

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАССИВНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СТАБИЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ДВУХСЕТОЧНОМ ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

Д.А. Горьковская, М.А. Мокеев, В.Н. Девятков, М.С. Воробьев,
Н.Н. Коваль, В.В. Недошивин

*Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,
diana191@inbox.ru, maks_mok@mail.ru, vlad@opee.hcei.tsc.ru,
vorobyovms@yandex.ru, koval@hcei.tsc.ru, nedoshivin_vlad@mail.ru*

Введение отрицательной обратной связи по току в ускоряющем промежутке при работе источника электронов с плазменным катодом триодного типа (в условиях двухсеточного управления током пучка) позволяет реализовать устойчивые режимы генерации электронного пучка с удовлетворительной воспроизводимостью импульсов тока пучка в широком диапазоне его мощности (до 5 МВт) за счет введения в конструкцию эмиттера пассивного элемента (резистора) между двумя его сетками. Экспериментально продемонстрировано, что при увеличении сопротивления отрицательной обратной связи наблюдается снижение тока в ускоряющем промежутке, но повышается управляемость и стабильность генерации электронного пучка, проявляющаяся в снижении количества электрических пробоев высоковольтного ускоряющего промежутка. Поступление ионов из анодной плазмы через ячейки дополнительной и эмиссионной сетки в пространство плазменного эмиттера приводит к появлению автосмещения потенциала на введенном резистивном элементе между эмиссионной и дополнительной сетками, приводящего к снижению тока эмиссии из плазменного катода. Данный механизм может быть использован при генерации электронного пучка для воспроизводимой модификации поверхности различных материалов, удовлетворяя потребности реального промышленного сектора.

Ключевые слова: дуговой разряд; плазменный катод; источник электронов; электронный пучок; пассивная отрицательная обратная связь; стабильность генерации.

USING PASSIVE RESISTIVE NEGATIVE FEEDBACK FOR STABLE ELECTRON BEAM GENERATION IN A TWO-GRID ELECTRON SOURCE WITH A PLASMA CATHODE

D.A. Gorkovskaya, M.A. Mokeev, V.N. Devyatkov, M.S. Vorobyov,
N.N. Koval, V.V. Nedoshivin

*Institute of High Current Electronics SB RAS,
2/3 Akademichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia,
diana191@inbox.ru, maks_mok@mail.ru, vlad@opee.hcei.tsc.ru,
vorobyovms@yandex.ru, koval@hcei.tsc.ru, nedoshivin_vlad@mail.ru*

The introduction of negative current feedback in the accelerating gap during operation of an electron source with a triode-type plasma cathode (under conditions of two-grid beam current control) makes it possible to realize stable modes of electron beam generation with satisfactory reproduction of beam current pulses in a wide range of its power (up to 5 MW) due to the introduction of isolation of the emitter of a passive element (resistor) between its two grids. It has been experimentally demonstrated that with an increase in negative feedback resistance, a decrease in current in the accelerating gap is observed, but the controllability and stability of electron beam generation increases, manifested in a decrease in the number of electrical breakdowns of the high-voltage accelerating gap. The influx of ions from the anode plasma through the cells of the additional and emission grid into the space of the plasma emitter leads to the appearance of an auto-displacement potential on the introduced resistive element between the emission

and additional grids, leading to a decrease in the emission current from the plasma cathode. This mechanism can be used in the generation of an electron beam for reproducible modification of the surface of various materials, meeting the needs of the real industrial sector.

Keywords: arc discharge; plasma cathode; electron source; electron beam; passive negative feedback; generation stability.

Введение

В условиях интенсивного развития источников электронов с плазменными катодами особое внимание уделяется электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка, как одному из важных факторов ответственных за стабильность и воспроизводимость результата модификации поверхности материалов. Среди наиболее распространённых способов повышения электрической прочности зазора являются: использование перераспределяющих электродов специальной формы [1], снижающих неоднородность пучка, или введение отрицательной обратной связи (ООС) по току в ускоряющем промежутке [2, 3].

В случае с жалюзийным перераспределяющим электродом, установленным в эмиссионную область источника электронов на основе дуги низкого давления, обеспечивалось замыкание потока ускоренных ионов, поступающих из анодной/пучковой плазмы. Под действием ионов, поступающих из анодной плазмы потенциал перераспределяющего электрода относительно катода, увеличивается, что приводит к переключению низкоэнергетических электронов из катодной плазмы на перераспределяющий электрод. Эта компенсация приводит к снижению тока эмиссии, что в свою очередь повышает электрическую прочность ускоряющего зазора и улучшает стабильность работы источника электронов. Из-за сравнительно низких значений ионного тока в ускоряющем промежутке по отношению к току дугового разряда, недостатком такого метода является невозможность отсечки больших токов эмиссии.

Целью данной работы является возможность введения пассивной отрицательной

обратной связи, повышающей стабильность генерации тока пучка, за счет отсечки не абсолютного значения эмиссионного тока, а его относительной величины путем самосогласованного запирающего автосмещения потенциала между сетками плазменного эмиттера.

Эксперимент и результаты

Эксперименты проводились на многодуговом источнике электронов, имеющим сеточное управление по току в ускоряющем промежутке (рис. 1) [4].

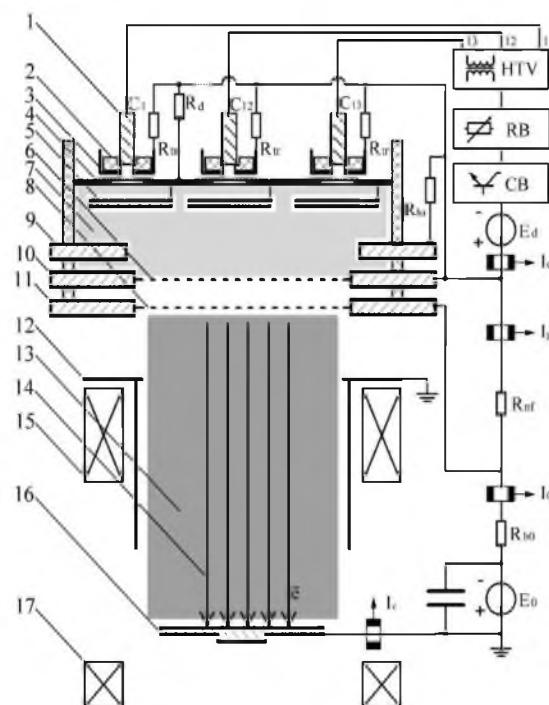


Рис. 1. Схема многодугового плазменного эмиттера с сеточным управлением, где 1 – катод, 2 – изолатор, 3 – поджигающий электрод, 4 – диафрагма, 5 – перераспределяющий электрод, 6 – эмиссионная сетка; 7 – эмиссионная (катодная) плазма; 8 – дополнительная сетка; 9 – промежуточный анод; 10 – анод; 11 – дополнительный анод; 12 – извлекающий электрод; 13 – пучковая (анодная) плазма; 14 – электронный пучок; 15, 17 – магнитные катушки; 16 – коллектор

Инициирование катодного пятна в многокатодном узле на каждом из 13 катодов 1 происходит при электрическом пробое по поверхности изолятора 2 между катодом 1 и поджигающим электродом 3 при помощи блока поджига НТВ. Электроды 4 также как токоперераспределяющие электроды 5 и промежуточный анод 9 подключены к анодному электроду 10, являющемуся общим анодом дуговых разрядов, через соответствующие сопротивления R_d и R_{ha} , которые обеспечивают переключение тока дугового разряда на анодный электрод 10. Дополнительный электрод 4 совместно с перераспределяющим электродом 5 помимо функции перераспределения тока разряда обеспечивает частичную стабилизацию тока в ускоряющем промежутке за счет введения отрицательной обратной связи по ионной компоненте тока, поступающей из ускоряющего промежутка в эмиттер через ячейки двух сеток 6 и 8 [2].

Характерные размеры плазменного эмиттера: внутренний диаметр изолятора 125 мм, расстояние от катодов до эмиссионной сетки – 80 мм. Для самосогласованного управления током электронного пучка торец полого анода был перекрыт дополнительной сеткой 8. Диаметр обеих сеток 6, 8 – 85 мм, размер ячеек обеих сеток – 0.14×0.14 мм, обе сетки из нержавеющей стали. Система электропитания разряда в эквиваленте представляет собой заряженную емкость, которая разряжается через блок резисторов RB, сопротивление которых можно динамически изменять в течение импульса тока разряда.

Введение сопротивления R_{nf} между эмиссионной и дополнительной сетками обеспечивает отрицательную обратную связь по току I_0 и обеспечивает повышение прочности ускоряющего промежутка, снижающее вероятность возникновения пробоя. На рисунке 2, 3 представлены осциллограммы токов при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи R_{nf} .

Сравнение осциллограмм, полученных

при сопротивлениях $R_{nf} = 1 \Omega$ и $R_{nf} = 0.5 \Omega$ демонстрирует отчетливый рост тока в ускоряющем промежутке I_0 при уменьшении сопротивления обратной связи. В эксперименте зафиксировано, что при неконтролируемом росте тока I_0 его часть замыкается через установленное сопротивление R_{nf} , создавая отрицательное падение потенциала на дополнительной сетке относительно эмиссионной. Это падение потенциала приводит к самосогласованному отрицательному автосмещению потенциала на дополнительной сетке, что, в свою очередь, снижает величину эмиссионного тока и ток в ускоряющем промежутке.

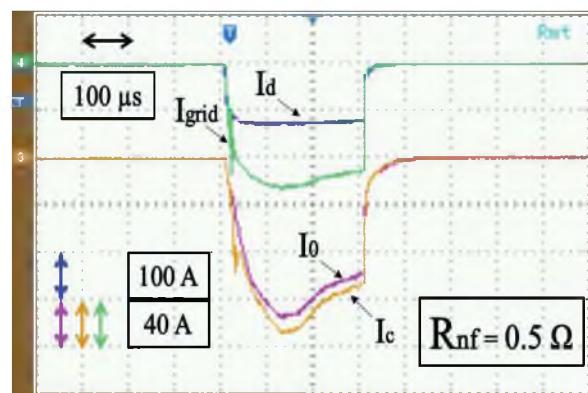


Рис. 2. Осциллограммы токов при сопротивлении $R_{nf} = 0.5 \Omega$

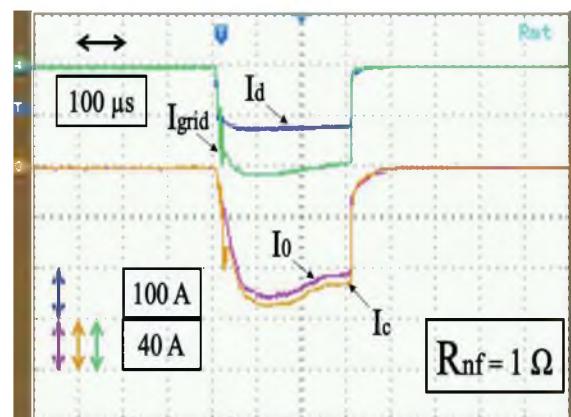


Рис. 3. Осциллограммы токов при сопротивлении $R_{nf} = 1 \Omega$

Заключение

Экспериментально продемонстрировано, что введение сопротивления между двумя сетками двухсеточного плазменного

эмиттера приводит к появлению на резисторе отрицательного автосмещения потенциала, приводящего к снижению тока эмиссии из плазменного катода. Данный механизм можно рассматривать как пассивную резистивную ООС, стабилизирующую ток в ускоряющем промежутке.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

Библиографические ссылки

1. Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. Эмиссионная электроника. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2009. 596 с.
2. Москвин П.В., Мокеев М.А., Воробьев М.С. и др. *ПЖТФ* 2025; 51(12): 11-14.
3. Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И. и др. *ЖТФ* 2022; 92(6): 883-888.
4. Девятков В.Н., Мокеев М.А., Воробьев М.С. и др. *ПЖТФ* 2024; 50(19): 25 -28.