

Вакуумна, плазмова та квантова електроніка

УДК 621.385

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.1.91391](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.1.91391)Дрозд И. М., OrcID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)[ua](#)Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫМ ПРИБОРОМ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ ЭЛЕКТРОНОВ

Рассмотрены физико-технические аспекты управления высоковольтным газоразрядным коммутирующим прибором низкого давления с помощью эмиттера электронов, образуемого поверхностью плазмы пускового разряда. Разряд магнетронного типа поддерживался в полости холодного катода прибора типа триоплазматрон, а плазменный эмиттер электронов формировался в отверстиях экрана, разделяющего катодную полость и анод. Применение катодного экрана и двухуровневых импульсов, подаваемых на управляющий электрод, расположенный в полости катода, снизило мощность управления по сравнению с приборами без экрана и позволило применять экран с малой электрической проницаемостью для ускорения восстановления электрической прочности триоплазматрона.

Библ. 9, рис. 4.

Ключевые слова: ключевой газоразрядный прибор, плазменный эмиттер электронов, триоплазматрон, холодный катод

Введение. В большинстве газоразрядных коммутирующих приборов низкого давления для перевода их из непроводящего в проводящее состояние используется инжекция иницирующих электронов в область анода, находящегося под высоким потенциалом относительно катода [1,2]. Затем проводящее состояние приборов поддерживается без участия иницирующих электронов за счёт самостоятельного газового разряда между анодом и катодом, эмитирующим свободные электроны. Катод может быть твёрдым телом и испускать электроны благодаря термоэлектронной эмиссии при нагреве либо испускать электроны в холодном состоянии за счёт вторичной ионно-электронной эмиссии. Генерация иницирующих электронов осуществляется с помощью пускового разряда, плазма которого служит источником электронов – плазменным эмиттером. В плазменных электронных пушках [3] плазменный эмиттер электронов (ПЭЭ) формируется газоразрядным устройством, генерирующим плазму, из которой электроны прямо или через отверстие в одном из электродов, или через систему отверстий, или через сеточный электрод летят в сторону ускоряющего анода. Аналогично должен строиться ПЭЭ в коммутирующих приборах. Цель настоящей статьи – рассмотреть способы фор-

мирования и особенности использования ПЭЭ как управляющего элемента высоковольтных коммутирующих приборов.

1. Реализация ПЭЭ в газоразрядных приборах (обзор и постановка задачи исследования). Для формирования ПЭЭ часть поверхности плазмы пускового разряда должна быть открыта в сторону анода, чтобы эмитированные плазмой электроны ускорялись электрическим полем анода и на пути к нему ионизовали газ. Образовавшиеся при этом ионы, ускоряются в сторону катода, они также ионизуют газ и искажают своим пространственным зарядом распределение электрического поля в промежутке между плазменным катодом и анодом, делая распределение поля более благоприятным для развития плазменного разряда на анод [1]. В результате ионизационных процессов газоразрядная плазма заполняет промежуток между главным катодом и анодом, и прибор отпирается, т. е. переходит в проводящее состояние. Длительность проводящего состояния определяется анодной цепью; после окончания импульса анодного тока и деионизации послеразрядной плазмы прибор переходит в непроводящее состояние.



Можно выделить два базовых способа формирования ПЭЭ: первый реализуется в приборах, анод которых не экранируется от основного катода, а второй – в приборах с экранирующим электродом между анодом и катодом. Первый способ формирования ПЭЭ характерен для приборов типа “игнитрон” и вакуумных разрядников тригatronного типа [1,4]. Для иллюстрации первого способа на рис. 1 показана упрощённая схема игнитрона с жидким ртутным катодом.

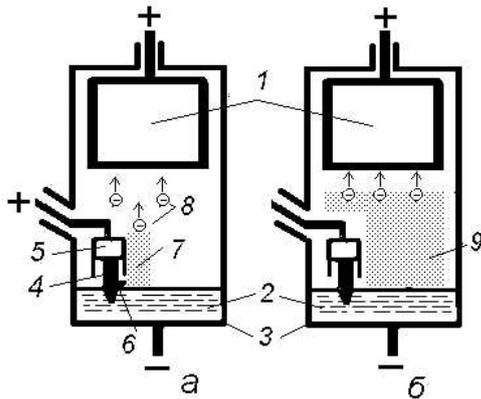


Рис. 1. Электродная структура игнитрона: а – в предразрядный пусковой период и б – в разрядный период – период проводимости (1 – анод; 2 – ртутный катод; 3 – оболочка; 4 – полупроводниковый поджигатель; 5 – контакт поджигателя (анод пускового разряда); 6 – катодное пятно пускового разряда; 7 – плазма пускового разряда; 8 – электроны, инициирующие разряд на анод; 9 – плазма разряда между катодом и анодом в период проводимости игнитрона)

В игнитроне для создания пускового разряда и, соответственно, ПЭЭ используется специальный стержневой электрод-поджигатель 4, опущенный в ртуть 2. Поджигатель изготавливается из крупнокристаллического полупроводникового материала на основе карбида бора, не смачиваемого ртутью. Расстояние d_{a-k} между анодом 1 и катодом 2 выбирается таким, чтобы при давлении p пара ртути при комнатной температуре самостоятельно не возникал разряд между электродами игнитрона. Для этого произведение pd_{a-k} должно быть меньше значений, определяемых левой ветвью кривой Пашена для коммутируемого анодного напряжения $U_{ком}$. Кривые Пашена – это экспериментальные графики зависимостей напряжения возникновения самостоятельного разряда между плоскими ненакаливаемыми (холодными) электродами U_b от величины pd (pd_{a-k}). На левой ветви U_b воз-

растает при уменьшении pd . Типичные величины $p \sim 0,1$ Па, $d_{a-k} \sim$ несколько сантиметров.

При подаче импульса положительного напряжения $\sim 0,5 - 3$ кВ на поджигатель 4 в месте его контакта с ртутью возникает катодное пятно 6 и развивается дуговой разряд между поджигателем 4, как анодом пускового разряда, и ртутным катодом 2 (рис. 1а). Ток разряда – несколько десятков ампер. Катодное пятно – это перегретая взрывообразными процессами микрообласть на поверхности катода, где имеет место термоавтоэлектронная эмиссия с высокой плотностью тока $\sim 10^5$ А/см². Пусковой разряд развивается в парах ртути. Локализованная вблизи поджигателя 4 газоразрядная плазма 7 играет роль ПЭЭ – эмиттера инициирующих электронов 8, ускоряемых к основному аноду 1 игнитрона. Эти электроны ионизируют газ вблизи анода 1 и инициируют развитие самостоятельного дугового разряда между анодом и непосредственно ртутным катодом 2 (рис. 1 б). Весь внутренний объём игнитрона заполняется плазмой 9, и он переходит в проводящее состояние. Длительность процесса – порядка микросекунд. На этом роль пускового ПЭЭ как поджигателя/инициатора заканчивается. После окончания импульса анодного тока происходит деионизация плазмы и игнитрон переходит в непроводящее состояние. Отметим, что в игнитроне пусковой ПЭЭ имеет “открытую” в сторону анода границу плазмы, а процессы развития разряда на анод аналогичны развитию разряда в газовом диоде с накаливаемым катодом из-за высокой эмиссионной способности катодных пятен на ртути. Этим процессам способствует образование “горба” в распределении потенциала между катодом и анодом, приводящему к осцилляциям электронов и увеличению длины их пробега до попадания на анод (см. ниже) [1].

Недостатком приборов с неэкранированным анодом является нежелательное прямое воздействие анодного поля и основного разряда на электроды ПЭЭ, что снижает электрическую прочность прибора и вызывает повреждения электродов ПЭЭ. Так, часто именно запыление, перегрев и даже разрушение поджигателя приводят к нарушению работы игнитрона. Эти недостатки устранены в приборах с экранирующим электродом между анодом и катодом. В таких приборах экранирующий электрод защищает электроды ПЭЭ от анодного поля. Базовые примеры формирования ПЭЭ в приборах данного типа приведены на рис. 2: а) в тиратроне с сеточным управлением и термокатодом, б) в тиратроне с холодным полым катодом

(псевдоискровом разряднике), в) триоплазматроне с холодным катодом [1,2, 5-9].

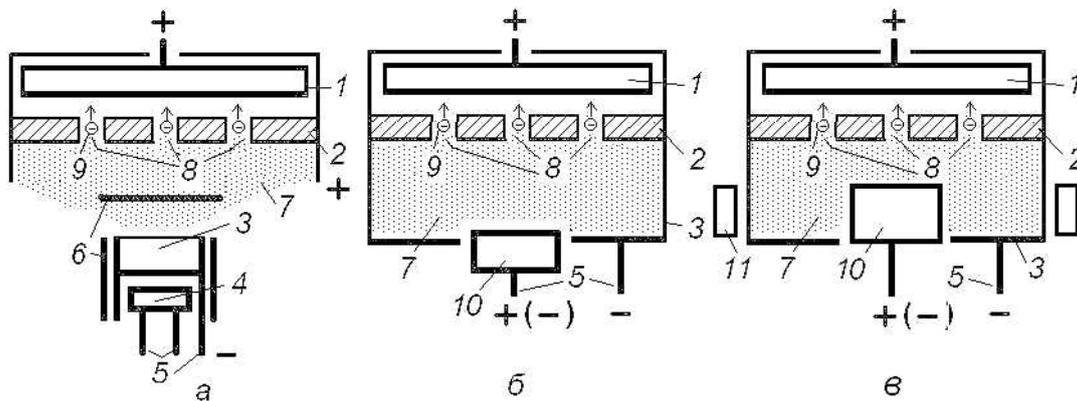


Рис. 2. Электродные структуры тиратрона с сеточным управлением и термокатодом (а), тиратрона с холодным полым катодом (б) и триоплазматрона с холодным катодом в осевом магнитном поле (в) в пусковой период (1 – анод; 2 – экранирующий электрод

[а – управляющая сетка, б, в – катодная (заземлённая) сетка-экран]; 3 – катод [а – термоэлектронный катод, б, в – холодный полый катод]; 4 – подогреватель термокатода; 5 – выводы электродов катодной части; 6 – экраны термокатода; 7 – плазма пускового разряда; 8 – плазменная поверхность, эмитирующая иницирующие электроны; 9 – электроны, иницирующие разряд на анод; 10 – управляющий электрод, 11 – кольцевой магнит)

Экранирующие электроды разделяют приборы на две части – анодную и катодную и обеспечивают высокое коммутируемое напряжение $U_{ком} = 1...25$ кВ и выше за счёт высокой электрической прочности приборов в непроводящем состоянии. Для этого величина $pd_{a-э}$ для промежутка “анод–экранирующий электрод” выбирается меньше значений, определяемых левой ветвью кривой Пашена для $U_{в} = U_{ком}$. Кроме того, отверстия в экранирующих электродах должны иметь малую электрическую проницаемость для того, чтобы электрическое поле анода не проникало в катодную часть приборов. Типичные величины $d_{a-э}$ и диаметра отверстий в экранирующих электродах D составляют несколько миллиметров. В высоковольтных приборах отверстия в экранирующих электродах создают лабиринт или имеют высоту $H = 3 \dots 10$ мм.

С катодной стороны экранирующих электродов величина $pd_{к-э}$ между электродами соответствует значениям минимума кривой Пашена, чтобы получить минимальное напряжение возникновения пускового разряда. Величина $d_{к-э}$ составляет несколько сантиметров.

При подаче напряжения на управляющие электроды в катодной части приборов развивается пусковой разряд с образованием плазмы 7 (рис. 2). Полярность управляющего напряжения зависит от конструкции приборов. В сеточных тиратронах на управляющие сетки подаётся

положительное напряжение, и сетки служат анодом пускового разряда (рис. 2а). В тиратронах с холодным полым катодом (псевдоискровых разрядниках) и триоплазматроне используется и отрицательное, и положительное управляющее напряжение в зависимости от конструкции катодной части и способа управления; соответственно, экранирующие электроды могут иметь либо анодный, либо катодный потенциал пускового разряда (рис. 2б, 2в). В любом случае, задача пускового разряда – сформировать в отверстиях экранирующих электродов плазменную поверхность, “открытую” в сторону анодов. Эта поверхность и будет служить ПЭЭ, эмитирующим электроны для иницирования разряда на анод. На рис. 2 схематично показаны пусковые ПЭЭ, образуемые плазменной поверхностью 8 в период иницирования электронами 9 разрядов на аноды. Отметим, что ток ПЭЭ является термоэмиссионным по своей природе и определяется по известной формуле для теплового тока электронов в плазме [3,10].

Из изложенного вытекает, что без формирования ПЭЭ электрическое поле анодов не может экстрагировать электроны из катодной части экранированных приборов и вызвать развитие разряда на аноды с переходом приборов в проводящее состояние. При создании же пускового разряда и диффузии плазмы этого разряда в отверстия в экранирующих электродах формируются ПЭЭ, способные эмитировать

електрони в область действия поля анодов. Таким образом, созданием временных ПЭЭ (на период отпирания коммутирующих приборов) нейтрализуется экранирующее действие экранирующих электродов.

По аналогии с плазменными электронными пушками экранирующие электроды коммутирующих приборов играют роль эмиттерного электрода, отверстия в экранирующих электродах – эмиссионных отверстий или каналов, а аноды – ускоряющего электрода [3,10]. В приборах, как и пушках, ток эмиссии ПЭЭ определяется параметрами плазмы, генерируемой в области эмиссионных отверстий, разностью потенциалов между плазмой и экранирующим электродом, размерами эмиссионных отверстий и напряженностью электрического поля анода. Также имеет место аналогия между формированием разряда на анод коммутирующих приборов и явлением переключения тока разряда-генератора плазмы с местного анода на ускоряющий электрод пушки [3,10].

Из вышеизложенного вытекает, что механизм плазменного управления газоразрядными коммутирующими приборами низкого давления вполне адекватно описывается в рамках концепции пускового ПЭЭ, обеспечивающего запуск прибора благодаря эмиссии иницирующих электронов в сторону анода через эмиссионные отверстия в экранирующем электроде. Для более детального изучения особенностей такого рода управления была поставлена задача исследовать работу таких приборов на примере триоплазматрона (рис. 2в). Триоплазматрон перспективен для применения в высоковольтной импульсной технике, так как способен коммутировать токи до 1 - 2 кА в режиме сверхплотного тлеющего разряда и до 100 кА в режиме вакуумной дуги при величине $U_{ком}$ до 25 кВ и выше. С другой стороны, он имеет большую конструктивную общность с другими типами экранированных приборов, и полученные результаты предполагаемого исследования будут полезны для широкого класса приборов.

2. Описание экспериментального оборудования. Эксперименты по исследованию особенностей управления газоразрядным прибором с ПЭЭ выполнялись на макетах триоплазматрона (рис. 2в). Макет представляет систему из катодной камеры и анодной камеры с плоским анодом, отделённых друг от друга катодным экраном (дисковым экранирующим электродом). Электроды катодной камеры представляли собой обращённый газоматрон с внешним цилиндрическим полым катодом

(\varnothing 48 мм) и внутренним управляющим электродом (\varnothing 16 мм), помещённый в продольное (осевое) магнитное поле (0,03 Т) постоянного магнита. Благодаря ортогональности электрического и магнитного полей в катодной камере было минимизировано падение напряжения на приборе в проводящий период (оно составляло несколько сотен вольт при токе в сотни ампер). Рабочий газ – водород при давлении $p = 10 - 50$ Па. Катодный экран был снабжён отверстиями; значения отношения толщины экрана H к диаметру отверстий D указаны ниже. Экран имел отдельный вывод, и его можно было присоединять к катоду (этот случай – обычный для триоплазматрона) или к источнику постоянного или импульсного напряжения. Катод был заземлён и его потенциал принимался равным нулю. На управляющий электрод подавалось положительное постоянное или импульсное напряжение (0,3 - 2 кВ) для создания в катодной камере магнетронного разряда, поверхность плазмы которого в области отверстий в катодном экране образовывала эмиттер электронов для анодной камеры. На анод подавалось положительное напряжение ($U_{ком} = 1 - 20$ кВ) от источника постоянного напряжения или от заряженной формирующей линии.

3. Результаты измерений и их обсуждение.

Была проведена серия экспериментов по определению величины тока эмиссии ПЭЭ (I_e), при которой возникает самостоятельный разряд на анод. В газоразрядной технике этот параметр часто именуют “анодным током зажигания”. Эксперименты были проведены на постоянном токе, поскольку в импульсном режиме точные измерения миллиамперных анодных токов при высоком анодном напряжении ($U_{ком}$) невозможны из-за наводок. Плотность тока ПЭЭ (j_e) определяли путём деления измеренного анодного тока “зажигания” (т.е. I_e) на половину суммарной площади отверстий в катодном экране. При этом предполагалось: а) величина ионного тока со стороны анода в ПЭЭ составляет малую часть от I_e из-за низкой вероятности ионизации газа плазменными электронами на пути к аноду; б) площадь поперечного сечения электронного потока через одно отверстие составляет около половины площади отверстия $0,25\pi D^2$ (основанием для этого предположения послужили результаты моделирования электронных траекторий и следы электронной бомбардировки на поверхности анода напротив отверстий).

В результате обработки данных измерений получили следующую формулу для значений плотности тока электронной эмиссии j_e , иници-



рующей разряд на анод при разных величинах D и H и потенциалах катодного экрана (включая нулевой) в диапазоне рабочих давлений при $U_{\text{ком}} = 10 \dots 20$ кВ:

$$j_e [\text{A}/\text{M}^2] \approx (0,5 \dots 5) / (\rho [\text{Па}] \times d_{a-э} [\text{M}]). \quad (1)$$

Количественно, j_e составляет несколько $\text{мА}/\text{см}^2$. Поскольку формирование ПЭЭ с заданной эмиссионной способностью требует генерации определённой концентрации плазмы и, соответственно, определённого тока пускового разряда, реализованный принцип запуска прибора можно назвать токовым.

Эксперименты показали, что запуск прибора с заземлённым катодным экраном путём резкого снижения напряжения управляющего электрода U_y или смены полярности с положительной на отрицательную происходит при меньшем токе пускового разряда I_y , чем при большом положительном U_y . Этот факт можно объяснить тем, что управляющий электрод своим положительным напряжением задаёт положительный потенциал плазмы пускового разряда и, соответственно, потенциал ПЭЭ $\varphi_{\text{пл}} > 0$ относительно экрана. В свою очередь положительный потенциал $\varphi_{\text{пл}}$ создаёт потенциальный барьер для эмиссии электронов в сторону анода и может запереть эмиссию; в этом случае уменьшение U_y или изменение полярности устраняет потенциальный барьер и запускает прибор, если ток эмиссии отвечает условию (1).

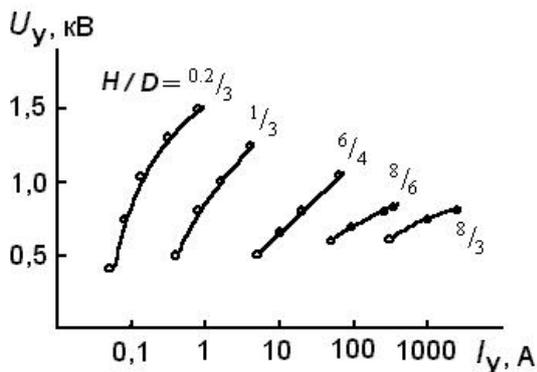


Рис.3. Характеристики управления прибором с заземлённым экраном в координатах $U_y - I_y$ при $U_{\text{ком}} = 15$ кВ и разном давлении водорода: кривая для $H/D = 8/3$ – 40 Па; кривые для $H/D = 8/6$ и $6,4$ – 32 Па; для остальных кривых – 12 Па

Для детального исследования данного вопроса были измерены характеристики запуска триоплазматрона, которые построены на рис. 3 в координатах $U_y - I_y$. Характеристики показывают, при каких значениях U_y и I_y возможен разряд на анод с напряжением 15 кВ. Отметим, что

данные характеристики не являются вольт-амперными характеристиками пускового разряда, т.е. U_y может быть резко снижено относительно напряжения поддержания пускового разряда для запуска триоплазматрона (это всегда осуществлялось при больших значениях H/D). Для проведения измерений применяли двухуровневые пусковые импульсы с регулировкой обоих уровней. Первым уровнем задавали ток I_y , а вторым – U_y . Таким образом, параметры U_y и I_y определяли в момент начала развития самостоятельного разряда на анод.

Выбор параметров U_y и I_y для отображения критериев запуска прибора основан на следующем. В реальных быстро меняющихся условиях импульсной работы невозможно измерить мгновенный потенциал ПЭЭ $\varphi_{\text{пл}}$ в отверстиях катодного экрана зондовым методом из-за сильных наводок, но в случае заземлённого экрана можно принять, что $\varphi_{\text{пл}}$ приблизительно равен U_y , когда $U_y > 0$. Плотность тока эмиссии ПЭЭ пропорциональна концентрации плазмы в отверстиях и, соответственно, примерно пропорциональна I_y .

Как видно, чем больше разность потенциалов между ПЭЭ и поверхностью экрана ($\varphi_{\text{пл}} \sim U_y$), тем при большей концентрации заряженных частиц ($\sim I_y$) плазма пускового разряда (т.е. ПЭЭ) открывается в сторону анода. При токе пускового разряда меньше I_y ионные оболочки перекрывают отверстия в экране и не пропускают плазменные электроны к аноду. Известно, что толщина ионной оболочки $l_{об}$ при низких давлениях газа может быть рассчитана по уравнению “степени 3/2”, если известна плотность ионного тока j_i на стенки отверстий. Качественно, это уравнение указывает на зависимость $I_y \sim U_y^{3/2}$, что близко к тому, что наблюдается в эксперименте. Ниже мы вернёмся к вопросу об определении параметра $l_{об}$.

Графики на рис. 3 приведены для макетов приборов, отличающихся аспектными отношениями для отверстий в катодном экране (отношениями высоты отверстий H к их диаметрам D). При увеличении H/D , с одной стороны, снижается электрическая проницаемость отверстий для проникновения электрического поля анода к ПЭЭ, а с другой стороны, уменьшаются концентрация заряженных частиц и плотность ионного тока j_i по мере диффузии плазмы пускового разряда в глубокие отверстия из-за рекомбинации частиц на стенках отверстий. В результате при увеличении H/D для формирования ПЭЭ с плотностью тока эмиссии j_e в отверстиях экрана требуется существенное повышение тока пускового разряда I_y .

Были также измерены характеристики восстановления электрической прочности (ВЭП) триоплазмотронов в послеразрядный период и были построены характеристики ВЭП в тех же координатах $U_y - I_y$. Интересно отметить, что эти характеристики аналогичны приведенным на рис. 3. Это свидетельствует о том, что послеразрядная плазма в катодной камере также формирует ПЭЭ в отверстиях и можно управлять электрической прочностью приборов в послеразрядный период, регулируя $\varphi_{пл}$ выбором соответствующего значения U_y . Ток I_y в этом случае является мерой послеразрядной концентрации плазмы в катодной камере в момент ВЭП того напряжения, для которого снята характеристика $U_y - I_y$. Для привязки характери-

стик $U_y - I_y$ к процессу ВЭП на временной шкале измерялась характеристика деионизации послеразрядной плазмы, т.е. спада тока I_y во времени, используя управляющий электрод в качестве плазменного зонда.

Для обсуждения и интерпретации результатов измерений построим качественные схемы формирования ПЭЭ в отверстиях экрана, соединённого с катодом, и распределения потенциалов в плазменно-эмиссионной системе. Подобные схемы неоднократно применялись для анализа процессов в электронно-лучевых источниках (пушках) с плазменным катодом [2]. Искомые схемы приведены на рис. 4.

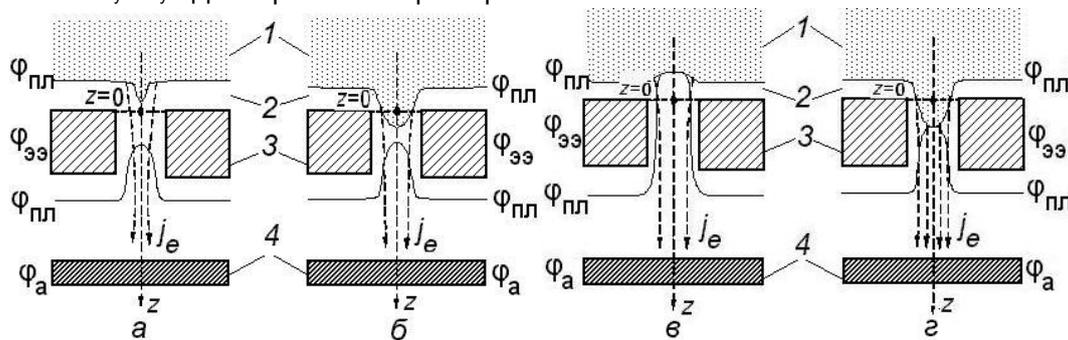


Рис. 4. Формирование ПЭЭ: 1 – плазма пускового разряда; 2 – ионная оболочка; 3 – катодный экран (эмиттерный электрод); 4 – анод; $\varphi_{пл}$ – потенциал плазмы; $\varphi_{эз}$ – потенциал экрана (эмиттерного электрода); φ_a – потенциал анода

Плазма пускового разряда $\varphi_{пл} > \varphi_{эз}$, поэтому плазма и, соответственно, ПЭЭ отделены от катодного экрана ионной оболочкой. Толщину бесстолкновительной ионной оболочки можно определить с помощью формулы Бома и уравнения “степени 3/2”, соответственно, для плотности ионного тока из плазмы и в слое пространственного заряда в приближении плоской геометрии оболочки [10]:

$$0,4en_i \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{U_{об}^{3/2}}{l_{об}^2}, \quad (2)$$

где Плазма пускового разряда $\varphi_{пл} > \varphi_{эз}$, поэтому плазма и, соответственно, ПЭЭ отделены от катодного экрана ионной оболочкой. Толщину бесстолкновительной ионной оболочки можно определить с помощью формулы Бома и уравнения “степени 3/2”, соответственно, для плотности ионного тока из плазмы и в слое пространственного заряда в приближении плоской геометрии оболочки [10]:

$$0,4en_i \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}} = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{U_{об}^{3/2}}{2\pi r_{пл} r_{отв} \beta^2 (r_{отв} / r_{пл})}, \quad (3)$$

где $r_{пл}$ и $r_{отв}$ – радиусы ПЭЭ и эмиссионного отверстия ($r_{отв} = D/2$, $l_{об} = r_{отв} - r_{пл}$); $\beta^2(r_{отв}/r_{пл})$ – табулированная функция. Проникновение электрического поля в эмиссионное отверстие можно оценить по уравнению (4) [10]

$$\varphi_z \approx 0,267 \frac{r_{отв}}{d_{a-э}} U_{ком} \exp\left(-2,36 \frac{H-z}{r_{отв}}\right), \quad (4)$$

где φ_z – потенциал на оси отверстия с координатой z ; $U_{ком}$ – коммутируемое (анодное) напряжение; z – осевая координата, которая отсчитывается от поверхности экрана (эмиттерного электрода) со стороны ПЭЭ (рис. 4).

Уменьшение концентрации заряженных частиц по мере диффузии плазмы пускового разряда в глубокие отверстия из-за рекомбинации частиц на их стенках приводит к утолщению ионной оболочки и состоянию полного перекрытия отверстия слоем ионного пространственно-

го заряда. Условие “коллапса” плазмы, ограничивающее глубину её проникновения в канал, можно записать в виде [10]:

$$r_{\text{пл}} \leq 0,3r_{\text{отв}} \text{ или } I_{\text{об}} = 0,7r_{\text{отв}}. \quad (5)$$

Чем выше концентрация плазмы (больше ток пускового разряда) и меньше разность $\varphi_{\text{пл}} - \varphi_{\text{эз}} = U_{\text{об}}$, тем тоньше оболочка, и плазма глубже проникает в отверстие экрана (ср. рис. 4а и рис. 4б, рис. 4в и рис. 4г). Если поле анода неглубоко проникает в отверстие и не создаёт ускоряющего поля для плазменных электронов вблизи ПЭЭ, и более того, формируется потенциальный барьер для выхода электронов из ПЭЭ, запуск прибора не возможен (см. рис. 4а и рис. 4б, где между эквипотенциалами $\varphi = \varphi_{\text{пл}}$ имеется минимум φ). Однако при увеличении анодного напряжения (рис. 4в) или тока пускового разряда (рис. 4г) эквипотенциаль $\varphi = \varphi_{\text{пл}}$ со стороны анода может достигать поверхности ПЭЭ, и тогда к аноду пойдёт поток эмитированных плазмой электронов. Анод будет перехватывать часть электронов из плазмы пускового разряда просто как электрический зонд с положительным потенциалом, но если плотность анодного тока j_e будет отвечать условию (1), то разовьётся самостоятельный разряд на анод, ток которого будет определяться анодной цепью, а не цепью пускового разряда.

Очевидно, что для завершения формирования самостоятельного разряда необходимо образование плазменного столба, соединяющего анод с плазмой в катодной камере. Расчёты показывают, что в газовом диоде при небольших значениях $pd = pd_{a-э}$ и плотности тока j_e в несколько мА/см^2 в соответствии с условием (1) плазма в анодном промежутке не может образовываться из-за слишком малой концентрации ионов, генерируемых электронами, идущими к аноду. Отсюда возникает вопрос, почему всё же достаточно j_e в несколько мА/см^2 для развития самостоятельного разряда на анод в триоплазматроне. Для разрешения этого вопроса рассмотрим механизм формирования плазменного разряда в коротких ускоряющих промежутках при низком давлении газа, когда средняя длина свободного пробега электронов для ионизации превышает длину промежутка.

Теоретически данный вопрос анализировался в работах разных авторов, начиная с И. Лэнгмюра; также отметим работы Т.А. Ворончева, Ю.Д. Королёва, К.Н. Ульянова, В.С. Болдасова, А.И. Кузьмичёва и многих других (см. ссылки в [1,2,10]). Анализ с учётом ионизации газа электронами и тяжёлыми частицами (ионами и нейтралами после перезарядки

ионов) показал, что характеристики ионизационных процессов в анодном промежутке различаются для давлений выше и ниже определённой критической величины $p_{\text{кр}}$. Величина $p_{\text{кр}}$ зависит от рода газа, промежутка $d_{a-э}$ и величины анодного напряжения $U_{\text{ком}}$. Чем выше $U_{\text{ком}}$, тем больше $p_{\text{кр}}$, поскольку ионизация газа электронами в рабочем диапазоне p является определяющим процессом, а сечение ионизации ими снижается с ростом энергии электронов.

При $p < p_{\text{кр}}$ в промежутке преобладает отрицательный пространственный заряд (электроны генерируют мало ионов), образование плазмы и “электрический пробой” промежутка не возможны. При давлении $p > p_{\text{кр}}$ ионизация газа более заметная, но при малом токе эмиссии электронов с катода положительный пространственный заряд в промежутке не велик и плазма не образуется. Однако при увеличении тока эмиссии электронов с катода до значения близкого к предельному току вакуумного диода по закону “степени 3/2” в промежутке накапливается достаточно много ионов из-за их малой подвижности по сравнению с подвижностью электронов. При определённом токе происходит инверсия направления поля в промежутке и нарушается монотонное распределение потенциала. Образуется “горб” потенциала, который способствует осцилляциям вторичных электронов в промежутке (их задержке в области “горба” и неуходу на анод, как это происходит с прямопролётными катодными электронами), ионизации газа осциллирующими электронами и накоплению заряженных частиц в промежутке. Образуется прианодная плазма, постепенно заполняющая весь промежуток. В итоге, анод начинает работать как электрод самостоятельного разряда, электрически соединяющего источник анодного напряжения с нагрузкой. Такое явление часто называют “электрическим пробоем” анодного промежутка. Описанный механизм требует плотности тока эмиссии электронов в единицы-десятки А/см^2 , что на много порядков больше j_e по условию (1). Отметим, что этот механизм характерен для приборов с неэкранированным анодом.

Тем не менее, этот механизм можно применить и к нашему случаю, если допустить, что приход ионов из анодного промежутка к ПЭЭ способен вызвать увеличение электронной эмиссии. Тогда даже при малом значении тока j_e начнёт осуществляться ионное стимулирование электронной эмиссии, которое приведёт к нарастанию ионного тока к ПЭЭ и т.д. Таким образом, проявление механизма положительной обратной связи в плазменно-эмиссионной

системе может привести к такому росту анодного тока, при котором начнёт действовать ранее описанный ионизационный механизм с образованием “горба” потенциала в промежутке и осцилляцией вторичных электронов.

Итак, пусть будет $\rho > \rho_{кр}$ и существует в отверстии экранирующего электрода некоторый потенциальный барьер U_6 для эмитируемых плазмой электронов. Тогда, если увеличение тока эмиссии плазменного катода j_e приводит к повышению ионного тока к ПЭЭ из анодного промежутка и электрического поля $|E_3|$ вблизи ПЭЭ, и это в свою очередь снижает потенциальный барьер U_6 , то будет происходить дальнейший подъём тока эмиссии j_e и дальнейшее снижение потенциального барьера U_6 . В этом заключается положительная обратная связь, необходимая для необратимого развития событий, приводящих к возникновению плазмы в анодном промежутке и его “пробоем”. Отсюда условие “пробоя” можно записать в следующем виде:

$$(\partial j_e / \partial U_6)(\partial U_6 / \partial j_e) > 1. \quad (6)$$

Для формализации связи величины потенциального барьера U_6 с напряжённостью поля E_3 используем линейный закон в соответствии с формулой для коэффициента усиления триода в системе “ПЭЭ–катодный экран–анод”. Ток эмиссии плазмы через потенциальный барьер определим по уравнению Больцмана. В результате получаем выражение для условия включения прибора с пусковым плазменным эмиттером:

$$A(e/kT_e)j_e \partial(E_3 / \partial j_e) = 1, \quad (7)$$

где A – коэффициент, зависящий от геометрии отверстия в экран. Величина $\partial E_3 / \partial j_e$ определяется численным решением системы кинетических уравнений для заряженных частиц совместно с уравнением Пуассона. Из выражения (7) видно, что пробой имеет место при определённом токе эмиссии j_e , а так как $\partial E_3 / \partial j_e$ возрастает при увеличении давления в области $\rho > \rho_{кр}$, то j_e снижается с ростом давления, что соответствует опытным данным. Рассчитанные значения j_e составляют несколько миллиампер на квадратный сантиметр, что также согласуется по порядку величины с экспериментом. Если предполагать, что приход ионов к ПЭЭ не стимулирует повышение тока электронной эмиссии, то плотность тока, при которой образуется плазма, должна быть на несколько порядков больше.

Инжекция ионов в плазму ПЭЭ со стороны анода также приводит к локальному повышению

концентрации плазмы в отверстии экрана и тока электронной эмиссии, что можно трактовать как ионно-электронную эмиссию плазмы. Согласно данным работы [11] коэффициент этого вида эмиссии составляет несколько единиц. Кроме того, повышение концентрации заряженных частиц вблизи ПЭЭ перемещает границу плазмы ближе к аноду, что в свою очередь повышает $|E_3|$. Описанные эффекты стимулируют процесс роста анодного тока на несколько порядков по величине вплоть до образования прианодной плазмы, а она приблизит анодный потенциал к входу в отверстие и окончательно завершится процесс образования плазменного столба, соединяющего анод с плазмой в катодной камере.

Когда экранирующий электрод имеет анодный потенциал пускового разряда, потенциальный барьер U_6 не велик (несколько вольт), его влияние не существенно, а управляющий ток I_y – минимальный. Такой режим управления – присущий для импульсных водородных тиратронов с положительной управляющей сеткой. Он наблюдался и в триоплазматроне, когда катодный экран был отсоединён от катода, и он использовался как анод пускового разряда.

Однако когда экран имеет полный или частичный потенциал катода пускового разряда, указанный барьер составляет сотни вольт и запирает эмиссию электронов к аноду. Это типичная ситуация для приборов с заземлённой (или катодной) сеткой. При этом образуются достаточно толстые слои положительного пространственного заряда (ионные оболочки), перекрывающие отверстия в экране. В этом случае ток пускового разряда должен создать повышенную концентрацию заряженных частиц, чтобы сделать ионные оболочки тонкими и открыть доступ плазменным электронам к аноду. Ясно, что при таком способе управления ток пускового разряда I_y и мощность управления прибором должны быть больше, чем в случае с анодным потенциалом экрана.

Можно поставить вопрос, в чём заключается польза от такого включения катодного экрана и способа управления? Ответ будет следующим.

Во-первых, задержка отпирания прибора, связанная с накоплением повышенной концентрации заряженных частиц в катодной камере прибора, приведёт к тому, что будет гораздо большим ток электронной эмиссии ПЭЭ в момент разрыва ионной оболочки в отверстиях экрана и уменьшится время образования плотной плазмы в анодной части прибора и его перехода из непроводящего в проводящее состояние (т.е. уменьшится время отпирания/комму-

тации). Такой приём нашёл применение в псевдоискровых разрядниках и некоторых сеточных тиратронах.

Во-вторых, можно существенно снизить периодическую нестабильность включения коммутирующего прибора, время коммутации и мощность управления, используя биполярное управление потенциалом плазмы пускового разряда. В этом способе управления наращивание концентрации заряженных частиц происходит при положительном потенциале плазмы относительно экрана, а включение прибора – при резком переходе с положительного потенциала управляющего электрода на отрицательный или нулевой, при котором потенциал плазмы становится близким к катодному, и ПЭЭ открывается к аноду и эмитирует в его сторону большое количество иницирующих электронов.

В-третьих, можно снизить время ВЭП до нескольких микросекунд и обеспечить работу приборов при высоких частотах повторения импульсов.

Выводы. Таким образом, в работе выполнен физико-технический анализ концепции плазменного эмиттера электронов применительно к высоковольтным газоразрядным коммутирующим приборам низкого давления. Рассмотрены варианты конструкторской реализации плазменного эмиттера. Представлен на примере триоплазматрона механизм электрического управления с помощью ПЭЭ на этапе запуска прибора, а также на этапе восстановления его послеразрядной электрической прочности.

Показано, что применение электродной системы с катодным экраном и двухуровневых, в частности, биполярных импульсов, подаваемых на управляющий электрод, расположенный в полости катода, существенно снижает мощность управления и обеспечивает при этом более быстрое восстановление электрической прочности в послеразрядный период по сравнению с приборами с незранированным анодом.

Выражаю благодарность Кузьмичёву Анатолию Иванович за помощь в проведении экспериментов и расчётов и обсуждение полученных результатов.

Надійшла до редакції 30 січня 2017 р.

Литература:

1. Бочков В. Д. Импульсные газоразрядные коммутирующие приборы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том: в 4-х кн. – Кн. IV. / В. Д. Бочков, Ю. Д. Королёв. – М.: Наука, 2000. – Раздел XI.6. – С. 446-459.
2. MURI Consortium on Compact, Portable Pulsed Power [Electronic resource]. – Mode of access: <https://megaslides.com/doc/5117349/super-emissive-cathode-switches---electrobionics>. – Last access: 2017.
3. Oks E. M. Plasma Cathode Electron Source – Physics, Technology, Applications / E. M. Oks. – Weinheim: Wiley-VCH, 2006. – 172 p.
4. Hu S. An Experimental Investigation on Initial Plasma Characteristics of Triggered Vacuum Switch / S. Hu, X. Yao, J. Chen // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2012. – Vol. 40. – No. 8. – P. 2009–2013. – DOI [10.1109/TPS.2012.2201507](https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2201507).
5. Landl N. V. [External triggering of cold cathode thyatron in the system with blocking electrodes / N. V. Landl; Y. D. Korolev; O. B. Frants; I. A. Shemyakin; V. G. Geyman](#) // Proc. XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – IEEE, 2014. – P. 373–376. – DOI: [10.1109/DEIV.2014.6961697](https://doi.org/10.1109/DEIV.2014.6961697).
6. Lateef K. New Design and Construction of High-Voltage High-Current Pseudospark Switch / K. Lateef, B. Hamad, A. Ahmad // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2015. – Vol. 43. – No. 2. – P. 625–628. – DOI: [10.1109/TPS.2014.2379702](https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2379702).
7. Pathania V. Switching Behavior of a Double Gap Pseudospark Discharge / V. Pathania, D. K. Pal, B. L. Meena, N. Kumar, U. N. Pal, R. Prakash and H. Rahaman // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – Vol. 22. – No. 6. – P. 3299–3304. – DOI: [10.1109/TDEI.2015.004983](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004983).
8. Huang Z. [Electron emission characteristics of BaTiO3 surface flashover trigger device of pseudospark switch / Z. Huang, X. Yao, J. Chen, A. Qiu](#) // Proc. Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS). – IEEE, 2016. – P. 97. – DOI: [10.1109/PLASMA.2016.7534034](https://doi.org/10.1109/PLASMA.2016.7534034).
9. Kumar N. Analysis of Experimental Results on Pseudospark Discharge-Based Electron Beams With Simulation Model / N. Kumar, A. S. Jadon, P. Shukla, U. N. Pal, R. Prakash // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2017. – Vol. 45. – No. 3. – P. 405–411. – DOI: [10.1109/TPS.2017.2662068](https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2662068).
10. Кузьмичёв А. И. Плазменные эмиттеры источников заряженных и нейтральных частиц / А. И. Кузьмичёв, Н. А. Бабинов, А. А. Лисенков. – К.: Аверс, 2016. – 181 с.



11. Барченко В.Т. Исследование характеристик плазменного катода, ограниченного проводящей стенкой / В. Т. Барченко, Д. К. Кострин, А. И. Кузьмичёв // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2014. – № 9. – С. 23–29. – URL: http://www.eltech.ru/assets/files/Izvestia_9_2014.pdf.

УДК 621.385

Дрозд І. М., OrCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)

[ua](#)

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ГАЗОРОЗРЯДНИМ ПРИЛАДОМ З ПЛАЗМОВИМ ЕМІТЕРОМ ЕЛЕКТРОНІВ

Розглянуті фізико-технічні аспекти керування високовольтним газорозрядним комутуючим приладом низького тиску за допомогою емітера електронів, утвореного поверхнею плазми пускового розряду. Розряд магнетронного типу підтримувався в порожнині холодного катода приладу типу тріоплазматрон, а плазмовий емітер електронів формувався в отворах екрану, який розділяє катод та анод. Застосування катодного екрану та дворівневих імпульсів, що подаються на керуючий електрод, розташований в порожнині катода, знизило потужність керування в порівнянні з приладами без екрану та дозволило застосовувати екран з малою електричною проникністю для прискорення відновлення електричної міцності тріоплазматрона.

Бібл. 9, рис. 4.

Ключові слова: ключовий газорозрядний прилад, плазмовий емітер електронів, тріоплазматрон, холодний катод

UDC 621.385

Droz I. M., OrCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)

[ua](#)

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”

THE CONTROL FEATURES OF THE GAS DISCHARGE TUBE WITH PLASMA ELECTRON EMITTER

The physical and technical control features of the high-voltage gas-discharge low-pressure switch tube with an electron emitter, formed by the plasma surface of starting discharge, are considered. The discharge of magnetron type was maintained in a cold cathode cavity of the trioplasmatron tube, and the plasma electron emitter was formed in openings of the screen, separating the cathode cavity and an anode. The use of the cathode screen and two-level pulses applied to a control electrode, disposed in the cathode cavity, reduced the control power as compared to tubes without the screen and allowed to use the screen with low electrical penetration to accelerate the recovery of hold-off voltage of the trioplasmatron.

Ref. 9, Fig. 4.

Key words: switch gas-discharge tube, plasma electron emitter, trioplasmatron, cold cathode

Reference

- [1]. V. D. Bochkov, Y. D. Korolyov, “Pulse Gas Discharge Switches,” in *Encyclopedia of Low Temperature Plasma. Introduction Volume*, book 4. Moscow: Nauka, 2000, sec. XI.6, pp. 446–459. (Rus.)
- [2]. MURI Consortium on Compact, Portable Pulsed Power [Online]. – Available: <https://megaslides.com/doc/5117349/super-emissive-cathode-switches---electrobionics>. – Accessed on: Apr. 15, 2017.
- [3]. E. M. Oks, *Plasma Cathode Electron Source – Physics, Technology, Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.



- [4]. S. Hu, X. Yao, and J. Chen, "An Experimental Investigation on Initial Plasma Characteristics of Triggered Vacuum Switch," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, vol. 40, no. 8, pp. 2009–2013, Aug. 2012. DOI: [10.1109/TPS.2012.2201507](https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2201507).
- [5]. [N. V. Landi](#); [Y. D. Korolev](#); [O. B. Frants](#); [I. A. Shemyakin](#); and [V. G. Geyman](#), "External triggering of cold cathode thyatron in the system with blocking electrodes," in *Proc. XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Mumbai, India, Sept.-Oct. 2014, pp. 373–376. DOI: [10.1109/DEIV.2014.6961697](https://doi.org/10.1109/DEIV.2014.6961697).
- [6]. K. Lateef, B. Hamad, and A. Ahmad, "New Design and Construction of High-Voltage High-Current Pseudospark Switch," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 625–628, Feb. 2015. DOI: [10.1109/TPS.2014.2379702](https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2379702).
- [7]. V. Pathania, D. K. Pal, B. L. Meena, N. Kumar, U. N. Pal, R. Prakash, and H. Rahaman, "Switching Behavior of a Double Gap Pseudospark Discharge," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 6, pp. 3299–3304, Dec. 2015. DOI: [10.1109/TDEI.2015.004983](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004983).
- [8]. [Z. Huang](#), [X. Yao](#), [J. Chen](#), and [A. Qiu](#), "Electron emission characteristics of BaTiO₃ surface flashover trigger device of pseudospark switch," in *Proc. Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS)*, Banff, Alberta, Canada, June 2016, p. 97. DOI: [10.1109/PLASMA.2016.7534034](https://doi.org/10.1109/PLASMA.2016.7534034).
- [9]. N. Kumar, A. S. Jadon, P. Shukla, U. N. Pal, and R. Prakash, "Analysis of Experimental Results on Pseudospark Discharge-Based Electron Beams With Simulation Model," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, vol. 45, no. 3, pp. 405–411, Mar. 2017. DOI: [10.1109/TPS.2017.2662068](https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2662068).
- [10]. A. I. Kuzmichev, N. A. Babinov, A. A. Lisenkov, *Plasma Emitters of Charged and Neutral Particles Sources*, Kiev: Avers, 2016. (Rus.)
- [11]. V. T. Barchenko, D. K. Kostrin, and A. I. Kuzmichev, "Research of Characteristics of the Plasma Cathode Bounded by a Conductive Wall," *Bull. Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"*, no. 9, pp. 23–29, 2014. [Online]. Available: http://www.eltech.ru/assets/files/lzvestia_9_2014.pdf. (Rus.)