

ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Р.А. Картавцов, М.С. Воробьев, А.А. Гришков, Н.Н. Коваль, М.А. Мокеев,
С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, П.В. Москвин, Д.А. Горьковская

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

Разработан новый подход к генерации высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), основанный на использовании разрядной системы с электродуговым сеточным плазменным катодом. Особенность представленной системы заключается в её способности к самоподдержанию разряда путем обеспечения требуемой величины рабочего давления за счёт термического испарения материала анода (коллектора) электронным пучком. Горение сильноточного ВТР обеспечивается одним источником питания, при этом протекание тока обеспечивается двумя разными процессами: первый обусловлен горением дугового разряда в сеточном плазменном катоде, где происходит испарение материала в зоне катодного пятна; второй – связан с испарением анода (коллектора), в ходе которого поддерживается требуемое давление в области дрейфа электронного пучка для горения ВТР. Такой подход открывает перспективы для создания новых источников электронов с высокими параметрами пучка и упрощённой схемой электропитания.

Ключевые слова: дуговой разряд; катодное пятно; сеточный плазменный катод; электронный пучок; анодная плазма; испарение анода.

HIGH-CURRENT HIGH-VOLTAGE GLOW DISCHARGE GENERATION

R.A. Kartavtsov, M.S. Vorobyov, A.A. Grishkov, N.N. Koval, M.A. Mokeev,
S.Yu. Doroshkevich, V.N. Devyatkov, P.V. Moskvin, D.A. Gorkovskaya

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

A new approach to generating a high-voltage glow discharge (HVGD) has been developed, based on the use of a discharge system with an arc-based gridded plasma cathode. The feature of this system lies in its ability to self-sustain the operating pressure due to thermal evaporation of the anode (collector) material under the impact of an electron beam. Initiation of the high-current HVGD is carried out using an electron beam generated in a system with a plasma emitter operating on a low-pressure arc discharge. When the temperature in the electron beam impact zone reaches the evaporation threshold of the collector material, the resulting pressure rise in the discharge chamber enables stable HVGD ignition. After this, the arc discharge power supply is turned off. The transition of the system to a self-sustained discharge mode is ensured by connecting a "short-circuiting" diode to the power circuit of the plasma emitter, which equalizes the potentials of the plasma emitter electrodes at the moment the arc power supply is deactivated. As a result, the discharge system of the plasma emitter transforms from an arc discharge hollow anode to a hollow cathode. Thus, stable HVGD operation is achieved using a single HV power supply, while current conduction in the system is supported by two physically distinct mechanisms. First, in the region of the plasma cathode, the cathode spot continues to operate, accompanied by localized cathode material evaporation. Second, in the drift space, the glow discharge is sustained by the vapors of the collector material ionized by the electron beam. Experimental current and voltage oscilloscopes confirm the possibility of stable self-sustained HVGD operation and the preservation of the cathode spot after the arc power supply is switched off. The current in the accelerating gap

was found to reach up to 100 A and sustain for 1 ms solely due to the HV power supply and emitter design. A new physical model of electron beam formation was proposed. This approach enables the development of high-performance electron sources with simplified power systems.

Keywords: Arc discharge; cathode spot; grided plasma cathode; electron beam; anode plasma; anode evaporation.

Введение

Многие технологические процессы, направленные на получение модифицированных поверхностных слоев или функциональных покрытий, требуют эффективного средства локального нагрева — электронного пучка [1]. Наиболее перспективными для материаловедческих применений являются источники электронов на основе высоковольтных тлеющих разрядов (ВТР). Они отличаются простой конструкцией, широким диапазоном регулируемых параметров пучка, высокой эффективностью при обработке тугоплавких, ферромагнитных и диэлектрических материалов, а также способностью устойчиво работать в условиях динамически изменяющегося рабочего давления вплоть до 100 Па [2, 3].

Однако широкому применению таких источников препятствуют определённые ограничения. В системах с холодными катодами плотность тока на катоде ограничивается склонностью разряда к переходу в дуговую форму. Это обуславливает необходимость использования катодов большого диаметра при проектировании мощных источников, что, в свою очередь, значительно увеличивает их габариты.

Альтернативой являются источники с плазменными катодами на основе дуговых и тлеющих разрядов, обеспечивающие высокую плотность энергии генерируемого электронного пучка. Однако реализация таких систем требует включения в схему электропитания дополнительного источника питания с высокой номинальной мощностью, необходимого для устойчивого горения вспомогательного разряда на протяжении всего импульса тока. При этом данный источник размещается под

высоким отрицательным потенциалом катода, что существенно усложняет конструкцию схемы питания и увеличивает общие энергетические затраты при эксплуатации устройства.

Цель работы: разработка источника электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда, обеспечивающего генерацию сильноточного электронного пучка субмиллисекундной длительности при питании от одного высоковольтного источника.

Эксперимент и обсуждение результатов

Для реализации этой идеи был выбран источник электронов «СОЛО» с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления [4]. Схема модернизированного источника электронов (рис. 1) отличается от конфигурации, представленной в [4] измененной электродной системой и схемой электропитания сеточного плазменного эмиттера.

Идея нового режима работы источника электронов «СОЛО» заключается в следующем. На первом этапе, при классическом режиме генерации электронного пучка ($p \approx 10^{-2}$ Па), за счет испарения материала коллектора обеспечивается величина давления, достаточная для поддержания самостоятельного ВТР ($p \geq 1$ Па). По достижении необходимой величины давления осуществляется отключение источника питания дугового разряда, сопровождающееся схемотехническим переходом плазменного эмиттера в режим пологого катода. В данном режиме устойчивое функционирование катодного пятна поддерживается за счёт высоковольтного источника электропитания. Генерация электронного пучка при этом реализуется в

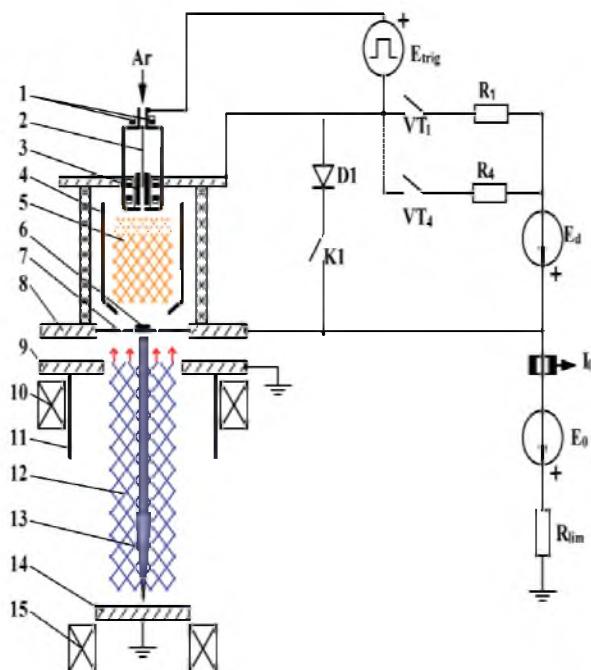


Рис. 1. Схема модернизированного источника электронов «СОЛО»: 1 – постоянные магниты; 2 – поджигающий электрод; 3 – катод дугового разряда плазменного катода; 4 – полый анод дугового разряда; 5 – катодная/эмиссионная плазма; 6 – металлический диск; 7 – эмиссионная сетка плазменного катода; 8 – эмиссионный электрод; 9 – извлекающий (ускоряющий) электрод; 10, 15 – катушки магнитного поля; 11 – труба дрейфа; 12 – анодная/пучковая плазма; 13 – электронный пучок; 14 – мишень/коллектор

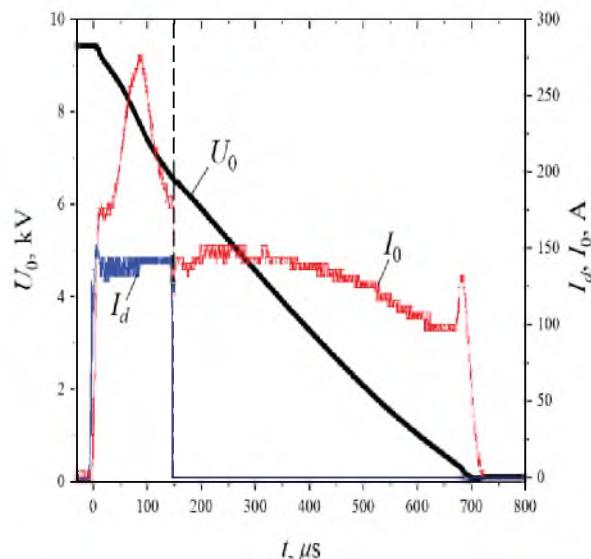


Рис. 2. Типичные осциллографмы инициирования и горения ВТР с электродуговым сеточным плазменным катодом ($p = 35$ мПа, $U_0 = 9.5$ кВ, $I_d = 140$ А)

самосогласованном режиме, параметры которого динамически формируются в зависимости от текущих условий плазмообразования в системе.

На рис. 2 представлены осциллографмы тока дугового разряда I_d , тока в ускоряющем промежутке I_0 и ускоряющего напряжения U_0 для модернизированного источника электронов.

Пунктирной линией обозначена граница между двумя режимами работы системы: слева ($I_d > 0$) – в этот момент дуговой разряд генерируется дополнительным источником питания и происходит испарение коллектора, обеспечивая необходимые условия для существования ВТР; справа ($I_d = 0$) – источник питания дугового разряда отключается, разрядная система плазменного эмиттера преобразуется в дуговой разряд с полым катодом и происходит зажигание и горение сильноточного ВТР. Генерация электронного пучка в режиме сильноточного самоподдерживающегося ВТР осуществлялась в течение 550 мкс и продолжалась вплоть до полного разряда высоковольтной конденсаторной батареи емкостью 12 мкФ.

Заключение

В исследуемом самоподдерживающемся ВТР реализуется нестандартный режим генерации электронного пучка, основанный на совмещении двух принципиально различных механизмов токопереноса. Первый механизм определяется термоавтоэлектронной эмиссией при дополнительной ионной бомбардировке, возникающей в плазменном катоде в зоне локализации катодного пятна.

Второй механизм связан с процессами испарения материала коллектора, их последующей ионизации электронным пучком, а также с ионно-электронной эмиссией на электродах сеточного плазменного катода.

Такая комбинация дугового и тлеющего разрядов свидетельствует о формировании

вании новой, ранее не исследуемой формы газового разряда, представляющей собой оригинальный способ генерации электронного пучка.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00745).

Библиографические ссылки

1. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхностей цветных металлов и сплавов. Томск: НТЛ; 2016. 312 с.
2. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А.. Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. Москва: Энергоатомиздат; 1989. 255 с.
3. Бурдовицин В.А., Климов А.С., Медовник А.В.. Окс Е.М., Юшков Ю.Г. Форвакумные плазменные источники электронов. Томск: Изд-во Томского ун-та; 2014, 288 с.
4. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. Generation and propagation of high-current low-energy electron beam. *Laser Particle Beams* 2003; 21(2): 243.