горения разряда в установившемся режиме составляло 50–100 В. Параметры разряда обеспечивали концентрацию ионов в столбе порядка требуемой концентрации электронов пучка

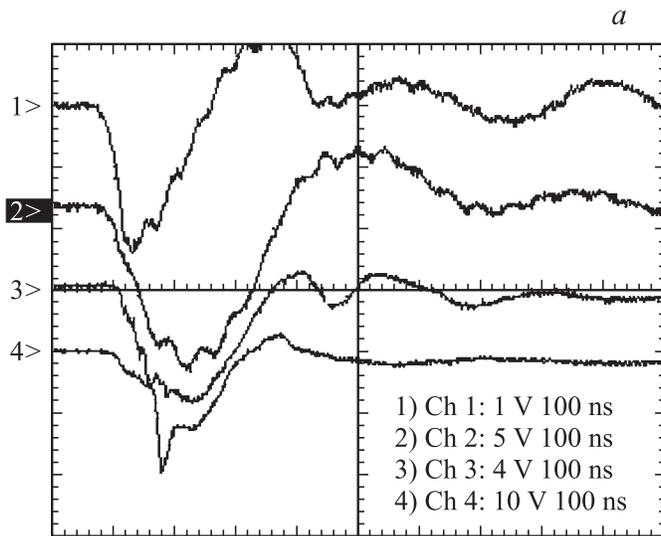


**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — взрывоэмиссионный катод; 2 — пеннинговский анод; 3 — вспомогательный катод пеннинговского разряда; 4 — коллектор; 5 — полый катод; 6 — изолятор; 7 — соленоид; 8 — керамическая трубка внутренним диаметром 4 мм; 9 — обратный токопровод; 10 — вакуумная камера; 11 — емкостной делитель напряжения; 12 — трансформатор тока; 13 — датчик давления; 14 — диэлектрический экран; 15 — диафрагма толщиной 1 мм;  $R_1 = 40 \Omega$  — ограничительный резистор;  $R_2 = 0.1 \Omega$  и  $R_{sh} = 0.05 \Omega$  — шунты.

(около  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) с тем, чтобы обеспечить его зарядовую нейтрализацию с самого начала импульса.

Предварительное создание плазменного столба требует, в свою очередь, импульсного питания катода. Формирование импульса ускоряющего напряжения амплитудой до 25 kV осуществлялось при разряде малоиндуктивного конденсатора собственного производства НСЕИ-40-0.05 (40 kV, 50 nF, 4 nH) [3] через псевдоискровой разрядник ТДИ1-50к/50. Общая индуктивность разрядного контура составляла 130 nH.

После формирования плазменного канала на катод 1 с задержкой 3–40  $\mu\text{s}$  (относительно начала тока разряда) подавался импульс ускоряющего напряжения с фронтом 20–30 ns, и на катоде возбуждалась взрывная эмиссия. Эмитированные катодной плазмой электроны



**Рис. 2.** *a* — типичные осциллограммы импульсов: 1 — напряжения на катоде; 2 — тока генератора; 3 — тока пучка; 4 — плотности тока на оси пучка. Давление газа 1.3 Па. Чувствительность по вертикали: 6, 3.5, 4, 18 kA/(cm<sup>2</sup> · div). *b* — зависимость плотности тока на оси пучка от давления рабочего газа. Зарядное напряжение ГИН 20 kV, расход аргона 6 cm<sup>3</sup>/min. Задержка между началом горения разряда и подачей ускоряющего напряжения на катод 10 μs; расстояние „торец трубки-коллектор“ 32 mm; диаметр отверстия в диафрагме 1.2 mm.

ускорялись в двойном слое между катодной и анодной плазмой, который, видимо, быстро перемещался в сторону коллектора, как это наблюдалось в [1]. Из осциллограмм, приведенных на рис. 2, *a*, видно, что заблаговременное создание плазменного канала позволило на порядок увеличить скорость нарастания тока и в несколько раз — абсолютное значение тока по сравнению с результатами [1,2]. Интересно, что амплитуда тока пучка в 1.5–2 раза превысила значение тока Альфвена, составляющее при энергии электронов 5–10 keV  $I_A = 2.4–3.3$  kA. Этот результат получен впервые для электронных пучков столь низких энергий.

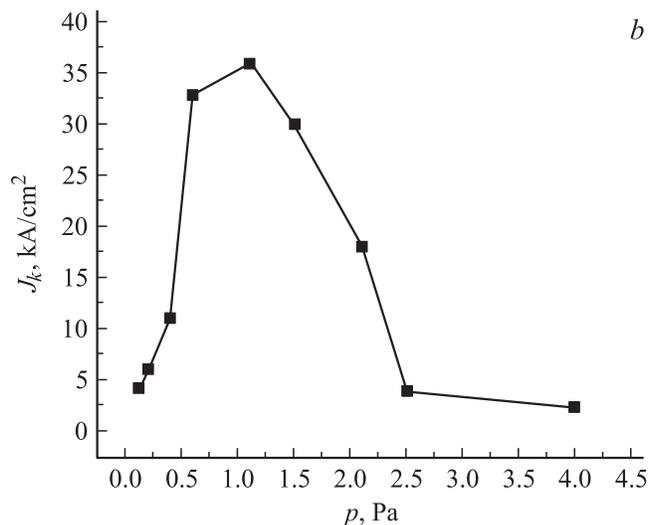


Рис. 2 (продолжение).

Плотность тока в приосевой области пучка  $J_k$  вначале нарастает относительно медленно, а затем быстрее, что отражает фокусировку пучка. Изучение осциллограмм, полученных при различных давлениях газа, дало зависимость  $J_k$  от давления рабочего газа, представленную на рис. 2, *b*. С ростом давления  $J_k$  сначала растет благодаря увеличению концентрации плазмы, а затем, когда давление превышает некоторое критическое значение, величина  $J_k$  начинает спадать из-за развития в пучке пинч-эффекта, под действием которого продольная скорость электронов резко падает [4]. Оценки показывают, что скорость ионообразования и скорость ухода ионов вследствие свободного разлета сравнимы по порядку величины в нашем диапазоне давлений. Поскольку плотность тока эмиссии растет с увеличением давления рабочего газа, то при некотором критическом значении давления ионообразование превалирует над уходом ионов, плазменные электроны рождаются в достаточном для поддержания (своим последующим уходом из объема пучка!) зарядовой нейтрализации количестве — в результате в пучке возникает пинч-эффект.

Оптимальной с точки зрения фокусировки пучка нам представляется следующая схема. Поскольку высокая степень магнитной нейтрализации для низкоэнергетических пучков трудно достижима из-за невозможности разделения фольгой ускоряющего зазора и пространства дрейфа, то магнитное сжатие пучка следует уравновесить кулоновским расталкиванием. Оценки показывают, что при высокой скорости нарастания плотности тока и малом количестве плазменных электронов внутри пучка (т.е. при сравнительно низком давлении газа) в пучке возникает сильное радиальное электрическое поле, стягивающее ионы к оси. Это поле усиливается при некотором начальном сжатии пучка собственным магнитным полем, поскольку часть ионов вследствие своей инерционности окажется вне пучка. Затем под действием радиального электрического поля ионы двинутся к оси, стремясь восстановить зарядовую нейтрализацию, но впрыск новой порции электронов и сжатие магнитной силой снова ее нарушат и так далее. При такой динамике продольная скорость электронов не должна существенно упасть, как при пинч-эффекте, а плотность тока будет в течение импульса постепенно расти по мере накопления ионов в приосевой области. На наш взгляд, такой механизм фокусировки реализовался в пучках средних (60–80 keV) энергий, причем ток пучка достигал  $(3-4)I_A$  [5].

Предложенный механизм фокусировки коррелирует с результатами теоретической работы [6], где в гидродинамическом приближении было рассмотрено равновесие релятивистского электронного пучка в плазме с учетом поля разделения зарядов, т.е. без искусственного предположения о постоянстве степени зарядовой нейтрализации. В частности, было показано, что плотный пучок даже в отсутствие токовой нейтрализации имеет больший ток (причем больше тока Альфвена!) и лучше фокусируется в редкой плазме, чем в плотной.

Результаты регистрации рентгеновского излучения подтверждают ход зависимости плотности тока от давления газа. Регистрация осуществлялась с помощью люминофора, расположенного за танталовой фольгой (мишень) толщиной  $10\ \mu\text{m}$  на расстоянии 1 mm. Люминофор был дополнительно прикрыт алюминиево-бериллиевой фольгой толщиной  $60\ \mu\text{m}$ , располагавшейся вплотную на рентгенолюминесцентном экране. При зарядовом напряжении конденсатора 20 kV свечение люминофора регистрировалось вплоть до давлений 1.6 Pa, а при дальнейшем увеличении давления свечение исчезало вследствие уменьшения напряжения на двойном слое, в котором ускоряется электронный

пучок, а также падения продольной скорости электронов из-за развития в пучке пинч-эффекта. Увеличение зарядного напряжения до 25 kV не приводило при больших давлениях газа к появлению свечения люминофора.

Энергия пучка в импульсе измерялась с помощью калориметра и составила в оптимальных по давлению режимах  $3.7 \pm 0.45$  J при запасенной энергии 10 J. Характер распределения плотности энергии в поперечном сечении оценивался по автографам пучка на мишенях из меди, вольфрама и нержавеющей стали. При давлениях газа 0.4–1 Pa на автографах наблюдалась зона интенсивного плавления и частичного испарения с характерным диаметром 3–6 mm, окруженная ореолом (очищенная поверхность без следов плавления) диаметром 30–40 mm. Напротив, при высоких ( $> 2$  Pa) давлениях автографы пучка выглядели „слабыми“, лишь на нержавеющей стали были видны следы начального плавления. Такое поведение автографов коррелирует с результатами регистрации рентгеновского излучения.

Заключение. Таким образом, в электронной пушке на основе канальной искры впервые получен низкоэнергетический (5–10 keV) пучок с током примерно в 1.5–2 раза выше тока Альфвена, скоростью нарастания более  $10^{11}$  A/s и плотностью в десятки кА/см<sup>2</sup>.

Отметим, что импульсная подача ускоряющего напряжения уже использовалась в работе [7], но неудачная конструкция электронной пушки и малая величина тока предимпульса не позволили получить пучок достаточной плотности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 05-08-18266-а).

Авторы признательны Д.И. Проскуровскому, В.А. Кагадею, Н.А. Ра-тахину за полезные дискуссии и советы, а также Е.В. Нефедцеву, Л.А. Зюльковой, Н.В. Жаровой и А.Г. Падею за помощь в работе.

## Список литературы

- [1] *Muller G., Schulteiss C.* // Proc. 10th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS-94). San Diego, USA, 1994. P. 833–836.
- [2] *Frey W., Schulteiss C., Bluhm H.* // Proc. 14th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS-2002). Albuquerque, USA, 2002. P. 87–90.

- [3] Саушкин А.В., Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Жарова Н.В. // Труды 13-го Междунар. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, Россия, 2004. С. 195–197.
- [4] Hammer D.A., Rostoker N. // Phys. Fluids. 1970. V. 13. N 7. P. 1831–1850.
- [5] Иремашвили Д.В., Кузнецов П.И., Осепашвили Т.А., Тимошенко А.П. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 7. С. 1485–1490.
- [6] Аносова Л.М., Горбунов Л.М. // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 6. С. 1150–1155.
- [7] Hinshelwood D.D., Chrisey D.B., Cooperstein G. et al. // Proc. of 11th IEEE International Pulsed Power Conf. Baltimore, USA, 1997. P. 1042–1047.