

УДК 621.384.6

Формирование интенсивного электронного пучка в пушках с малым диаметром катода

*В. Антропов, А. Иванов, В. Кобец, Ю. Коротаев, И. Мешков,
А. Петров, И. Селезнев, А. Сидорин, А. Смирнов, Е. Сыресин,
Г. Трубников, С. Яковенко*

Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской обл., Россия

Представлены экспериментальные результаты по формированию электронного пучка с током до 4 А в электронной пушке с катодом малого диаметра 13 мм. Пушка предназначена для генерации интенсивных электронных пучков в системах электронного охлаждения, применяемых для быстрого и глубокого охлаждения ионов в схеме с большим коэффициентом расширения в спадающем магнитном поле.

Формирование электронных пучков с плотностью порядка 10^8 см⁻³ является привлекательным для быстрого и глубокого охлаждения ионов в накопительных кольцах [1].

В представленной работе обсуждается формирование электронных пучков с током до 4 А и плотностью $5 \cdot 10^8$ — 10^9 см⁻³ в пушке с катодом диаметром 13 мм. Такая электронная пушка может быть использована как для формирования

интенсивных электронных пучков в схеме с магнитной декомпрессией при коэффициенте расширения $R = 1-3$, так и для генерации пучков с большим током и низкой поперечной температурой электронов, реализуемой при пробочном отношении магнитного поля в области пушки к полю в соленоиде участка охлаждения $R = 10-20$. Представлены результаты тестирования электронной пушки с катодом диаметром 13 мм и током пучка до 4 А, предназначенной для системы электронного охлаждения АСР накопительного комплекса MUSES (RIKEN, Япония) [2].

Цель настоящей работы — исследование динамики эмиссии катода в режиме длительной непрерывной генерации электронного пучка с плотностью эмиссии до 3 А/см^2 в условиях, типичных для систем электронного охлаждения в накопителях ионов.

Формирование интенсивного электронного пучка на экспериментальном стенде ОИЯИ

Электронная пушка с катодом диаметром 13 мм была изготовлена в ОИЯИ для формирования интенсивного электронного пучка в системе электронного охлаждения.

Характеристика стенда ОИЯИ и системы охлаждения АСР

Параметры	Стенд ОИЯИ	Система АСР
Ток пучка, А	4	4
Максимальная энергия электронов, кэВ	30	250
Ускоряющее напряжение катод—анод, кВ	30	30
Первенец пушки, $\text{мкА/В}^{3/2}$	0,75—1,5	0,75
Магнитное поле в области пушки, Тл	0,13	4
Магнитное поле в коллекторной катушке, Тл	0,07	0,2
Магнитное поле в центральном соленоиде, Тл	0,05	0,2
Пробочное отношение поля в пушке к полю в секции охлаждения	2,6	20
Диаметр пучка в центральном соленоиде, см	2,1	5
Плотность пучка, см^{-3}	$8,5 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^7$
Проходной диаметр анода, мм	33	20
Радиус поворотного соленоида, м	Отсутствует	1,5
Вакуум, Па	$3 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}

Пушка состоит из трех основных узлов: катод с пирсовским электродом, управляющий электрод, анод (рис. 1). Катод диаметром 13 мм изготовлен в НПО "Торий" (г. Москва) [3], где он используется в клистроне для формирования электронного пучка с плотностью тока до 5 А/см^2 при вакууме 10^{-7} Па. Рабочая температура катода составляет $990-1050 \text{ }^\circ\text{C}$, ток накала равен $3,9-4,25 \text{ А}$, напряжение накала $11,5-12 \text{ В}$.

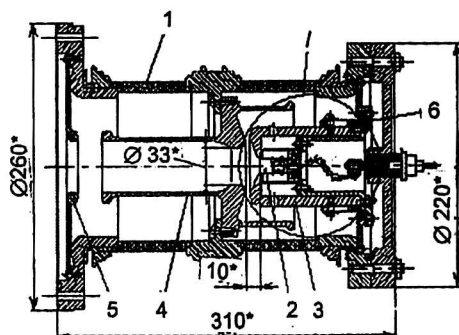
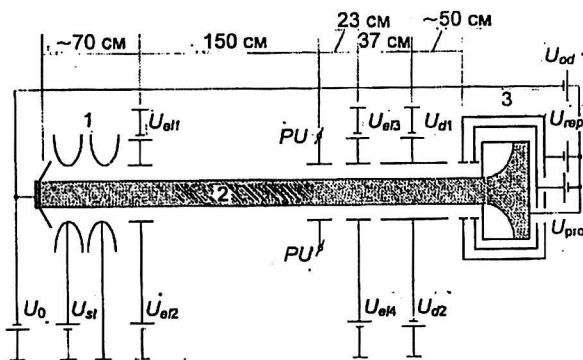


Рис. 1. Сборочный чертеж электронной пушки:
1 — изолятор; 2 — катод; 3 — пирсовский электрод; 4 — управляющий электрод; 5 — анод; 6 — вакуумный фланец

Тестирование катода проведено с электронным пучком в течение более 1550 ч и с полным зарядом, эмитированным катодом, более 4000 А·ч. В ходе теста контролировались эмиссионные характеристики катода и параметры электронного пучка.

Формирование электронного пучка в постоянном режиме проведено на экспериментальном стенде ОИЯИ (рис. 2) [4]. Данный стенд является аналогом системы электронного охлаждения. Однако, в отличие от системы электронного охлаждения, на стенде отсутствуют поворотные тороидальные магниты. Электронный пучок формируется в электронной пушке, затем транспортируется вдоль вакуумной камеры в сопровождаемом магнитном поле на расстояние 3,6 м и в конце принимается коллектором. Формирование электронного пучка на стенде ОИЯИ имеет некоторые отличия по сравнению с системой электронного охлаждения АСР. Величина магнитного поля на стенде в несколько раз меньше, чем в системе охлаждения АСР. Вследствие этого, уровень тока потерь электронного пучка при рекуперации на стенде значительно превышает значение, предполагаемое для системы электронного охлаждения АСР.

Рис. 2. Схема экспериментального стенда ОИЯИ:
1 — пушка; 2 — исходный пучок;
3 — коллектор



Формирование электронного пучка в постоянном режиме осуществлялось на экспериментальном стенде ОИЯИ (см. рис. 2) [4], который является моделью системы электронного охлаждения (в отличие от системы электронного охлаждения на стенде отсутствуют поворотные тороидальные магниты). Электронный пучок формируется в электронной пушке, затем транспортируется вдоль вакуумной камеры длиной 3,6 м в ведущем магнитном поле и принимается в коллекторе. Условия формирования электронного пучка на стенде ОИЯИ имеют некоторые отличия по сравнению с системой электронного охлаждения АСР. Величина магнитного поля на стенде в несколько раз меньше, чем в системе охлаждения АСР (см. таблицу). Вследствие этого уровень тока потерь электронного пучка при рекуперации на стенде значительно превышает значение, предполагаемое для системы электронного охлаждения АСР.

Другой особенностью стендовых экспериментов явилась высокая интенсивность электронного пучка $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ (плотность электронов в области пушки составляет $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$), обусловленная невысоким пробочным отношением $R = 2,6$. Такая плотность пучка на порядок выше по сравнению со стандартной системой электронного охлаждения.

Давление остаточного газа в вакуумной камере составляло $3 \cdot 10^{-7}$ Па без пучка и $2 \cdot 10^{-6}$ Па — при токе электронного пучка 3—4 А. При тестировании катода энергия электронов варьировалась в пределах 5—30 кэВ, что на порядок меньше, чем в системе охлаждения АСР. Напряжение на коллекторе со-

ставляет 5 кВ при токе пучка 4 А. Максимальное напряжение на репеллере +8 кВ относительно коллектора. Основными ограничениями при формировании электронного пучка с током до 4 А были: большой ток потерь пучка и отравление поверхности катода при вакууме хуже $5 \cdot 10^{-6}$ Па.

Эмиссионные характеристики катода

Изучение эмиссионных характеристик катода исследовалось для двух различных зазоров между катодом и управляющим электродом. Вначале зазор составлял 15 мм, что соответствовало первеансу пушки $0,75 \text{ мкА/В}^{3/2}$ системы электронного охлаждения АСР (рис. 3). Из-за низкого значения величины магнитного поля в области пушки на стенде ток потерь на управляющий электрод превышал проектное значение для АСР в несколько раз, что заметно влияло на вакуумные условия. Для устранения этого эффекта диаметр проходного отверстия управляющего электрода был увеличен до 33 мм, а зазор уменьшен до 10 мм, что увеличило первеанс пушки до значения $1,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ (рис. 4).

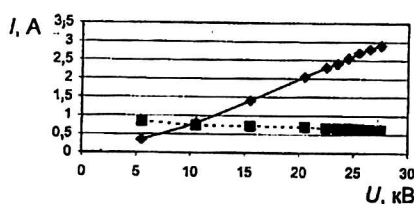
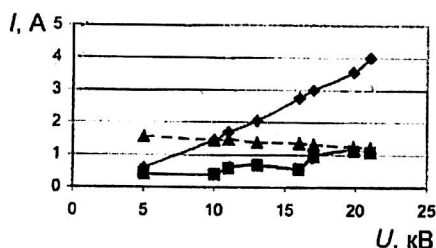


Рис. 3. Зависимость тока пучка I (сплошная линия) и первеанса пушки P (пунктирная линия) от ускоряющего напряжения U .
Первеанс $0,75 \text{ мкА/В}^{3/2}$, $P = 4 \cdot 10^{-5}$ Па

Рис. 4. Зависимость тока пучка, относительного тока потерь и первеанса пушки от ускоряющего напряжения для температуры катода $T_{\text{cath}} = 1020 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 3 \cdot 10^{-6}$ Па:
♦ — пучок, А; ■ — потери (10^{-3}); ▲ — первеанс



Тестирование катода проводилось при температуре катода $970\text{--}1020 \text{ }^\circ\text{C}$ и токе накала $3,9\text{--}4,25$ А. Отсутствие изменения тока пучка в зависимости от тока накала не было достигнуто для больших токов пучка. Наибольшее значение тока пучка достигнуто при максимальном значении температуры катода.

Первеанс пушки имеет хорошее совпадение с законом Чайлда-Ленгмюра для зазора 15 мм вплоть до энергии электронов 20 кэВ (см. рис. 3). Для потенциала катода в интервале $20\text{--}30$ кВ наблюдается снижение первеанса, что объясняется снижением эмиссионной способности катода при плохих вакуумных условиях. Вакуум на стенде составлял $4 \cdot 10^{-5}$ Па для тока пучка 3 А. Формирование электронного пучка с током более 3 А ограничено при данных вакуумных условиях отравлением поверхности катода.

После увеличения диаметра отверстия в управляющем электроде ток потерь определялся эффективностью коллектора. Относительный ток потерь для электронного пучка с током 3 А составлял $I_{\text{los}}/I \approx 8 \cdot 10^{-4}$. Ток потерь в основном определялся низким значением магнитного поля на входе коллектора. Максимальное значение магнитного поля в коллекторной катушке со-

ставляет 0,7 кгс. На входе в коллектор электронный пучок имеет относительно маленький диаметр — 1,75 см. Расширение пучка при этом меньше, чем в экспериментах с электронной пушкой для системы электронного охлаждения LEAR (CERN, Швейцария), которые также проводились на данном стенде. Диаметр катода пушки LEAR составлял 5 см при таком же токе пучка 3 А [5]. Ток потерь при этом был на порядок меньше, чем в представляемых экспериментах с катодом диаметром 13 мм.

После месяца работы с пучком на экспериментальном стенде вакуум в системе улучшился до значения 10^{-6} — $3 \cdot 10^{-6}$ Па, что позволило избежать отравления катода и достичь максимального тока 4 А при первеансе пушки $1,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ (см. рис. 4). Для достижения максимального тока пучка пришлось увеличить ток накала с 4,1 А до значения 4,25 А. Для катодов с малым диаметром происходит уменьшение температуры на поверхности катода при увеличении тока пучка. Для сохранения температуры на поверхности катода диаметром 13 мм требуется увеличение мощности накала на 2 Вт при увеличении тока пучка на 1 А.

Во втором режиме работы первеанс пушки также имеет хорошее согласие с законом Чайлда-Ленгмюра при ускоряющем напряжении меньше 12 кВ. Для интервала напряжений 12—20 кВ наблюдалось снижение первеанса (см. рис. 4), что определялось большим значением тока потерь и, как следствие, ухудшением вакуума. Ток потерь для пучка с током до 4 А определяется значением поля в коллекторной катушке и максимальным значением потенциала коллектора. Дальнейшее увеличение поля в катушке на стенде невозможно из-за ее сильного перегрева. Потенциал коллектора был увеличен до 5 кВ, что уменьшило потери пучка. Дальнейшее увеличение потенциала коллектора было ограничено возможностями источника питания коллектора.

Другим серьезным ограничением при тестировании пушки с током пучка 3,5—4 А стала проблема отвода мощности пучка (до 20 кВт), выделяемой на коллекторе. При длительной работе с таким током пучка происходит перегрев воды в системе охлаждения коллектора. Система водяного охлаждения стенда эффективно работает при активной мощности пучка, принимаемой в коллектор до 10—12 кВт. После 3—4 ч работы с максимальным током пучка 3,5—4 А вода в системе охлаждения коллектора нагревается до температуры 70—80 °С, и вакуум в системе ухудшается с $2 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ Па. Это приводит к частичному отравлению поверхности катода и снижению эмиссии примерно на 200 мА. После смены воды в системе охлаждения коллектора, вакуум возвращается к исходному значению и эмиссия катода восстанавливается. Обычный цикл между сменой воды составлял 3—4 ч, что определяется теплоемкостью водяной системы охлаждения коллектора.

Непрерывный режим работы в течение более 12 ч удалось достичь для тока пучка 3,3 А. Как видно из рис. 5, при начальном давлении $7 \cdot 10^{-6}$ Па, ток пучка составляет 3,1 А при ускоряющем напряжении 20 кВ. После нескольких часов работы с пучком вакуум в системе улучшился до $3 \cdot 10^{-6}$ Па, и значение ускоряющего напряжения было снижено до 18 кВ при том же токе пучка. Как показывает практика работы с катодом диаметром 13 мм, необходимым условием для получения тока пучка на уровне 4 А (что соответствует

плотности электронов $5 \cdot 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$) является достижение вакуума в области катода лучше $3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$.

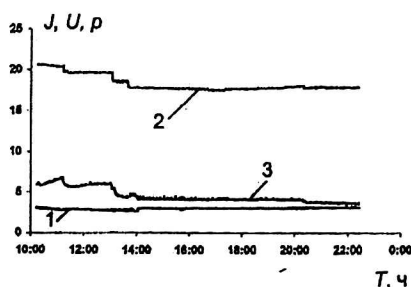


Рис. 5. Зависимость тока пучка, ускоряющего напряжения и вакуума от времени:
1 — ток, А; 2 — напряжения, кВ;
3 — вакуум P , торр- 10^{-8}

Заключение

Электронный пучок с током 4 А и плотностью электронов $5 \cdot 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ сформирован в непрерывном режиме в пушке с катодом диаметром 13 мм. Данная пушка может быть использована для генерации интенсивных электронных пучков в системе электронного охлаждения. Она позволяет получать интенсивные электронные пучки, как с высокой плотностью, так и с низкой поперечной энергией электронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 99-02-17716.

Литература

1. Dikansky N. S., Kudelainen V. I., Lebedev V. A. et al. Ultimate Possibilities of Electron Cooling. Preprint INP 88—61, Novosibirsk, 1988.
2. Tanabe T., Rizawa T., Ohtomo K. et al. Design of an electron cooling device for the accumulator cooler ring in MUSES project//NIM. 2000. A 441. P. 104.
3. Maslennikov O., Smirnov V. Thermionic cathodes for accelerators and microwave devices. HEAC 98, 1998, Dubna. P. 335.
4. Caspers F., Korotaev Yu., Meshkov I. et al. Diagnostic of a neutralised electron beam on the JINR test bench// NIM, 1997. A 391. P. 128.
5. Meshkov I. N., Poljakov V. N., Smirnov A. V. et al. The variable current gun: the parameters test and results of the first electron cooling experiment at LEAR//NIM, 1995. A 355. P. 208.

Forming an intensive electron beam in guns with a small dia of the cathode

V. Antropov, A. Ivanov, V. Kobets, Yu. Korotaev, I. Meshkov,
A. Petrov, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin,
G. Trubnikov, S. Yakovenko

The Integrated Institute for Nuclear Researches, the Dubna city of the Moscow region, Russia

This report introduces experimental results on forming a electron beam with a current up to 4 A in the electron gun with the cathode of small diameter — 13 mm. The gun is intended for generation of intensive electron beams in systems of electronic cooling used for prompt and deep cooling the ions in the scheme with a big expansion ratio in a waning magnetic field.