

УДК 537.533; 533.9.03; 621.384

В. А. Груздев, В. Г. Залесский, Д. А. Антонович, Ю. П. Голубев**ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С ПУЧКОМ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ**

Представлены конструкция и характеристики плазменного источника электронов на основе разряда в скрепленных ЕХН полях, обеспечивающего формирование технологических высокоэнергетичных пучков большого сечения в стационарном и импульсном режимах. Рассмотрены условия возбуждения сильнооточного аномального тлеющего разряда, формирующего эмитирующую плазму в импульсном режиме.

Электронно-лучевые технологии относятся к перспективным энерго- и ресурсосберегающим технологиям, обеспечивают высокое качество изделий, а иногда являются единственным способом изготовления деталей. Известен ряд методов получения высокоэнергетичных электронных пучков: на основе термоэлектронной эмиссии (термокатодные пушки) [1], взрывной эмиссии [2], извлечения заряженных частиц из плазмы аномальных тлеющих или дуговых разрядов (плазменные источники электронов – ПИЭЛ) [3], с использованием высоковольтных тлеющих разрядов (ВТР) [4]. Наибольшее распространение, в частности, для электронно-лучевой сварки получили термокатодные пушки, обеспечивающие сфокусированные электронные пучки в широком диапазоне мощности. Однако технологический ресурс таких пушек невелик (до 50–100 ампер-часов), сравнительно высока их себестоимость вследствие применения редких металлов, а также сложной технологии сборки.

В ПИЭЛ недостатки, присущие термокатодным пушкам, отсутствуют, поэтому они могут рассматриваться в ряде случаев как эффективная альтернатива термокатодным пушкам [5, 6]. В наибольшей степени преимущества ПИЭЛ проявляются в тяжелых вакуумных условиях и при формировании электронных пучков большого сечения, необходимых для однородной обработки электронным пучком больших поверхностей [3, 5, 6]. Поэтому для электронно-лучевых технологий упрочнения и других видов термической модификации больших поверхностей, сопровождающихся обычно существенным газоотделением, целесообразно применение ПИЭЛ.

Управление характеристиками термического воздействия электронного пучка на материалы обеспечивается вариацией плотности мощности пучка и времени воздействия [1, 7]. Поэтому в экспериментах по разработке новых технологий целесообразно применение универсальных источников электронов, способных работать в стационарном и импульсном режимах и обеспечивать электронные пучки в широком диапазоне плотности мощности.

Опыт показывает [3, 6], что в технологических ПИЭЛ предпочтительно использование генераторов эмитирующей плазмы на основе низковольтных аномальных тлеющих разрядов. Такие генераторы обеспечивают большой ресурс, достаточно равномерное распределение плотности тока по сечению в пучках большого сечения, а также более высокую стабильность параметров пучка в сравнении с дуговыми [3, 8] или высоковольтными тлеющими разрядами [4].

Ниже представлены конструкция разработанного источника электронов на основе аномального тлеющего разряда в скрепленных ЕХН полях и его параметры в стационарном и импульсном режимах. Приведены результаты анализа физических процессов в источнике, способствующих повышению плотности мощности электронного пучка и расширению диапазона рабочих давлений источника.

Конструкция плазменного источника электронов. Электродная структура разработанного ПИЭЛ (рис. 1) построена на базе ПИЭЛ [9], предназначенного для формирования сфокусированных электронных пучков. На высоковольтном изоляторе 1 устанавливается блок электродов газоразрядной структуры: внешний 2 и внутренний 3 катоды из стали, анод 4 из меди, расширитель (экспандер) эмитирующей плазмы 5 с сеткой 6, формирующей эмитирующую границу плазмы. В теле анода 4 имеются специальные пазы, в которые устанавливаются постоянные магниты (на рисунке не показаны), обеспечивающие магнитное поле с радиальной индукцией 0.06–0.08 Тл между катодами 2, 3. В области сеточного электрода 6 магнитное поле ослаблено настолько, что траектория эмитируемых из плазмы электронов в области сетки и промежутке ускорения определяется в основном электрическим полем. Напуск плазмообразующего газа (в экспериментах – воздуха) в газоразрядную структуру осуществляется через каналы во внутреннем катоде 3. В области выхода газа из каналов создается локально повышенное давление газа. Это, с одной стороны, обеспечивает устойчивое зажигание и горение разряда в широком диапазоне рабочих давлений 10^{-4} – 10^{-2} мм рт.ст., а с другой – создает неоднородность плотности плазмы в межкатодном пространстве.

Формирование эмитирующей поверхности большой площади в источнике электронов осуществляется с помощью пассивного расширителя (экспандера) эмитирующей плазмы площадью сечения до 20 см² [3, 6].

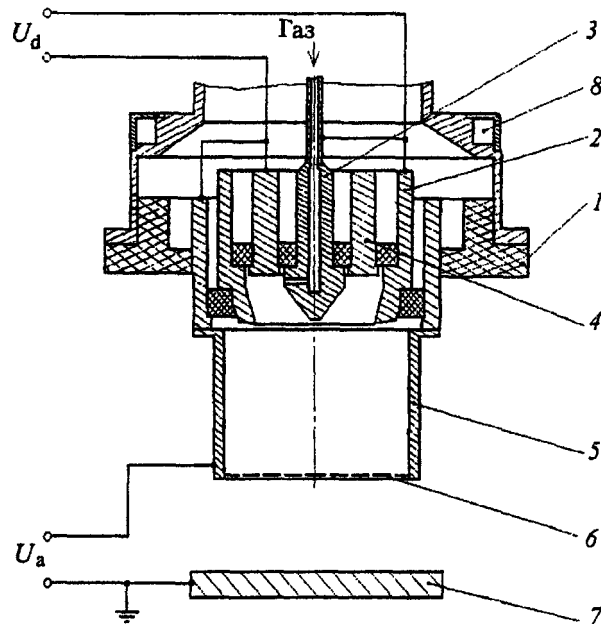


Рис. 1. Экспериментальная электродная структура: 1 - высоковольтный изолятор; 2 - внешний катод; 3 - внутренний катод; 4 - анод; 5 - экспандер; 6 - сетка; 7 - обрабатываемое изделие; 8 - полость водяного охлаждения

Поэтому интенсивные ионизационные процессы реализуются главным образом только в части газоразрядной структуры источника с радиальным магнитным полем, а пассивный экспандер выполняет в основном функцию ограничения диффундирующей в него плазмы и обеспечивает формирование эмитирующей поверхности требуемой площади.

Длина экспандера оптимизировалась экспериментально с использованием зондовых измерений параметров плазмы на основе двух критериев. Во-первых, плотность плазмы в экспандере в области сеточного эмиттерного электрода должна быть максимально высокой с целью увеличения плотности тока в пучке. Этот критерий требует минимизации длины экспандера, поскольку, как показали эксперименты, с ростом ее плотность плазмы в области сетки значительно снижается. В частности, при длине экспандера, равной его диаметру, плотность плазмы в области сетки почти на порядок ниже, чем на входе в экспандер. Во-вторых, распределение плотности плазмы по сечению в области сеточного электрода должно быть достаточно равномерным. Поэтому длина экспандера должна быть достаточно большой для выравнивания плотности плазмы в процессе ее диффузии к сеточному электроду. Экспериментально установлено, что удовлетворительные плотность тока в пучке и его равномерность обеспечиваются при длине экспандера от 0.5 до 0.8 его диаметра. Кроме того, для повышения равномерности плотности тока в пучке использованы электронно-оптические свойства ускоряющего промежутка. В частности, при заглаблении сеточного электрода в экспандер в прикатодной области промежутка ускорения возникает электрическое поле, обеспечивающее снижение расходимости пучка в его периферийной области. Оптимальное заглабление сеточного электрода в экспандер составляет 0.05–0.1 диаметра последнего.

В качестве ускоряющего электрода в экспериментах использовалась металлическая пластина, моделирующая поверхность обрабатываемого электронным пучком изделия 7 (рис. 1), поскольку применение специального ускоряющего электрода-сетки сопровождается высокой тепловой нагрузкой на нее и снижает плотность мощности в электронном пучке. Установлено, что в диапазоне давления 10^{-3} – 10^{-2} мм рт.ст. у поверхности, взаимодействующей с электронным пучком, возникает слой вторичной плазмы [10, 11]. При этом все ускоряющее напряжение прикладывается к двойному электрическому слою между сеточным электродом и вторичной плазмой, а толщина слоя вторичной плазмы оказывается достаточной, чтобы покрыть возможный рельеф обрабатываемой пучком поверхности. В результате возможный рельеф обрабатываемой поверхности не оказывает существенного влияния на распределение плотности тока в пучке.

Характеристики разряда и параметры плазмы. Эмиссионный ток ПИЭЛ I_e определяется в итоге током формируемого разряда I_d и эффективностью переключения α его электронной компоненты в ускоряющий промежуток [5, 6], которая зависит, в частности, от коэффициента прозрачности сеточного эмиттерного электрода ξ . Для формирования и стабилизации эмитирующей поверхности плазмы большой площади [12, 13] исследовались сеточные электроды с различной геометрической прозрачностью. Эксперименты показали, что коэффициент прозрачности ξ эмиттерного электрода существенно влияет на эффективность переключения α электронной компоненты тока разряда в ускоряющий промежуток ($\alpha = I_e/I_d$), а также, хотя и в меньшей степени, на ток разряда и параметры плазмы.

Значительные различия свойств разряда установлены также между режимом его стационарного горения и режимом коротких импульсов.

Вольт-амперные характеристики разряда в стационарном режиме представлены на рис. 2. Хотя в экспериментах использовались редкие сетки, влияние их прозрачности ξ на ВАХ разряда оказалось достаточно ощутимым. Это обусловлено, по-видимому, тем, что для исследуемой газоразрядной структуры, как

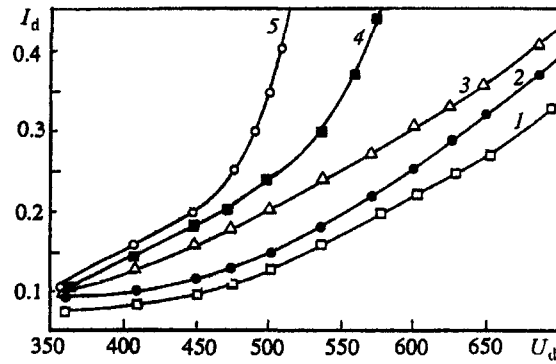


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда: 1 – система с открытым эмиттерным электродом; 2 – $\xi = 0.64$; 3 – сетка двойная, $\xi = 0.64$; 4 – сетка, $\xi = 0.44$; 5 – эмиссионный канал в виде одиночного отверстия диаметром 3 мм; 1–4 – $p = 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.; 5 – 10^{-3} . $Q = 600$ атм·см³/ч. I_d , А; U_d , В

и для других структур с осцилляцией электронов [3], используемый диапазон давлений оказывается переходным от низковольтной к высоковольтным формам разряда, в котором зависимость тока разряда от давления значительна. При одинаковом напуске газа в зависимости от коэффициента прозрачности ξ сеточного электрода формируется градиент давления между газоразрядной структурой и технологической вакуумной камерой. Поэтому с уменьшением коэффициента прозрачности давление плазмообразующего газа в структуре повышается и крутизна вольт-амперной характеристики растет (рис. 2). Максимальному давлению в газоразрядной камере в наших экспериментах соответствует кривая 5. Такое давление удается реализовать при напуске рабочего газа, допустимом для использованной системы вакуумирования технологической камеры, и удовлетворительной прозрачности сеточного электрода ξ . В отсутствие сеточного электрода возбуждение разряда возможно только при высоких значениях напуска плазмообразующего газа и давлении в технологической камере, неприемлемом для осуществления высоковольтного ускорения электронного пучка.

Из характеристик разряда следует, что в области допустимых расходов плазмообразующего газа и давления величины напряжения горения разряда U_d приемлемы с точки зрения мощности, затрачиваемой на формирование эмитирующей плазмы. Напряжение зажигания разряда при этом не превышало $(1.5-2)U_d$, что также приемлемо с точки зрения коэффициента полезного действия источника питания разряда. Предельно высокий ток разряда в стационарном режиме ограничен переходом разряда в дуговой режим и составляет 1.5–2 А в исследованных условиях.

Импульсный режим разряда исследовался с целью достижения максимально высокой плотности тока эмиссии на стадии тлеющей формы разряда до перехода его в дуговую форму. Вакуумные условия импульсного разряда были одинаковы с условиями стационарного режима горения. Электропитание разряда осуществлялось от искусственной формирующей линии (LC-линии) с регулируемым напряжением зарядки. На рис. 3 приведена типичная осциллограмма тока разряда.

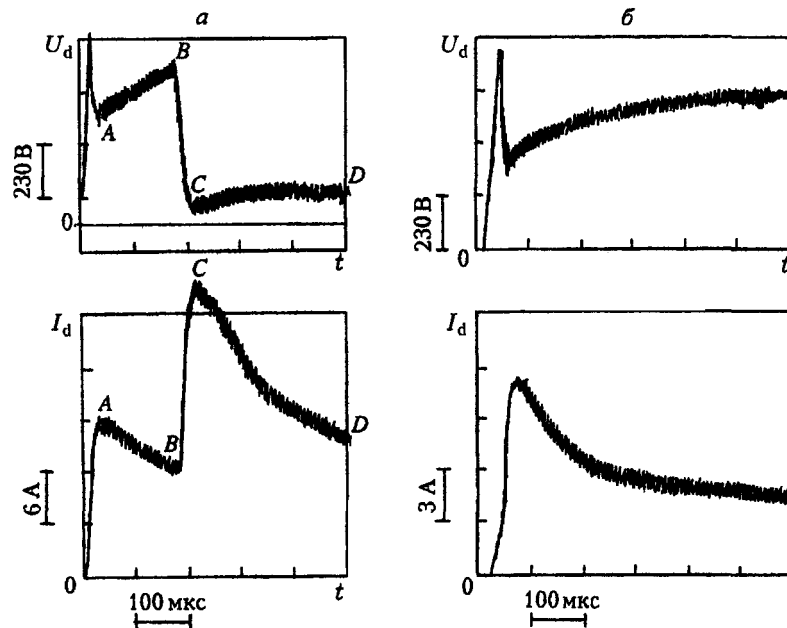


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения горения и тока разряда: а – тлеющий разряд (область АВ), переходящий в дуговую стадию (область CD); б – тлеющий разряд без перехода в дугу

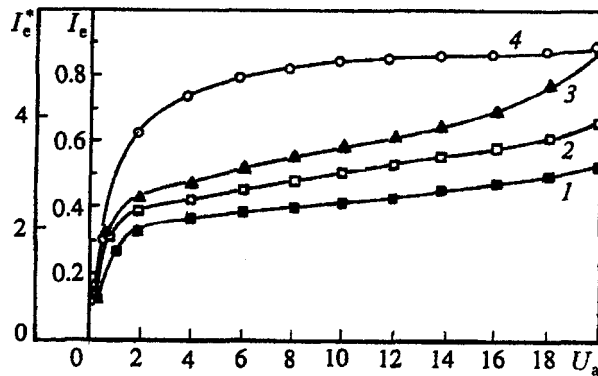


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики извлечения: 1, 2, 3 – в стационарном режиме – I_e : 1 – $I_{d0} = 150$ мА; 2, 3 – $I_{d0} = 200$ мА; 1, 2 – $Q = 720$ атм·см³/ч; 3 – $Q = 850$ атм·см³/ч; 1, 2, 3 – $\xi = 0.472$; 4 – в импульсном режиме – I_e^* : $I_{d0} = 11$ А; $p_0 = 10^{-3}$ мм рт.ст., $Q = 630$ атм·см³/ч. I_e , А; U_a , кВ

При сравнительно высоком напряжении зарядки искусственной формирующей линии и малом балластном сопротивлении R_b (ограничивающем ток разряда) наблюдаются две стадии разряда (рис. 3, а): участок AB осциллограммы тока соответствует режиму объемного тлеющего разряда, а участок CD – дуговому режиму разряда. При снижении напряжения зарядки или увеличении балластного сопротивления R_b переход в дуговой режим не происходит (рис. 3, б), если величина тока разряда на стадии AB не превышает 12–15 А.

Характерной особенностью импульсного разряда, как видно из осциллограммы, является то, что снижение тока разряда после его зажигания сопровождается повышением напряжения горения. Кроме того, амплитуда тока разряда на участке AB слабо зависит от давления в разрядной камере в диапазоне $6 \cdot 10^{-4}$ – $4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. и в 5–7 раз превосходит предельное значение тока разряда в стационарном режиме. Эти особенности начальной стадии импульсного разряда (участок AB осциллограммы) можно объяснить "вспышкой" давления в разрядной камере за счет десорбции молекул газа с рабочей поверхности катодов под действием ионного тока, возникающего при зажигании разряда. Как показали оценки, в приближении мономолекулярного адсорбированного слоя газа на катодных поверхностях амплитуда "вспышки" давления может достигать величины $p_m \approx 10^{-1}$ мм рт.ст. Поэтому за счет "вспышки" давления амплитуда тока разряда в импульсном режиме должна превышать ток стационарного режима примерно в p_m/p_0 раз, т.е. на порядок, а также не должна зависеть от напуска плазмообразующего газа и давления в источнике p_0 . Согласно оценкам, время нарастания давления в объеме разрядной камеры за счет десорбции при энергии десорбирующихся молекул, соответствующей $T = 300$ К, не превышает десятка микросекунд. Время формирования мономолекулярного адсорбированного слоя по оценкам составляет единицы миллисекунд. Его можно рассматривать как минимальный промежуток времени между импульсами, при котором величина тока от импульса к импульсу будет сохраняться постоянной.

С целью синхронизации импульсов тока с импульсами разрядного напряжения (для исключения неконтролируемого времени запаздывания зажигания разряда) использовался стационарный слаботочный иницирующий разряд. При токе иницирующего разряда 0.05–0.1 А амплитуда импульсного тока приближается к току в стационарном режиме при аналогичном напряжении горения. Влияние тока иницирующего разряда на амплитуду тока импульсного разряда не наблюдается при иницирующем разряде с током менее 50 мкА, а запаздывание зажигания импульсного разряда практически отсутствует. Существенную зависимость тока разряда в импульсе от тока иницирующего стационарного разряда можно рассматривать также как подтверждение механизма формирования импульсного разряда в начальной его стадии в десорбированном с поверхности электродов газе.

Параметры эмитирующей плазмы определялись с помощью плоских зондов, установленных в плоскости сеточного эмиттерного электрода. Концентрация плазмы определялась по ионному току насыщения зондов и составила: в стационарном режиме 10^{16} – $5 \cdot 10^{16}$ м⁻³, в импульсном 10^{17} – $5 \cdot 10^{17}$ м⁻³ в зависимости от тока разряда и давления плазмообразующего газа. Неравномерность концентрации плазмы по радиусу экспандера не превышает 10%. Электронная температура рассчитывалась по "плавающему" потенциалу зонда [14], а также по углу наклона электронной ветви вольт-амперной характеристики зонда [15]. В стационарном режиме ее величина составила 4–6 эВ, в импульсном – 5–7 эВ.

Эмиссионные характеристики источника. Вольт-амперные характеристики $I_e(U_a)$ (рис. 4) имеют типичный для ПИЭЛ вид с наличием характерной области квазинасыщения тока эмиссии I_e при ускоряющем напряжении больше некоторой величины, обеспечивающей напряженность поля в ускоряющем промежутке, достаточную для компенсации тормозящего электроны плазмы поля пристеночного ионного слоя в ячейках эмиттерного сеточного электрода. На участке квазинасыщения отношение эмиссионного тока к току разряда соответствует величине коэффициента ξ прозрачности эмиттерного электрода (рис. 4). При сравнительно высоком давлении в промежутке ускорения в области ускоряющего электрода формируется вторичная плазма

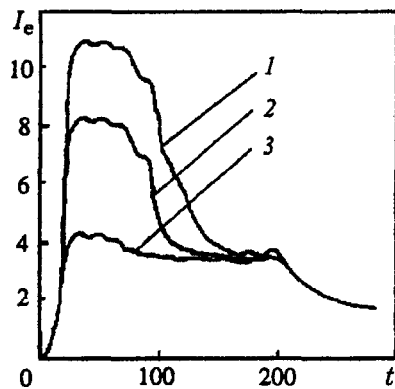


Рис. 5. Импульсы тока эмиссии в зависимости от режимов работы: 1 – импульсный режим; 2 – импульсный с током инициирующего разряда 100 мкА; 3 – импульсный с током инициирующего разряда 50 мА. I_e , А; t , мкс

с потенциалом, близким к потенциалу ускоряющего электрода, и ускоряющее напряжение оказывается приложенным к двойному слою между эмитирующей и вторичной плазмами. Поскольку протяженность двойного электрического слоя меньше, чем расстояние между электродами ускоряющего промежутка, напряженность поля у сеточного электрода возрастает. Это может приводить к увеличению проникновения ускоряющего поля в ячейки сеточного электрода и переключению в ускоряющий промежуток электронов из плазмы, поступающих при меньших напряженностях ускоряющего поля на сеточный электрод. Такой же эффект повышения коэффициента переключения α может наблюдаться при низком давлении в ускоряющем промежутке, но при достаточно высоком ускоряющем напряжении (кривая 3, рис. 4).

Эмиссионные характеристики источника, представляющие зависимости $I_e(I_d)$, близки к линейным, а крутизна (dI_e/dI_d) соответствует (для участка квазинасыщения тока I_e на вольт-амперных характеристиках) коэффициенту прозрачности эмиттерного электрода ξ в широком диапазоне давлений.

Осциллограммы тока эмиссии в импульсном режиме приведены на рис. 5. Они иллюстрируют, во-первых, зависимость "вспышки" давления газа в разрядной камере в начальной стадии разряда от числа адсорбированных молекул, которое связано с током стационарного инициирующего разряда, а во-вторых, снижение этого давления в течение импульса тока (задний фронт импульса) вплоть до величины p_0 , обусловленной напуском газа в газоразрядную структуру.

Таким образом, разработанная конструкция ПИЭЛ обеспечивает формирование высокоэнергетичных (до 25 кэВ) электронных пучков большой площади (до 20 см²), предназначенных для реализации ряда электронно-лучевых технологий в стационарном с током пучка до 0.5 А и импульсном с током до 10–15 А, режимах в диапазоне давлений $5 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-2} мм рт. ст.

Обозначения

p – давление в технологической вакуумной камере; p_0 – начальное давление в разрядной камере (давление в вакуумной камере); p_m – давление после "вспышки"; U_a – ускоряющее напряжение; U_d – напряжение горения разряда; I_d – ток разряда; I_{d0} – начальный ток разряда; I_e – ток эмиссии; α – коэффициент переключения (эффективность извлечения); Q – величина напуска плазмообразующего газа в разрядную камеру; t – время; R_b – балластное сопротивление; ξ – геометрическая прозрачность сеточного электрода. Индексы: b – балластный; 0 – начальный; d – разряд, a – ускоряющий; e – эмиссия; m – максимум.

Литература

1. Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. и др. Электронно-лучевая сварка/Под ред. Б. Е. Пагона. Киев, 1987.
2. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: Сб. науч. тр./Под ред. Г. А. Месяца. Новосибирск, 1976.
3. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером/Под ред. П. М. Шанина. Екатеринбург, 1993.
4. Новиков А. А. Источники электронов высоковольтного глеющего разряда с анодной плазмой. М., 1983.
5. Завьялов М. А., Крейндель Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М., 1989.
6. Бугаев С. П., Крейндель Ю. Е., Шанин П. М. Электронные пучки большого сечения. М., 1984.
7. Шипко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. Минск, 1995.
8. Визирь А. В., Николаев А. Г., Окс Е. М. и др.//ПТЭ. 1993. № 3. С. 144–148.
9. Патент ВУ 220 У, МПК Н01J 3/04 Плазменный источник электронов. В. А. Груздев, В. Г. Залесский. № 20000085; Заявл. 01.06.2000.
10. Груздев В. А., Залесский В. Г., Петрович О. Н.//ЖТФ. 1995. Т. 65, вып. 10. С. 38–45.
11. Груздев В. А., Залесский В. Г.//ЖТФ. 1996. Т. 66, вып. 7. С. 46–55.
12. Жаринов А. В., Коваленко Ю. А., Роганов И. С., Тюрюканов П. М.//ЖТФ. 1986. Т. 56, вып. 1. С. 66–70.
13. Жаринов А. В., Коваленко Ю. А., Роганов И. С., Тюрюканов П. М.//ЖТФ. 1986. Т. 56, вып. 4. С. 687–693.
14. Крейндель Ю. Е., Левшук Л. А.//ЖТФ. 1968. Т. 38, вып. 10. С. 1675–1683.
15. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М., 1987.