

04;12

Некоторые свойства магнетронного разряда с полым катодом как генератора плазмы эмитирующей заряженные частицы

© А.П. Семенов, И.А. Семенова

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: semenov@pres.bsc.buryatia.ru

(Поступило в Редакцию 6 апреля 2004)

Рассмотрены свойства магнетронного разряда с холодным полым и неохлаждаемым стержневым катодами. Показана перспективность электродной структуры магнетронного разряда с полым катодом как генератора эмитирующей плазмы. При токе разряда 2 А и ускоряющем напряжении 10 кВ эмиссионный ионный ток составил 0.1–0.15 А, эмиссионный электронный ток 1 А. Определены цена извлеченного иона 1–2 Вт/мА, что в 2–5 раз ниже, чем у типовых ионных источников, и энергетическая эффективность 15 мА/Вт, что в 5–6 раз выше электронных эмиттеров на основе отражательного разряда с полым катодом.

Введение

В газовых разрядах с холодным катодом степень участия в эмиссии генерируемых в разряде ионов можно характеризовать ценой извлеченного иона, выражаемой отношением мощности затрачиваемой эмиттером к эмиссионному ионному току $C_i \sim I_p U_p / I_i$ (I_p — ток разряда, U_p — напряжение горения разряда, I_i — ток ионного пучка). Степень участия в эмиссии электронов характеризуется энергетической эффективностью $W_e \sim I_e / I_p U_p$ (I_e — ток электронного пучка). При использовании отражательных разрядов низкого давления с холодным полым катодом [1], напряжение горения которых составляет $U_p \sim 400$ – 450 В, C_i сравнительно высока ~ 10 Вт/мА, W_e низка — ~ 2.5 мА/Вт. Причиной повышения цены извлеченного иона и низкой энергетической эффективности является высокое напряжение горения разряда. Сравнительно высокие напряжения горения разряда способствуют относительно быстрому разрушению стенок эмиссионного канала и нежелательному нагреву катодов. Причем в получивших применение плазменных источниках электронов и ионов [2–7] существенная доля энергии, подводимая к разрядному промежутку, выделяемая на электродах, отводится соответствующей системой охлаждения. Кроме высоких напряжений горения отражательного разряда с полым катодом характерно перераспределение плотности зарядов в плазме в результате изменения условий радиального движения зарядов между выходной апертурой полости и отражательным катодом [2], крутизна зависимости плотности плазмы от тока разряда при $I_p > 0.6$ А снижается. Ниже рассматриваются некоторые свойства магнетронного разряда, обеспечивающие наиболее эффективный режим горения стационарного разряда с высокими эмиссионными параметрами плазмы, и показаны экспериментально установленные особенности теплового поражения в разряде торцевой части стержневого катода.

Методика эксперимента, результаты и обсуждение

На рис. 1 схематически представлена электродная структура магнетронного разряда с полым катодом [8], в которой катодный электрод накаляется в разряде до температур, достаточных для термоэлектронной эмиссии. Схема электродов состоит из цилиндрического медного анода 1 диаметром 8 и длиной 12 мм. Анод коаксиально охватывает подвижный стержневой катод 2 диаметром $d = 1.5$ – 4 мм. Стержневой катод установлен на оси коробчатой полости катода 3 соосно выходной апертуре полости и образует зазор с отверстием в отражательном катоде 6. Индукция осевого магнитного поля 0.1 Т создается в анодном цилиндре кольцевым магнитом 5. Через отверстие в отражательном катоде 6 осуществляется откачка рабочего газа. Оно также может служить эмиссионным каналом при использовании разрядного устройства в качестве генератора плазмы плазменного источника электронов или ионов либо эжекторным соплом, выводящим, в частности, поток атомарного водорода. Прямое измерение температуры стержневого катода

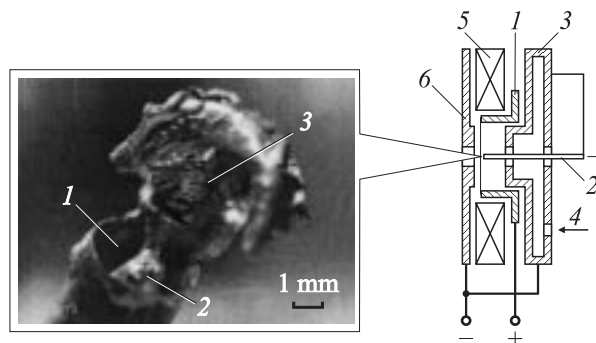


Рис. 1. Электронная структура разрядного устройства и фотография следа эрозии (теплового поражения) торцевой части стержневого катода из латуни: 1 — анод, 2 — стержневой катод, 3 — полый катод, 4 — напуск газа, 5 — постоянный магнит, 6 — отражательный катод.

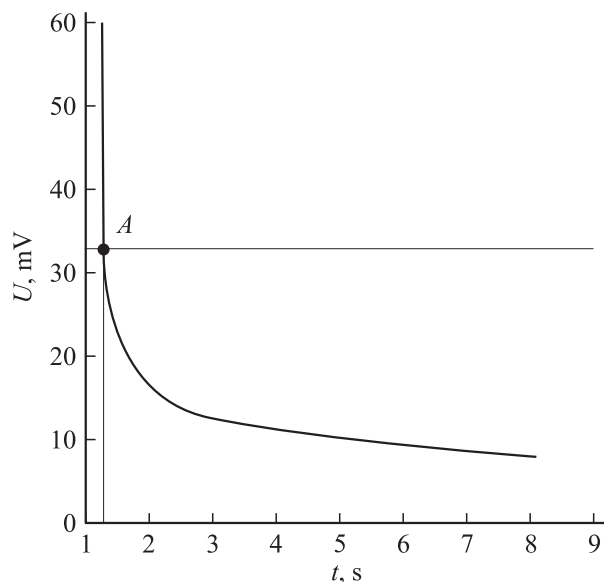


Рис. 2. Осциллограмма термоэдс после гашения разряда: $I_p = 0.66$ А, стержневой катод из вольфрама диаметром $d = 1.5$ мм.

выполнялось термоэлектрическим вольфрам-ренийевым преобразователем. Плазмообразующий газ (воздух) натекал через отверстие 4 на периферии полости. Скорость напуска составляла $0.8\text{--}1.2\text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Для измерения параметров плазмы в отверстие катода 6 вводился цилиндрический вольфрамовый зонд диаметром 0.05 мм, рабочая длина которого, составлявшая 1 мм, ограничивалась алундовым покрытием остальной нерабочей части зонда. Для высоковольтного извлечения заряженных частиц из катодной плазмы разряда использовался ускоряющий электрод [6], устанавливаемый соосно катоду 6.

Свойства магнетронного разряда с полым катодом (рис. 1) в значительной степени определяются термоэмиссионными свойствами стержневого катода [9], накапливаемого мощностью выделившейся в разряде [10–12]. Для измерения температуры стержневого катода T_k на тоцевом срезе стержня из вольфрама формировался спай с рением, на основе спаия образован термоэлектрический вольфрам-ренийевый преобразователь градуировки ВР-5/20. Спай вольфрам-рений разогревался до T_k и не нарушал структуру и режим горения разряда. Термоэдс измерялась запоминающим осциллографом С8-11. Показания оценивались с учетом излучения плазмы. Температуру T_k измеряли после быстрого гашения разряда. Если принять скорость снижения температуры катода $\sim 10^6\text{ К/с}$ [13], то за время распада плазмы $\sim 10^{-5}$ с измеренная температура будет ниже искомой на ~ 10 К. На рис. 2 приведена осциллограмма термоэдс при гашении разряда (время отключения разряда $5 \cdot 10^{-6}$ с). Распад плазмы характеризуется резким спадом термоэдс до величины, соответствующей истинной T_k (точка А), поскольку при горении

разряда плазма значительно завышает показания термоэлектрического преобразователя. На осциллограмме участок ниже точки А характеризует изменение температуры стержневого катода от максимальной величины до некоторой установившейся через несколько секунд после распада плазмы. Термоэдс в точке А соответствует температуре катода $\sim 2.6 \cdot 10^3$ К и совпадает с температурой, измеренной пирометром [14].

На рис. 3 представлена осциллограмма анодного тока (амплитуда импульса зажигающего напряжения 10^3 В). Развитие разряда до установления равновесного горения проходит через промежуточные стадии рис. 4. Время развития разряда τ_f зависело от амплитуды импульса зажигающего напряжения U_1 . С увеличением U_1 от 0.7 до 1.2 кВ τ_f сокращалось от 0.35 до 0.15 с. При повторном запуске импульса напряжения U_1 через время менее 0.1 с после гашения разряда промежуточные стадии горения не выявлялись. При $U_1 < 0.7\text{ кВ}$ возбуждался и горел слаботочный магнетронный разряд. Появление падающей зависимости напряжения горения от тока

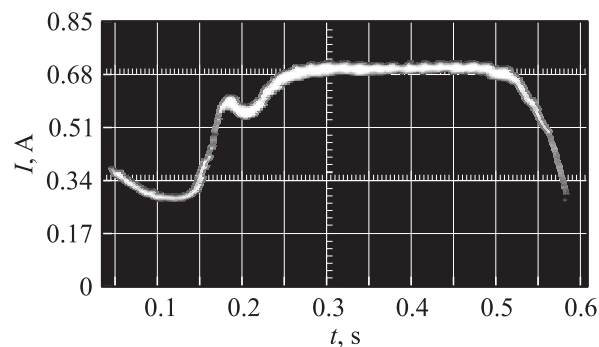


Рис. 3. Осциллограмма анодного тока: $\tau_f = 0.225$ с, $I_p = 0.715$ А.

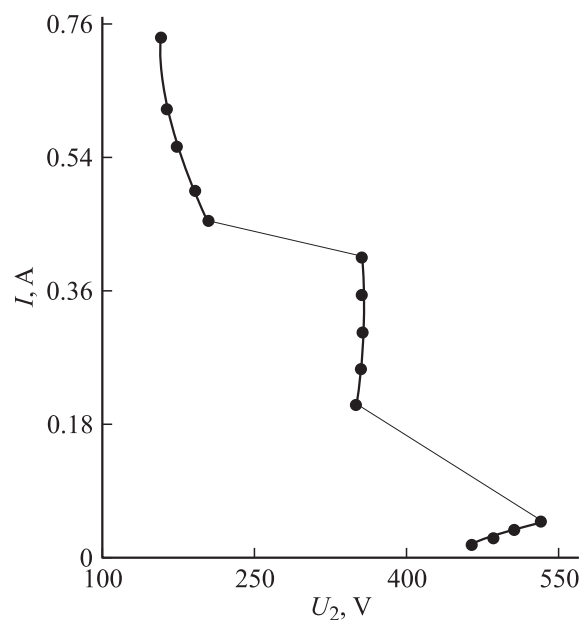


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика разряда: $d = 1.5$ мм.

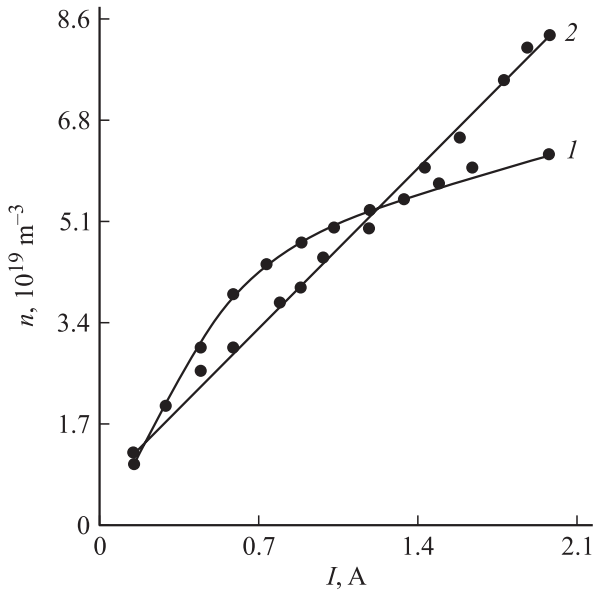


Рис. 5. Зависимость плотности плазмы от тока разряда: 1 — отражательный разряд с полым катодом [2], 2 — магнетронный разряд с полым катодом.

разряда (рис. 4) обусловлено изменением эмиссионного механизма стержневого катода, когда становится существенным вклад термоэлектронной эмиссии в ионизационные процессы в прикатодной области разряда. Температура стержня достигает 2500–2700 К и обеспечивает плотность тока термоэмиссии 0.3–1.6 А/см². Этому свидетельствуют вольт-амперные характеристики разряда с катодными стержнями из различных материалов [9], причем, как показали эксперименты [9], самые низкие напряжения горения соответствуют стержневому катоду из LaB₆, характеризующемуся высокими термоэмиссионными свойствами. Осциллограмма тока разряда I_p (рис. 2) устанавливает переход разряда в режим равновесного горения через 0.225 с от момента подачи импульса поджигающего напряжения. Задержка в развитии разряда вызвана разогревом катодного стержня.

На рис. 5 (2) приведена зависимость от тока разряда осевой плотности плазмы, которая оценивалась по ионному току насыщения на зонд, помещенный в отверстие катода *b*, в условиях эмиссии электронов из вольфрамового стержня, нагретого до белого каления плазменными ионами, ускоренными в катодном падении потенциала. Там же показана зависимость (*I*) плотности плазмы в осевом отверстии катода *b* от тока отражательного разряда с полым катодом [12]. Как видно из сопоставления зависимостей, эффект ограничения плотностей зарядов не проявляется в электродной структуре магнетронного разряда с полым катодом, в котором поглощение энергии разряда неохлаждаемым катодным электродом может накаливать его до температур, достаточных для электронной эмиссии. Последнее обстоятельство позволяет существенно снизить напряжение го-

рения сильноточного разряда, получить линейно растущую зависимость концентрации плазмы от тока разряда при больших токах > 0.6 А и создать условия плавного перехода аномального тлеющего разряда в дуговой и обеспечить диффузионный (без катодного пятна) режим горения дугового разряда.

В рассмотренных условиях заметный вклад в ионизацию вносят термоэлектроны. Чем выше температура стержня и шире его эмиссионная поверхность, тем ниже напряжение горения разряда. Эффективное действие этих двух факторов проявляется при определенном расстоянии между открытым торцом стержня и отражательным катодом, при котором U_2 самое низкое. Экспериментально установлено (рис. 6), что по мере углубления стержня в разрядный промежуток зависимость напряжения горения носит немонотонный характер. В измерениях стержень с помощью микровинта перемещался вдоль оси разрядной камеры при непрерывном горении разряда. При начальном положении торцевой срез стержня совмещался с плоскостью основания катодной полости. По мере заглубления стержня на длину полости ~ 9 мм напряжение горения разряда снижалось от 390 до 375 В (ток разряда 0.5 А). На длине апертуры полости ~ 2 мм наблюдалось снижение U_2 до 360 В. При нахождении стержня в промежутке между апертурой полости и отражательным катодом на расстояние до 8.5 мм от апертуры полости напряжение горения резко падало от

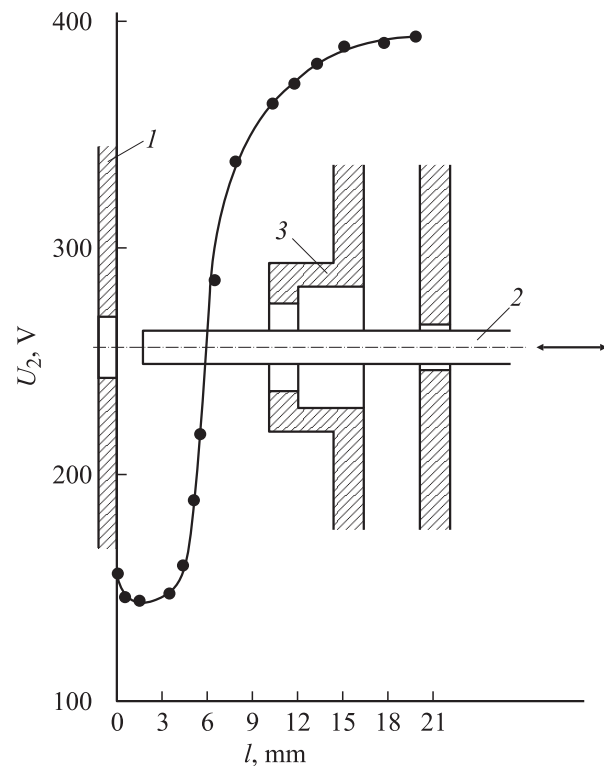


Рис. 6. Зависимость напряжения горения от расстояния между торцом стержневого катода и отражательным катодом: 1 — отражательный катод, 2 — стержневой катод, 3 — полый катод ($d = 1.5$ мм, $I_p = 0.5$ А.)

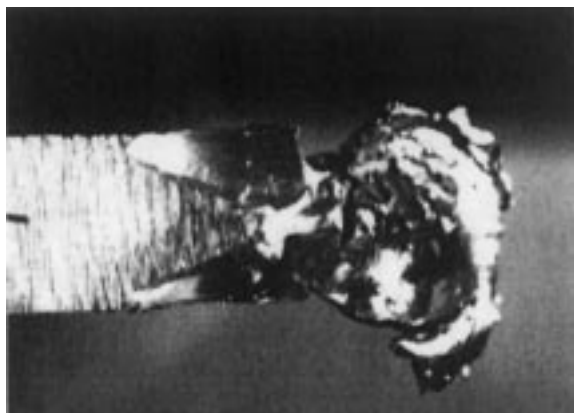


Рис. 7. Продольный разрез поврежденной торцевой части стержневого катода (рис. 1).

360 до 145 В. Ток в цепи стержня заметно возрастал. При приближении торцевого среза стержня к отражательно-му катоду характер зависимости напряжения горения с падающего изменялся на растущий, при этом замедлялся рост тока в стержне. Точка минимума определяет размеры оптимального зазора d_{opt} между торцевым срезом стержня и участвующей в разряде стенкой отражательного катода. При обычно выполняющемся соотношении $d_{\text{opt}} \sim \lambda_0$, где λ_0 — длина свободного пробега атомов плазмообразующего газа, протяженность зазора при котором U_p минимально ~ 1.5 мм.

Установлено, что за сравнительно короткое время $< 10^{-1}$ с с момента переключения разряда в режим равновесного горения с полым катодом наблюдались разнохарактерные разрушения торцевой части цилиндрических стержней $\varnothing 4$ мм из нержавеющей стали, алюминия и латуни. Так, торец стержня из нержавеющей стали оплавляется и принимает форму сферы, вместе с тем торцевая часть стержня из алюминия размягчалась и в виде грушевидной капли жидкого металла удлинялась (сила тяжести направлена вдоль оси стержня) и, коснувшись холодной поверхности отражательного катода, застывала. Наиболее сложный характер разрушения обнаружен у стержня из латуни. Как видно из рис. 1 и 7, жидкий металл 3 вытесняется через торец стержня и, коснувшись холодной поверхности отражательного катода, охлаждается. При этом на месте вытеснения жидкого металла образовался кратер 1 глубиной 4 мм. В результате взрывного выброса жидкого металла, внутри кратера сформировался конус 2, с вершиной которого смыкалась масса вытесненного металла. Анализ продольного разреза торцевой части стержневого катода (рис. 7) показывает, что при вытеснении расплавленного металла из объема стержня его поверхностный цилиндрический слой оставался холодным и не подвергся плавлению, хотя граница расплава находилась от поверхности на глубине 0.1 мм (0.1 мм — толщина сохранившихся стенок, ограничивающих кратер). Взрывное вытеснение металла через торец стержня с образо-

ванием кратера вида рис. 1 и 7, по-видимому, связано с проявлением процессов резонансного характера в зазоре торцевой срезу стержневого катода — отражательный катод, представляющего собой сосредоточенную емкость тороидального резонатора. Рассмотрение тороидального резонатора как сосредоточенной емкости (образуемой торцом стержневого катода) и сосредоточенной индуктивности (образуемой полостью анодного цилиндра) [15] и оценка резонансной частоты дало величину ~ 1 GHz, совпадающую с частотой плазменных колебаний. Однако для выяснения физической природы явления требуется постановка дополнительных экспериментов, заслуживающих отдельного обсуждения.

На выходе отверстия в отражательном катоде 6 при токе разряда 2 А и ускоряющем напряжении 10 кВ эмиссионный ионный ток составил 0.1–0.15 А, эмиссионный электронный ток 1 А.

Выводы

Таким образом, электродная схема магнетронного разряда с полым катодом, характеристики, условия образования и параметры катодной плазмы которого впервые были рассмотрены в работах [11,10,16–18], позволяет более рационально решить задачу генерирования сильноточных ионных пучков с низкой ценой извлеченного иона и электронных пучков с высокой энергетической эффективностью. Так, однозначность зависимости плотности плазмы от разрядного тока рис. 5 (2) и выявленный падающий характер вольт-амперных характеристик разряда обуславливают сравнительно низкие напряжения горения разряда и определяют эффективное извлечение ионов и электронов по направлению оси стержневого катода магнетрона и резко понижает цену извлеченного иона до ~ 1 W/mA и повышает энергетическую эффективность до ~ 15 mA/W. Проведенное рассмотрение некоторых особенностей магнетронного разряда с холодным полым катодом дает лишь качественное представление об его потребительских свойствах. Картина совокупности взаимосвязанных физических процессов, протекающих в разряде и определяющих эффективность его функционирования, значительно усложняется из-за специфики проявления многих категорий плазменных процессов и учета их влияния на эмиссию ионов и электронов. Наблюдаемое уменьшение напряжения горения с ростом тока разряда связано с термоэмиссией самокалящегося в разряде стержневого катода магнетрона. Аналогичным образом на падение напряжения горения влияет изменение протяженности зазора между торцом стержневого катода и отражательным катодом.

Тем не менее обозначенные свойства разряда уже находят применение газоманетрона для формования (затачивания) ионным распылением вольфрамовых острий (игл), эффективного генерирования атомарного водорода высокотемпературной активацией молекулярного водорода, что особенно важно при выращивании тонких

пленок алмазоподобного углерода и обработки поверхностей полупроводников [19], формировании покрытий тугоплавких металлов на трубчатых полостях [20], получении плазмы высокой плотности благодаря термоэмиссии электронов, приводящей к плавному переходу разряда в сильнооточный режим горения дуги без катодного пятна, при этом не проявляются ограничения, связанные с неустойчивостью дуги при малых токах, нестабильностью и нестационарностью катодного пятна, выбросом из катодного пятна частиц, загрязняющих как плазму разряда, так и поток частиц, инжектируемых через эмиссионный канал. На основе магнетронного разряда с полым катодом разрабатываются эффективные источники ионов и электронов с неохлаждаемым стержневым катодом [8].

Работа выполнена при поддержке Комплексного интеграционного проекта СО РАН (№ 7), проекта INTAS (№ 2001-2399) и частичной финансовой поддержке Лаврентьевского конкурса молодых ученых СО РАН (проект № 37).

Список литературы

- [1] Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [2] Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Троян О.Е. Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск: Наука, 1983. С. 5–14.
- [3] Семенов А.П. // ПТЭ. 1984. № 5. С. 23–24.
- [4] Глазов А.А., Кузмяк М., Новиков Д.Л. и др. // ПТЭ. 1964. № 1. С. 34–36.
- [5] Семенов А.П. // ПТЭ. 1996. № 4. С. 3–14.
- [6] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [7] Семенов А.П. // ПТЭ. 1993. № 5. С. 128–133.
- [8] Семенов А.П., Семенова И.А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 4. С. 102–107.
- [9] Семенов А.П., Семенова И.А. // Тр. Междунар. конф. „Вакуумные технологии и оборудование“. Харьков, 2002. С. 227–235.
- [10] Груздев В.А., Семенов А.П. // Тез. докл. V Симпозиума по ненакаливаемым катодам. Томск, 1985. С. 159–161.
- [11] Семенов А.П., Мохосоев М.В. // ДАН СССР. 1985. Т. 82. № 4. С. 888–889.
- [12] Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Семенов А.П. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 5. С. 1005–1007.
- [13] Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.
- [14] Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение / Под ред. Г.А. Месяца. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 1999. 207 с.
- [15] Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1955. 344 с.
- [16] Семенов А.П., Мохосоев М.В. // ПТЭ. 1987. № 2. С. 138–141.
- [17] Семенов А.П. // А.С. SU 1375024. МКИ Н 01 J 17/00, 3/02. 1985.
- [18] Семенов А.П., Мохосоев М.В. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 11. С. 2276–2277.
- [19] Семенов А.П., Семенова И.А. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 69–76.
- [20] Семенов А.П., Белянин А.Ф. // А.С. SU 1565289. МКИ Н 01 j 37/34, С 23 С 136. 1987.