

04;10;12

## Эмиссионные свойства плазменного катода на основе тлеющего разряда для генерации пучка электронов наносекундной длительности

© В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль, В.С. Толкачев, П.М. Щанин

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 27 июля 1998 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований эмиссионных свойств плазменного катода на основе импульсного тлеющего разряда с током до 200 А наносекундной длительности при давлении  $5 \times 10^{-2}$  Па. Стабильное зажигание и горение разряда обеспечиваются при условии, что ток импульсного вспомогательного разряда составляет 25–30% от основного разряда, а длительность импульса более чем на порядок превышает длительность основного разряда. Импульс тока эмиссии плазменного катода амплитудой до 140 А полностью повторяет ток разряда и определяется прозрачностью сетчатого анода.

### 1. Введение

Для накачки активных сред лазеров электронами или рентгеновским излучением требуются сильноточные электронные пучки наносекундной длительности с малыми временами нарастания и спада импульса тока. Обычно для этих целей используются ускорители с взрывоэмиссионными катодами [1,2], обеспечивающими токи до нескольких килоампер, или ускорители с плазменными катодами на основе вакуумных дуг [3–5]. Как в первом, так и во втором случаях срок непрерывной работы ограничен ресурсом холодного катода, в лучшем случае порядка  $10^7$  импульсов. Кроме того, при большой площади пучка возникают трудности по обеспечению равномерности распределения плотности тока по сечению пучка. Большую длительность непрерывной работы можно получить при использовании в эмиттерах тлеющего разряда с полым катодом при плотностях тока в импульсном режиме работы до  $1 \text{ А/см}^2$  [6,7]. Высокое давление газа (1–10 Па), необходимое для устойчивого зажигания и горения разряда в сильноточном режиме, и использование в качестве рабочего газа He при высоких порядка 100 кВ ускоряющих напряжениях ограничивает применение такого разряда только в ускорителях непрерывного действия с плотностями тока в несколько десятков миллиампер [8,9]. В [10] снижение рабочего давления в тлеющем разряде с полым катодом до  $10^{-2}$  Па осуществлялось за счет выполнения условия, при котором площадь катода ( $S_k$ ) превышала площадь анода ( $S_a$ ) в  $\sqrt{M/m}$  раз. Так, при использовании в качестве рабочего газа азота площадь катода должна быть более чем в 200 раз больше анода. При большой площади сечения пучка такая разрядная система создает конструктивные трудности, связанные с большими размерами катода. Дополнительные недостатки системы, возникающие при формировании импульсов наносекундной длительности, будут рассмотрены ниже в этой работе.

### 2. Экспериментальная установка и результаты исследований

Рассматриваемые ниже исследования были направлены на выяснение возможности создания в конечном итоге ускорителя, генерирующего широкоапертурный электронный пучок с энергией сотни килоэлектронвольт, током в несколько сот ампер, в наносекундном диапазоне длительностей и с высокой частотой повторения импульсов, с ресурсом порядка  $10^8$ – $10^9$  импульсов. Ввиду больших размеров катода разрядная система, удовлетворяющая условию  $S_k/S_a = (M/m)^{1/2}$ , не исследовалась. Вначале были проведены исследования эмиссионных особенностей стандартной разрядной системы, аналогичной [9], состоящей из полого катода диаметром 20 см и длиной 75 см, сетчатого анода длиной 70 см и шириной 3 см, расположенного на расстоянии 5 мм от прямоугольного окна площадью  $2 \times 70 \text{ см}$  на боковой поверхности катода, вспомогательного анода, выполненного в виде стержня диаметром 2 мм, и коллектора, установленного на расстоянии 1 см от сетчатого анода.

В такой системе слаботочный иницирующий разряд зажигается между вспомогательным анодом и полым катодом с током до 5 мА при давлении He свыше 1 Па, а основной импульсный разряд — между тем же полым катодом и сетчатым анодом. В экспериментах наблюдались два режима горения импульсного разряда — нормальный и аномальный с интенсивными колебаниями разрядного тока. Подобные режимы горения разряда в полном катоде описаны в работе [10]. На рис. 1 и 2 приведены вольт-амперная характеристика и зависимость тока разряда от давления при постоянном напряжении на разрядном промежутке для нормального режима горения разряда. Переход разряда из одного режима горения в другой зависит от давления рабочего газа, от скорости роста и амплитуды разрядного тока.

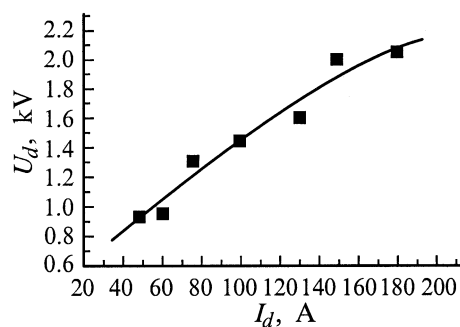


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика разряда с полым катодом.

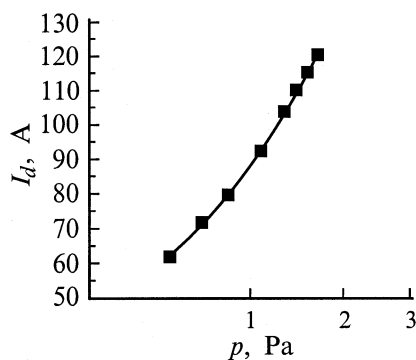


Рис. 2. Зависимость тока разряда полого катода от давления газа (гелия).

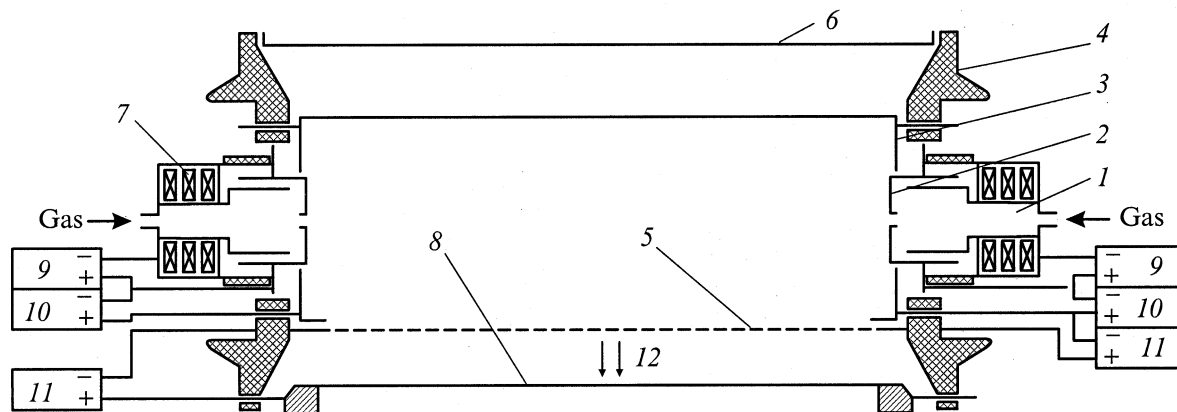
Было установлено также, что при уменьшении давления увеличивается время формирования разряда. Ток разряда нарастает до максимального значения за время, равное  $20 \mu\text{s}$ , при давлении  $P = 3.9 \text{ Pa}$  и за  $45 \mu\text{s}$  при давлении  $P = 1.4 \text{ Pa}$ . Сократить время формирования разряда, а следовательно, и длительность импульса разрядного тока можно, создавая значительное перенапряжение на разрядном промежутке. Однако при этом увеличивается скорость роста тока, что приводит к переходу разряда в аномальный режим горения с сильной модуляцией тока, как уже отмечалось ранее, вначале на фронте. По мере дальнейшего сокращения длительности импульса или увеличения разрядного тока растет амплитуда модуляции, и постепенно весь импульс оказывается промодулирован высокочастотными колебаниями. Кроме того, в экспериментах наблюдалась контракция основного разряда, избавиться от которой удалось, перейдя к использованию вместо слаботоочного постоянного инициирующего разряда сильноточного импульсного. Эксперименты по извлечению электронов показали, что при ускоряющем напряжении  $17 \text{ kV}$ , приложенном между сетчатым анодом и коллектором, плазменный катод обеспечивал ток эмиссии до  $100 \text{ A}$  при токе разряда  $120 \text{ A}$  и давлении  $2.6 \text{ Pa}$ . Форма импульса тока была синусоидальной с длительностью  $5 \mu\text{s}$  по основанию.

Вышеуказанные недостатки, а также высокое давление газа, узкий интервал рабочих давлений, при котором стабильно функционирует разряд, и невысокая электрическая прочность ускоряющего промежутка при высоких давлениях стимулировали исследования разрядной системы, в которой низкое давление газа в полом катоде и ускоряющем промежутке достигается за счет предварительного заполнения катодной полости плазмой от вспомогательного импульсного разряда.

Экспериментальная установка схематично представлена на рис. 3 и состоит из полого катода диаметром  $20 \text{ cm}$ , длиной  $75 \text{ cm}$ , на концах которого установлены два плазмогенератора, создающие в полом катоде предварительно плазму. Плазмогенераторы соединены с полым катодом через малые (диаметром  $5 \text{ mm}$ ) отверстия, в которых осуществляется перепад давлений, при котором давление в плазмогенераторах на порядок превышает давление в полом катоде. Рабочее давление в катодной полости обычно не превышало  $5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ , и в качестве плазмообразующего газа использовался азот или воздух. Плазмогенератор в свою очередь состоит из полого катода 1 и промежуточного электрода 2. Для повышения ресурса системы в плазмогенераторах используется также тлеющий разряд. Магнитное поле с  $0.3 \text{ T}$ , создаваемое постоянными кольцевыми магнитами, снижает напряжение зажигания разряда и рабочее давление в плазмогенераторах и повышает стабильность момента зажигания разряда. Осциллограммы инициирующего разряда между катодом 1 и электродом 2 представлены на рис. 4, а, а осциллограммы вспомогательного разряда между промежуточным электродом 2 и полым катодом 3, в результате которого катодная полость заполняется плазмой (рис. 4, б).

Величина тока инициирующего разряда и задержка включения вспомогательного разряда выбраны исходя из условия равномерного заполнения полого анода плазмой вспомогательного разряда. При меньших задержке и токе инициирующего разряда плазма в полом катоде формируется в виде шнура с временной и пространственной нестабильностью. Напряжение основного разряда наносекундной длительности прикладывается между полым катодом и сетчатым анодом с задержкой  $6\text{--}10 \mu\text{s}$  относительно момента зажигания вспомогательного разряда. Напряжение зажигания и горения основного разряда находится в пределах  $4\text{--}6 \text{ kV}$ .

Скорость нарастания тока основного разряда определяется вначале формой прикладываемого напряжения, а на вершине зависит от задержки включения основного разряда относительно момента зажигания вспомогательного, как это видно на рис. 5. Дальнейшее уменьшение задержки приводит к снижению тока разряда при неизменном токе вспомогательного разряда и напряжении между полым катодом и сетчатым анодом. Форма импульса эмиссионного тока полностью повторяет форму разрядного тока. Максимальное значение эмиссионного тока, полученное в экспериментах, составляло  $140 \text{ A}$  при ускоряющем напряжении между сетчатым анодом



**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки: 1 — катод плазмодгенератора, 2 — промежуточный электрод, 3 — полый катод, 4 — изолятор, 5 — сетчатый анод, 6 — вакуумная камера, 7 — магниты, 8 — коллектор, 9 — БП1, 10 — БП3, 12 —  $e$ -пучок.

и коллектором 15 kV. Эффективность извлечения электронов, равная отношению эмиссионного тока к току разряда, пропорциональна прозрачности сетчатого анода  $\eta$ , т.е.  $I_e = \eta \times I_p$ . Равномерность распределения плотности тока вдоль большей оси сечения пучка составляла  $\pm 15\%$ .

Смена полярности подключения электродов иницирующего и вспомогательного разрядов позволила понизить в 2 раза напряжение горения вспомогательного разряда, использовать для предварительного создания плазмы в полем катоде только один плазмодгенератор, существенно улучшить распределение плотности эмиссионного тока

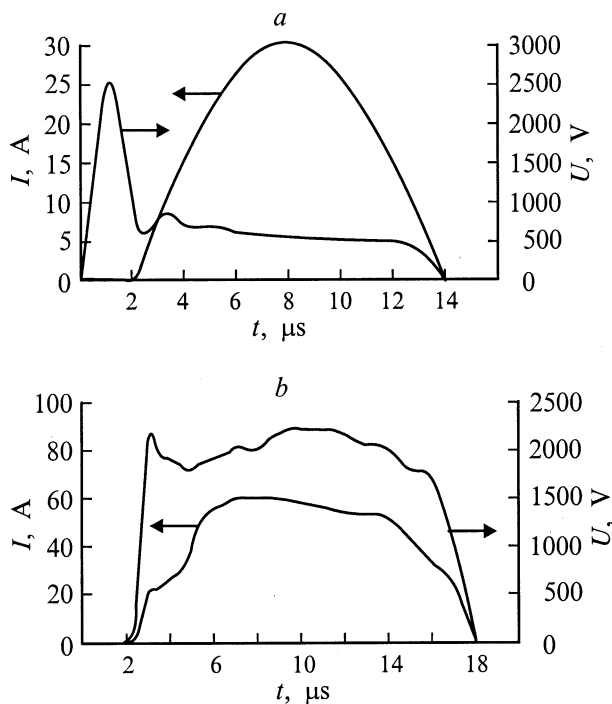
( $\pm 7\%$ ) и снизить в два раза потребляемую плазменным эмиттером мощность.

Для выяснения срока непрерывной работы плазменного эмиттера были проведены испытания плазмодгенераторов, определяющих ресурс плазменного эмиттера, в режиме указанных выше токов и напряжений иницирующего и вспомогательного разрядов при частоте повторения  $10^3$  импульсов в секунду в течение 4h, что соответствовало  $1.2 \times 10^8$  импульсов. При визуальных исследованиях не наблюдалось заметных изменений конфигурации и распыления электрода 1, выполненного из меди, и электрода 2, выполненного из нержавеющей стали.

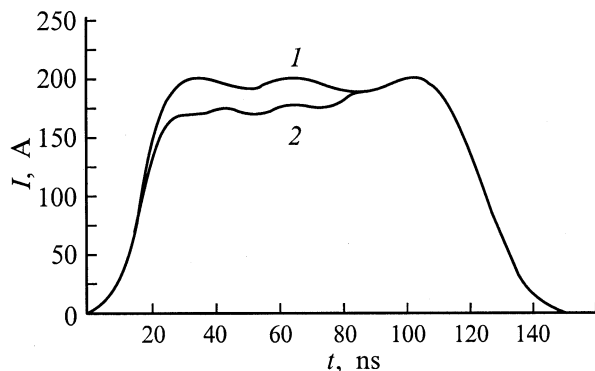
### 3. Обсуждение результатов исследования

В сильноточном тлеющем разряде даже использование импульсного иницирующего разряда в системе электродов с стержневым анодом не решает проблемы формирования импульсных пучков наносекундной и микросекундной длительности с высокой скоростью нарастания и спада тока вследствие низкой энергетической эффективности. При низком давлении установление иницирующего разряда происходит за времена в несколько десятков  $\mu s$ , а при сокращении длительности возникают сильные колебания, которые наблюдались и в [10]. В отличие от [10] мы полагаем, что возникновение колебаний на разрядном токе связано не с взрывными процессами на внутренней поверхности полого катода, а с инерционностью процессов рождения заряженных частиц и их низкой подвижностью в плазме. Подобные пульсации имеют место в дуговом разряде с полым анодом и отрицательным анодным падением [11].

Формирование пучков короткой длительности в таких системах осуществляется либо за счет введения дополнительной управляющей сетки, либо за счет им-



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжений горения и токов иницирующего (a) и вспомогательного разрядов (b).



**Рис. 5.** Осциллограммы тока основного разряда (задержка 10 (1), 6  $\mu$ s (2)).

пульсного ускоряющего напряжения. При токах пучка до нескольких сот ампер и наносекундных временах нарастания тока емкостные токи превышают токи пучка, что создает определенные проблемы. В рассмотренной системе формирование наносекундных пучков осуществляется при низких (4–5 kV) напряжениях, что существенно упрощает ускоряющую систему и значительно снижает энергетические затраты. Дальнейшее ускорение электронов осуществляется постоянным напряжением, приложенным к ускоряющему промежутку.

Формирование разряда в полой аноде в виде шнура при больших значениях разрядного тока, вероятно, связано с образованием в отверстии двойного слоя из-за большой разницы давлений и плотностей плазмы. Электроны, ускоряясь в двойном слое, облегчают прохождение большого тока через малое отверстие и обеспечивают непрерывность тока в двух плазмах с различной концентрацией. Образованием двойного слоя можно объяснить высокое напряжение горения вспомогательного разряда. Повышение напряжения горения в тлеющем разряде при образовании двойного слоя наблюдалось в работе [12].

Что касается изменения формы импульса и зависимости тока на вершине от задержки включения основного разряда относительно вспомогательного, то можно объяснить это следующим образом. Для стабильного горения тлеющего разряда с током  $I_p$  при низком давлении предварительно в полой аноде необходимо создать и поддерживать определенную концентрацию плазмы, чтобы компенсировать уход электронов из полого катода в анодную область. При недостаточной концентрации, создаваемой вспомогательным разрядом, основной разряд реагирует снижением тока разряда или уменьшением тока в начале импульса. Из сравнения осциллограмм рис. 4, b и 5 следует, что ток вспомогательного разряда должен составлять 25–30% от тока основного разряда. Эта величина согласуется с отношением токов в аналогичных системах [13] тлеющих разрядов постоянного тока.

## 4. Заключение

1. Предварительное заполнение полого катода в тлеющем разряде плазмой вспомогательного разряда позволяет снизить давление газа, исключить использование в качестве рабочего газа He и уменьшить вероятность возникновения разряда по длинным путям в ускоряющем промежутке.

2. Замена дугового разряда на тлеющий позволяет существенно увеличить срок непрерывной работы плазменного катода в сильноточном режиме с высокой частотой повторения импульсов.

3. Генерация импульсов тока наносекундной длительности за счет формирования соответствующего импульсного разряда при низком напряжении упрощает систему ускоряющего напряжения.

## Список литературы

- [1] Абдуллин Э.Н., Горбачев С.И., Ефремов А.М. и др. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 7. С. 652–656.
- [2] Abdullin E.N., Bugaev S.P., Gorbachev S.I. et al. // Laser Optics 93. Proc. SPIE Conf. on Laser Physics. St. Petersburg, 1993. Vol. 2. P. 38–45.
- [3] Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Кузнецов Д.Л. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 23. С. 23–29.
- [4] Гушенец В.И., Щанин П.М. // ЖТФ. 1993. Т. 66. Вып. 12. С. 25–33.
- [5] Gickens S.W.A., Peters P.J.M., Wittman W.J. et al. // Rev. Sci. Instr. 1996. Vol. 67. N 7. P. 2449–2452.
- [6] Knechtli R.S., Mercer G.N. // IEEE J. Quant. Electron. 1973. Vol. QE-9. N 6. P. 684–686.
- [7] Goebel D.M., Schumacher R.W., Watkins R.M. // Proc. IX Intern. Conf. on High-Power Particle Beams (Beams-92). Washington, 1992. Vol. 2. P. 1093–1098.
- [8] Bayless Y.R., Knechtli R.S., Mercer G.N. // IEEE J. Quant. Electron. 1974. Vol. QE-10. N 2. P. 213–218.
- [9] Bayless Y.R. // Rev. Sci. Instr. 1975. Vol. 46. P. 1158–1160.
- [10] Метель А.С. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 12. С. 2329–2339.
- [11] Dollinger R., Dettman D.R., Gilmour A.S. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1980. Vol. PS-8. N 4. P. 302–307.
- [12] Метель А.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 241–247.
- [13] Визирь А.В., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 6. С. 27–32.