

Конструкция и рабочие характеристики электронного источника с полым катодом и несамостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом

В.И. Гушенец^{1,}, А.С. Бугаев¹, Е.М. Окс^{1,2}*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

^{*}*gvi@opee.hcei.tsc.ru*

Абстракт. В докладе представлены результаты исследований импульсных источников электронов (электронных пушек), разрядный механизм которых основан на несамостоятельном высоковольтном тлеющем разряде. Электронные пушки с несамостоятельным высоковольтным разрядом можно разделить на два основных типа: системы с чисто ионно-электронной эмиссией с массивного (зачастую плоского) катода, бомбардируемого ионами, и системы с полым катодом. В последнем типе электронной пушки плазма, которая генерируется внутри полого катода вследствие бомбардировки ионным пучком, действует как эмиттер электронного пучка. Источником бомбардирующих ионов является анодная плазма вспомогательного разряда. Ионы извлекаются из этой плазмы и ускоряются к катоду, имеющему высокий плавающий потенциал в несколько десятков кВ. Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются тем же полем по направлению к аноду. Анодная плазма, ее параметры, характер и устойчивость горения разряда является определяющими в работе электронного источника с ВТР, поэтому в докладе определенное внимание уделено генератору анодной плазмы, построенному на основе геометрии плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. С помощью зондовых методов исследования измерены основные локальные параметры анодной плазмы – температура электронов и концентрация ионов.

Ключевые слова: высоковольтный тлеющий разряд (ВТР), ускоритель с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП), анодная плазма, полый катод, ионно-электронная эмиссия.

1. Введение

Широкоапертурные источники электронов диодного типа на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) являются достаточно привлекательными для использования в ускорителях электронов, используемых как в научных исследованиях, так и технологических процессах из-за их компактности, простоты системы электропитания и высокой надежности. В таких источниках эмиссия электронов с массивного катода, часто имеющего плоскую поверхность, возникает под действием ионов из анодной плазмы, ускоренных к катоду высоким напряжением на диодном промежутке. Электроны этим же напряжением ускоряются в противоположном направлении (к аноду). Генерация анодной плазмы в источниках с несамостоятельным ВТР осуществляется дополнительным самостоятельным разрядом, в качестве которых используется в основном орбитронного типа тлеющий разряд и дуговой контрагированный разряд с расширенной анодной частью [1, 2].

Идея работы состояла в том, что вместо массивного (плоского) катода использовать полый катод. Как известно одним из свойств разряда с полым катодом является более высокая плотность тока по сравнению с диодным разрядным промежутком при одинаковых напряжениях на электродах. Были проведены сравнительные экспериментальные исследования двух типов источников электронов на основе несамостоятельного ВТР. Один из них представлял собой электронную пушку, в которой электроны появляются за счет только ионно-электронной эмиссии с плоского катода, выполненного из нержавеющей стали. Во втором источнике электронов вместо плоского катода использовался полый катод, в котором отверстие (эмиссионное окно), обращенное в сторону анода, было закрыто сеткой с высокой прозрачностью. Во втором типе источника генерация электронов осуществляется

как за счет ионно-электронной эмиссии, так и из плазмы, создаваемой внутри катодной полости.

Кроме того, приведены описание конструкции и некоторые результаты экспериментальных исследований работы генератора анодной плазмы. Анодная плазма как источник ионов является главным элементом электронного источника. Одна из основных проблем, возникающих при создании электронных источников с газоразрядными плазменными катодами и анодами, заключается в создании таких газовых условий, при которых осуществляется стабильное зажигание разряда, эффективная генерация эмитирующей плазмы и при этом исключается пробой ускоряющего промежутка [3]. В источниках на основе несамостоятельного ВТР решить эту проблему можно за счет использования высокоэффективных генераторов анодной плазмы, способных работать при более низком давлении плазмообразующего газа. К таким генераторам относятся устройства на основе разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Исходя из вышеизложенных соображений в качестве генератора анодной плазмы нами была использована газоразрядная система, разработанная на основе геометрии ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) с короткой зоной ускорения. Такие устройства отличаются высокой газовой эффективностью, вследствие того, что уход электронов из разрядной области затруднен влиянием магнитного поля. Благодаря этому устойчивое горения импульсного сильноточного разряда с током в несколько десятков ампер наблюдалось при давлении газа аргона начиная с $6 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Эта величина давления более чем на порядок ниже давления в генераторах плазмы на основе орбитронного разряда.

2. Экспериментальный макет и результаты исследований

На Рис.1 представлены схемы двух типов источников электронов на основе несамостоятельного высоковольтного разряда. Традиционный тип источника с чисто ионно-электронной эмиссией электронов с плоского массивного катода представлен на Рис.1а, а на Рис.1б приводится схема электронного источника с полым катодом. Как видно из приведенных схем конструктивно источники отличаются только геометрией катода. Плоский катод изготовлен из нержавеющей стали и имеет диаметр 62 мм. Полый катод выполнен из двух полых, вложенных друг в друга, цилиндров: собственно, полого катода 1 и эмиссионного электрода 2. Оба цилиндра изготовлены также из нержавеющей стали. Отверстие в эмиссионном электроде закрыто мелкоструктурной сеткой 3 с высокой прозрачностью и имеет диаметр как у плоского катода.

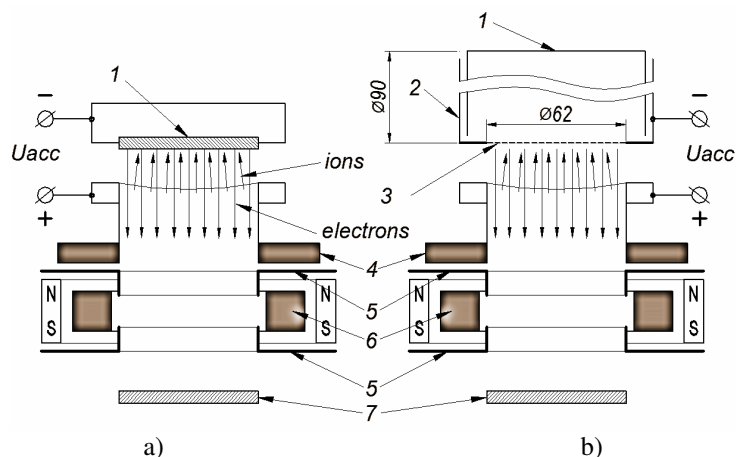


Рис.1. Схемы источников электронов с плоским массивным (а) и полым катодом (б). 1 – катод, 2 – эмиссионный электрод, 3 – эмиссионная сетка, 4 – ускоряющий электрод, 5 – магнитопроводы (они же катоды генератора плазмы (УЗДП)), 6 – анод УЗДП, 7 – коллектор.

В качестве генератора анодной плазмы используется плазмодинамическое устройство с геометрией кольцевого плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП). Данное устройство состоит из тороидального магнитопровода 5 со щелью на внутренней стенке, постоянных магнитов, смонтированных на внешней стенке тороида, и кольцевого анода 6. Магнитопровод одновременно является катодом УЗДП. Известно, что в плазменных ускорителях разряд существует в двух режимах – слаботочном высоковольтном режиме с коллимированным ионным пучком и сильноточном низковольтном режиме с рассеянным пучком (плазменный режим). Для генерации плотной анодной плазмы, являющейся источником ионов, наиболее подходящим является сильноточный режим работы разрядной системы УЗДП. Поскольку разряд в УЗДП является ведущим для основного высоковольтного несамостоятельного разряда, то характеристики УЗДП разряда, параметры сформированной анодной плазмы оказывают определяющее влияние на работу всего электронного источника.

Вольтамперная характеристика в плазменном режиме не представляет собой ничего интересного и является почти горизонтальной или медленно нарастающей. Напряжение горения в гораздо большей степени зависит от давления и рода рабочего газа, чем от разрядного тока, и в диапазоне рабочих давлений $p = (6-9) \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. меняется от 580 В до 380 В. Плавающий потенциал плазмы примерно на 100 В ниже потенциала анода (Рис.2). При заземленном катоде плазменного генератора потенциал плазмы составляет несколько сот вольт относительно земли.

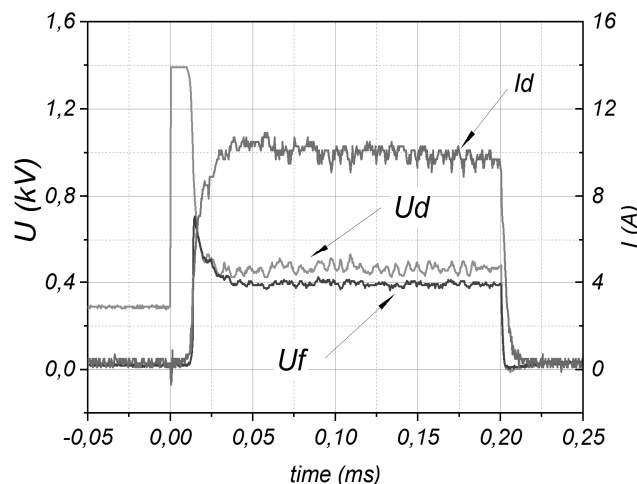


Рис.2. Осциллограммы напряжений на разрядном промежутке (U_d), плавающего потенциала (U_f) плазмы и тока разряда (I_d) УЗДП.

Ионный ток, регистрируемый на катоде в отсутствии высокого напряжения на промежутке катод-плазменный анод ($U_{acc} = 0$), достаточно хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от разрядного тока, при этом их отношение остается почти постоянным в широком диапазоне рабочих токов (Рис.3). Из приведенных на Рис.3 результатов следует, что анодная плазма является источником интенсивного ионного пучка с током до 2 А. Дальнейшее увеличение ионного тока (за счет увеличения разрядного тока) ограничено переходом разряда УЗДП в дуговую форму с контрагированным катодным пятном.

Граница анодной плазмы, сформированной плазмогенератором, не имеет стабилизирующего ее положения сеточного электрода, она открыта и подвижна. Положение границы определяется величиной ускоряющего напряжения и встречными потоками ионов и

электронов. Такой диод называется биполярным, из-за присутствия в ускоряющем промежутке встречных потоков заряженных частиц. Отсутствие сетки в ускоряющем электроде снижает потери электронного пучка процентов на 30%, а также значительно улучшает электрическую прочность ускоряющего промежутка [4].

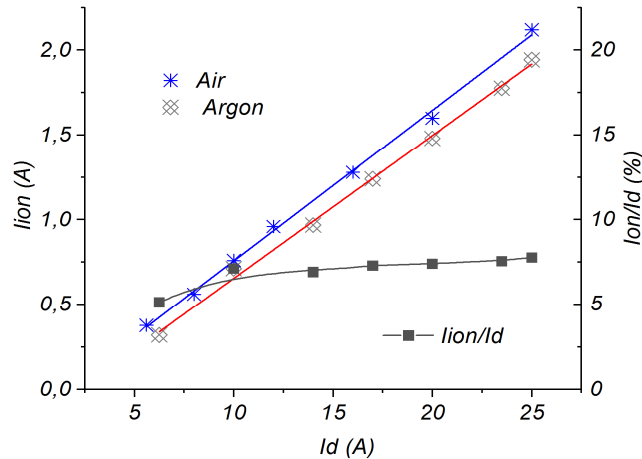


Рис.3. Зависимость ионного тока от величины разрядного тока УЗДП.

При помощи зондовых методов исследования определены основные локальные параметры анодной плазмы разряда – концентрация ионов, температура электронов, а также их пространственное распределение. Исследования параметров плазмы выполнялось с использованием методики двойного ленгмюровского зонда. Выбор данной методики измерения параметров плазмы связан с высоким потенциалом плазмы в несколько сот вольт и наличием магнитного поля в объеме, занятом плазмой. Система двойных зондов не связана гальванически с установкой, ей не требуется опорного электрода, и она может находиться под плавающим, в том числе достаточно высоким, потенциалом.

Плазма заполняет все внутреннее пространство УЗДП, а также свободно диффундирует как в направлении катода, так и коллектора. Так как генератор анодной плазмы симметричен относительно своих выходных апертур, то зондовые измерения были проведены только со стороны одной из выходных апертур, а именно в пространстве между апертурой генератора анодной плазмы и коллектором 7. Типичные вольтамперная характеристика двойного зонда представлены на Рис.4. Некоторые из полученных в результате обработки экспериментальных ВАХ зондов радиальные распределения концентрации плазмы в полулогарифмическом масштабе приведены на Рис.4б. По радиусу в пределах ± 20 мм относительно осевой линии плотность плазмы достаточно однородна. Как показали измерения ионного тока в потоке выходящей плазмы, выполненные с использованием секционированного коллектора с отсечкой электронной составляющей плазмы, распределение плотности тока по сечению практически равномерно. Температура электронной составляющей плазмы находится в пределах от 4 эВ до 6,5 эВ, и как видно из наклона зондовой характеристики в окрестности нуля напряжения (Рис.4) зависит от рода рабочего газа.

Исследования по генерации электронного пучка проводились при ускоряющих напряжениях $U_{acc} = 15\text{--}35$ кВ и токах разряда генератора анодной плазмы $I_d = 15\text{--}25$ А. Давление рабочего газа (в основном аргона) в области выходной апертуры УЗДП составляло $6,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Частота следования импульсов была не более 10 импульсов в секунду. Зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения для двух типов катода (плоского и полого катода) показаны на Рис.5.

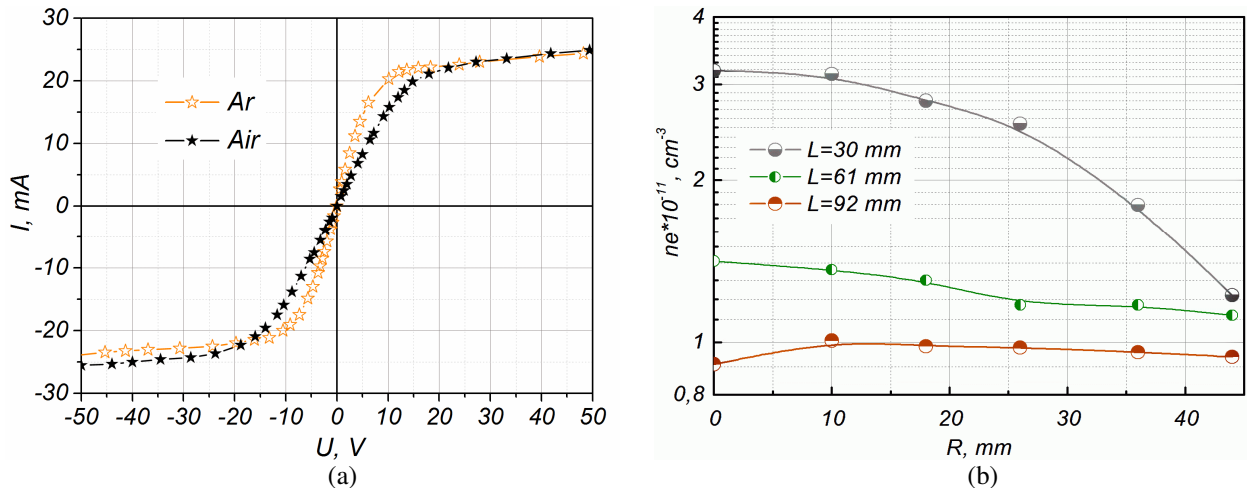


Рис. 4. Типичные зондовые вольтамперные характеристики (а) и радиальные распределения плотности анодной плазмы (б). L – расстояние от выходной апертуры генератора плазмы.

В этих экспериментах полый катод работал в так называемом «пассивном» режиме, когда катод соединен с эмиттерным электродом. Как видно из приведенных на рисунке результатов ток электронного пучка для варианта с полым катодом в среднем (во всем рабочем интервале ускоряющих напряжений) в два раза превышает ток пучка для варианта с плоским катодом. В обоих типах электронного источника ток пучка линейно зависит от ускоряющего напряжения, но темп нарастания тока для полого катода в полтора раза выше. Экспериментальные результаты показали, что ток электронного пучка растет и с увеличением прозрачности сетки в эмитсионном электроде. Так при использовании сетки с более высокой прозрачностью максимальные значения тока пучка увеличились с 7 А до 9.2–9.4 А.

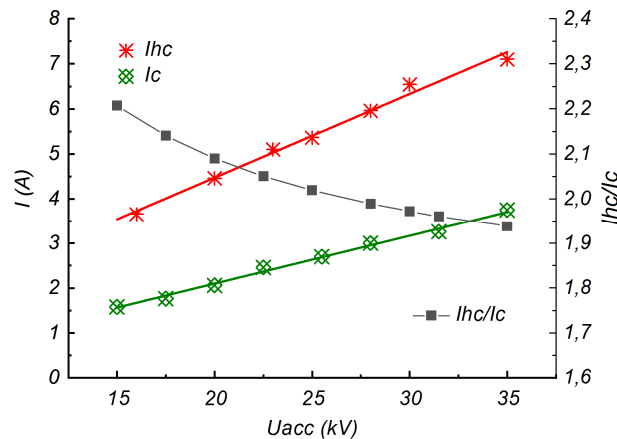


Рис.5. Зависимость токов электронного пучка от ускоряющего напряжения для двух типов электронного источника: I_{hc} – ток пучка с полым катодом, I_c – ток пучка с плоским катодом.

Ускоренный пучок электронов, пройдя через анодную плазму, вызывает рост ее концентрации, вследствие ионизации рабочего газа электронным ударом. Так при инъекции 7 амперного пучка концентрация плазмы на выходе из УЗДП вблизи границы электронного пучка почти удваивалась.

На Рис.6 приведены зависимости, отражающие связь между токами электронного пучка, коллектора и разряда в генераторе анодной плазмы при постоянном напряжении 30 кВ. Обе зависимости являются линейными.

Что касается потерь электронного пучка при прохождении им плазменного анода, которые можно охарактеризовать таким параметром как эффективность токопрохождения $\eta = (I_e - I_{col})/I_e$, то они увеличиваются пропорционально току разряда. В качестве коллектора в этих экспериментах использовался цилиндр Фарадея, с входным отверстием 2 см, и зависимость потерь от разрядного тока построена в предположении, что весь электронный ток регистрируется цилиндром. Последнее предположение соответствует действительности, так как рассеянным магнитным полем УЗДП электронный пучок сжимается до диаметра 15 мм. Недостаток экспериментальных результатов не позволяет установить причины снижения коллекторного тока и роста потерь электронного пучка.

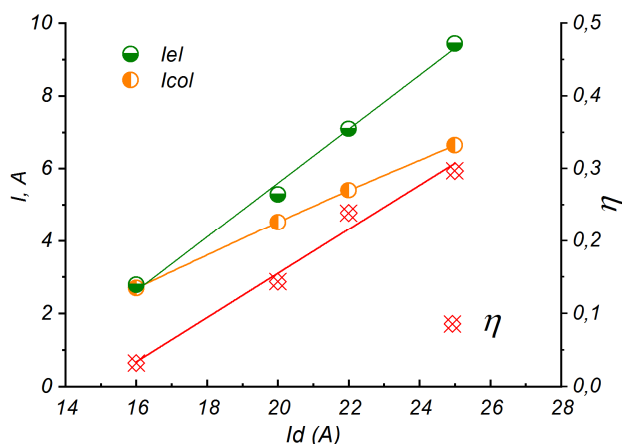


Рис.6. Зависимости токов электронного пучка I_{el} и коллектора I_{col} , а также потерь от разрядного тока.

3. Заключение

Как показали проведенные исследования импульсного источника электронов на основе несамостоятельного высоковольтного разряда ток электронного пучка увеличивается в среднем в два раза для системы с полым катодом по сравнению с источником с массивным плоским катодом. Поскольку разряд в генераторе анодной плазмы, построенном на основе геометрии ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП), является управляющим для высоковольтного разряда, то максимальная достигнутая величина тока электронного пучка (около 10 А) ограничена только током разряда в УЗДП.

Благодарности

Работа поддержана грантом FWRM-2021-0006 (0291-2021-0006) в рамках государственного задания по программе ФНИ СО РАН.

4. Литература

- [1] Косогоров С.Л., Успенский Н.А., Шведюк В.Я., Васеленок А.А., Джигайло И.Д., Смирнов Г.А., *Изв. высш. уч. зав. Физика*, **63**(10), 41, 2020; doi: 10.17223/00213411/63/10/41
- [2] Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М., *ЖТФ*, **55**(9), 1845, 1985.
- [3] Гаврилов Н.В., Завьялов М.А., Никулин С.П., Пономарев А.В., *Письма в ЖТФ*, **19**(21), 57, 1993; <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/16253>
- [4] Gushenets V.I., Bugaev A.S., Oks E.M., *Russ. Phys. J.*, **60**(9), 1515, 2019; doi: 10.1007/s11182-018-1244-6