

Электронный газонаполненный диод на основе тлеющего разряда

© В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 14 июня 2000 г.)

В плазменном катоде на основе тлеющего разряда за счет использования дополнительного иницирующего разряда осуществлены стабильное зажигание и горение импульсного разряда с током до 180 А, длительностью импульса 12 мкс при давлении 10^{-1} – 10^{-2} Па. В газонаполненном диоде с таким плазменным катодом получены плотности тока эмиссии электронов до 100 A/cm^2 при ускоряющем напряжении 15 кВ. В плазменном канале, образованном в результате ионизации газа ускоренными электронами, скомпенсированный по пространственному заряду электронный пучок транспортируется с малыми потерями на расстояние до 30 см в слабом аксиальном магнитном поле.

Введение

Газонаполненные и плазмонаполненные диоды обладают по сравнению с вакуумными более высоким первенсом за счет ускорения электронов в слое, образуемом между катодом и анодной плазмой, которая создается либо в результате ионизации газа пучком, либо специально дополнительным газовым разрядом. В электронном источнике с плазменным эмиттером [1], в котором катодная плазма создается дуговым разрядом, получены токи до 600 А при ускоряющем напряжении 20 кВ и длительности импульса $30 \mu\text{s}$. Средняя плотность тока эмиссии электронов при этом составляла 12 A/cm^2 . Как и в электронных источниках со взрывоэмиссионными катодами, обеспечивающими плотности тока до нескольких kA/cm^2 , длительность непрерывной работы источника с дуговым разрядом ограничивается сроком службы холодного катода. Использование в плазменном эмиттере тлеющего разряда с полым катодом позволяет вследствие значительной площади катода и меньшей его эрозии снять эти ограничения и значительно увеличить ресурс непрерывной работы электронного источника. Возможность получения высокой плотности тока эмиссии плазменного катода до 60 A/cm^2 на основе тлеющего разряда показана в [2].

Основной недостаток тлеющего разряда — высокое давление, при котором происходят зажигание и горение разряда, ограничивает электрическую прочность ускоряющего промежутка. Использование дополнительного иницирующего разряда [3,4] позволяет значительно снизить рабочее давление и обеспечить необходимую электрическую прочность ускоряющего промежутка.

Газонаполненный диод и система диагностики электронного пучка

Схематично конструкция газонаполненного диода представлена на рис. 1. По существу газоразрядная система плазменного эмиттера состоит из двух газоразрядных систем тлеющего разряда. Первая

система, образованная катодом 1 и анодом 3, составляет систему иницирующего разряда, функционирующего при относительно высоком давлении в течение короткого (2 – $3 \mu\text{s}$) промежутка времени. Полый катод 1 выполнен в виде цилиндра с внутренним диаметром 10 мм и длиной 50 мм. Для снижения напряжения зажигания иницирующего разряда катод 1 помещен в магнитное поле с индукцией 0.1 Т, создаваемое постоянными кольцевыми самарий-кобальтовыми магнитами 2. Основной тлеющий разряд длительностью $12 \mu\text{s}$ зажигается между цилиндрическим электродом 3 диаметром 40 мм и длиной 50 мм, выполняющим в этом разряде роль полого

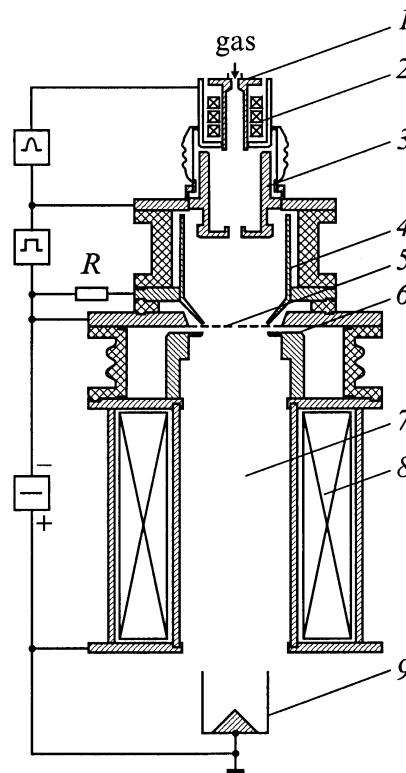


Рис. 1. Конструкция газонаполненного диода.

катода, и полым анодом, состоящим из двух электродов: цилиндрического 4 диаметром 80 mm и длиной 100 mm и расположенного на торце сетчатого электрода 5. Для создания перепада давления между двумя разрядными системами связь между ними осуществляется через малое, диаметром 6 mm, контрагирующее отверстие. Эффект полого катода в этой системе, несмотря на малый диаметр контрагирующего отверстия, возникает за счет проникновения анодного потенциала при малом размере пристеночного слоя пространственного заряда, создаваемого плазмой иницирующего разряда. Наличие эффекта полого катода в разрядной системе между электродами 3 и 4 подтверждается распылением стенок электрода 3, причем медный распыляется интенсивнее по сравнению с электродом, изготовленным из нержавеющей стали.

Извлечение и ускорение электронов осуществляется под действием постоянного напряжения, приложенного между эмиссионным сетчатым электродом 5 и цилиндрическим ускоряющим электродом 6. В процессе экспериментов имелась возможность изменять диаметры отверстий эмиссионного и ускоряющего электродов от 10 до 50 mm, причем диаметр диафрагмы ускоряющего электрода всегда превосходил диаметр эмиссионного электрода. Расстояние между сетчатым эмиссионным электродом 5 и ускоряющим электродом 6 было равно 5 mm.

Диагностика электронного пучка осуществляется после его транспортировки в дрейфовом канале 7 длиной 300 mm и диаметром 80 mm системой регистрации, состоящей из коллектора 9 в набором цилиндров Фарадея, имеющих входной диаметр 3 mm, и водоохлаждаемого калориметра. Калориметр закреплялся на подвижном штоке и мог перемещаться по оси диода без разгерметизации вакуумной системы. Для исследования влияния магнитного поля на транспортировку пучка в условиях компенсации его пространственного заряда, в канале дрейфа 7 соленоидом 8 создается аксиальное магнитное поле в индукцией до 0.015 T.

Для зажигания иницирующего разряда импульс с амплитудой 10 kV подается со вторичной обмотки импульсного трансформатора при коммутации накопительной емкости 6000 pF тиратроном ТГИ500/16. Ток иницирующего разряда имеет полусинусоидальную форму с амплитудой 20–30 A, длительностью 3 μ s на полувысоте. Питание основного разряда осуществляется от искусственной формирующей линии при коммутации напряжения 5–10 kV управляемым разрядником типа РУ62, запускаемым в максимуме тока иницирующего разряда. Ток основного разряда имел длительность 12 μ s и амплитуду до 180 A, а напряжение горения основного разряда было \leq 1 kV. Частота повторения импульсов варьировалась от одиночных до 25 s⁻¹, что определялось мощностью схем электропитания. Ускоряющий промежуток запитывался от источника постоянного напряжения 0 ÷ 15 kV с накопительной емкостью 5 μ F, что обеспечивало режим работы с частичным разрядом емкости и малым уровнем изменения напряжения в моменты импульсов тока пучка.

Результаты экспериментальных исследований

После подачи рабочего газа (воздух) в разрядную систему и включения соответствующих напряжений вначале зажигается вспомогательный тлеющий разряд между электродами 1 и 3. Как показывают расчеты и эксперименты, при расходе рабочего газа $Q = 5–20 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, подаваемого через полый катод 1, давление в этом разрядном промежутке находится в диапазоне единиц Pa. Наличие магнитного поля в катодной области вспомогательного разряда позволяет снизить рабочее давление в вакуумной камере, при котором зажигается вспомогательный разряд, до $5 \cdot 10^{-3}$ Pa. В рабочем диапазоне давлений газонаполненного диода ($10^{-1}–10^{-2}$ Pa) вспомогательный разряд зажигается при напряжении 5–10 kV, затем напряжение линейно падает до нуля за время, равное $\sim 3 \mu$ s. В зависимости от давления основной тлеющий разряд между электродами 3 и 4 зажигается с задержкой 1–2 μ s, затем через 2–3 μ s разрядный ток переключается на сетчатый электрод 5 и его амплитуда достигает 180 A при длительности 12 μ s. Для обеспечения зажигания тлеющего разряда на сетчатый электрод 5 он соединен с источником разрядного напряжения напрямую, а с цилиндрическим полым анодом 4 — через сопротивление $R_0 = 100 \Omega$. После переключения в процессе горения разряда ток на электрод 4 не превышает нескольких ампер. Напряжение горения основного тлеющего разряда практически не зависит от давления. Так, при изменении давления в камере на порядок величины от 10^{-1} до $2 \cdot 10^{-2}$ Pa напряжение увеличивается от 800 до 900 V.

При токе основного разряда 100 A и диаметрах сетчатого электрода $d_1 = 5$ и $d_2 = 1$ cm были измерены с помощью малого цилиндрического зонда параметры плазмы вблизи сетки. Как показали зондовые измерения, уменьшение площади анода в 20 раз приводит к увеличению концентрации плазмы n_e на порядок величины от $5 \cdot 10^{11}$ до 10^{13} cm^{-3} , снижению электронной температуры T_e от ~ 15 до ~ 10 eV и переходу отрицательного прианодного падения потенциала (-8 V) к положительному ($+1$ V). При таких параметрах плазмы плазменный катод в соответствии с формулой

$$j_e \approx en_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где e и m_e — заряд и масса электрона, n_e — концентрация плазмы, k — постоянная Больцмана, может обеспечить плотности тока эмиссии ~ 12 и $\sim 80 \text{ A/cm}^2$ соответственно.

Как указывалось выше, извлечение и ускорение электронов осуществляется постоянным напряжением, приложенным к пятимиллиметровому ускоряющему промежутку, между сетчатым эмиссионным электродом 5 диаметром 50 mm и ускоряющим электродом 6 с отверстием диаметром 55 mm.

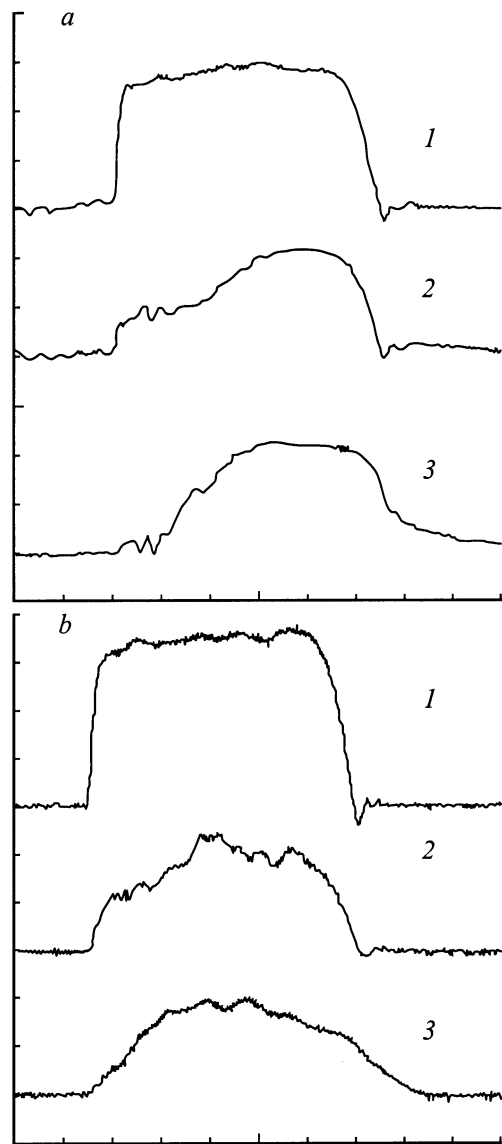


Рис. 2. Осциллограммы токов газонаполненного диода: 1 — ток разряда, 2 — ток эмиссии, 3 — ток коллектора; 40 А/дел, 2,5 μ s/дел. Диаметр эмиссионного электрода 50 (а), 10 мм (b).

На рис. 2, а представлены характерные осциллограммы газонаполненного диода, полученные при ускоряющем напряжении 15 кВ, давлении $2 \cdot 10^{-2}$ Па и магнитном поле соленоида 0.015 Т. При токе разряда, равном 120 А, ток в ускоряющем промежутке составлял ~ 100 А; до коллектора, расположенного на расстоянии 35 см от эмиссионной сетки, пучок транспортируется практически без потерь. Включение аксиального магнитного поля соленоида δ , превышающего значение собственного азимутального магнитного поля, создаваемого электронным пучком, примерно равного 0.01 Т, существенно увеличивает токопрохождение в трубе дрейфа. Эффективность извлечения электронов α , равная отношению тока пучка I_c к току разряда I_p , составляла

$\alpha = I_c/I_p = 0.8$, хотя геометрическая прозрачность сетки с ячейкой 0.4×0.4 мм составляла 40%. Ток эмиссии сетчатого плазменного катода в газонаполненном диоде слабо зависит от ускоряющего напряжения. Например, при увеличении ускоряющего напряжения от 2 до 15 кВ ток эмиссии увеличивается на 15%. При снижении давления до $1 \cdot 10^{-2}$ Па извлечение электронов и транспортировка пучка становятся нестабильными. Значительно уменьшаются токи эмиссии и коллектора, а в начале импульса появляются ВЧ колебания тока. Основной причиной такой работы диода при понижении давления является недостаточное количество ионов, которые образуются в результате ионизации газа электронным пучком. Недостача ионов затрудняет образование плазменного анода в анодном отверстии и приводит к неполной компенсации пространственного заряда пучка в канале дрейфа.

В процессе измерения тока пучка коллектором с включенным в его цепь резистивным шунтом и поясом Роговского была замечена зависимость амплитуды измеренного тока от величины сопротивления шунта. С увеличением сопротивления измеряемый ток резко уменьшался. При протекании тока через шунт на коллекторе появляется напряжение автосмещения и между коллектором и трубой дрейфа возникает ток плазменных электронов, противоположный току высокоэнергетичных электронов пучка. Вследствие того что концентрация плазменных электронов может на порядок величины превышать концентрацию электронов в пучке [5], даже при их малой скорости они могут существенно влиять на измерения тока пучка. Аналогичное явление наблюдалось в [6], где ток с коллектора протекал по плазме, образованной на коллекторе под действием сильноточного пучка. При измерении тока пучка поясом Роговского наблюдался небольшой ток после окончания импульса тока разряда (рис. 2, кривая 3). Для выяснения действительной энергии, которая транспортируется пучком к коллектору в газонаполненном диоде, и оценки возможных потерь энергии пучка были проведены калориметрические измерения энергии пучка. Как показали измерения, энергия, переносимая пучком, не зависит от того, существует или отсутствует автосмещение на калориметре, несмотря на значительные различия в величинах измеряемого тока в его цепи. Таким образом, установлено, что измерения калориметром более адекватно отражают процессы извлечения электронов из плазменного катода и транспортировку электронного пучка в газонаполненном диоде.

Влияние магнитного поля на эффективность транспортировки интенсивного электронного пучка представлено на рис. 3, где проведена зависимость энергии пучка E_p от расстояния L эмиссионный электрод-калориметр. Видно, что аксиальное магнитное поле стабилизирует пучок и в пространстве, где существует магнитное поле, электроны движутся практически без потерь (кривая 1). Кривая 2 получена при отсутствии магнитного поля. Распределения плотности тока по сечению пучка, измеренные цилиндрами Фарадея, расположенными за соленоидом на

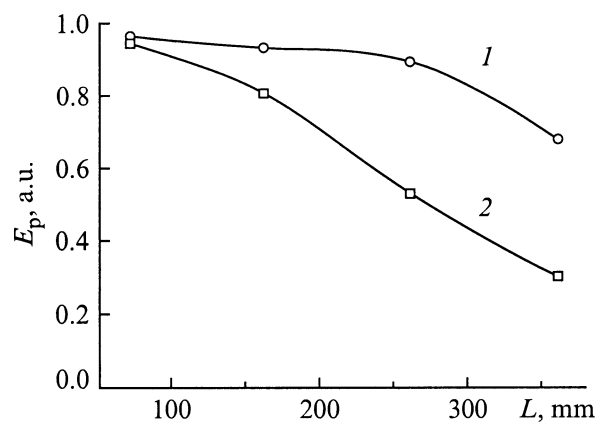


Рис. 3. Изменение энергии пучка при транспортировке в дрейфовом канале.

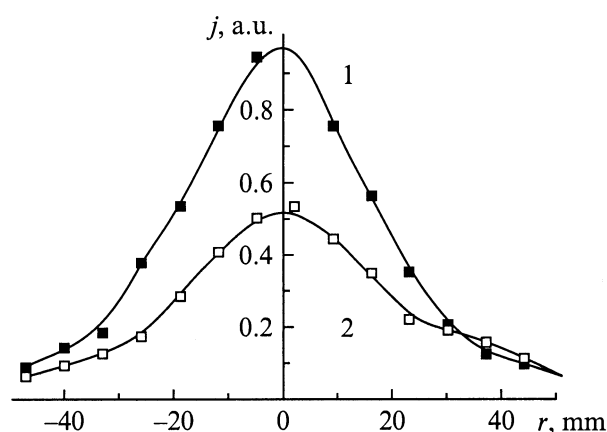


Рис. 4. Распределение плотности тока в пучке в конце соленоида.

расстоянии 350 mm от плазменного катода, при давлении $P = 3 \cdot 10^{-2}$ Pa, наличии (кривая 1) и отсутствии (кривая 2) магнитного поля, показаны на рис. 4. Если аксиальное магнитное поле существует, то распределение имеет явно выраженный максимум в центре пучка с наличием "хвостов" за первоначальным размером пучка, соответствующим диаметру эмиссионного отверстия.

В экспериментах получение более высоких значений плотностей тока эмиссии и тока пучка ограничивалось мощностью формирующей линии, питающей основной разряд в частотном режиме. Для получения высокой плотности тока эмиссии была изменена конфигурация системы основного разряда и ускоряющего электрода. Диаметр эмиссионного отверстия сетчатого плазменного катода был уменьшен до 10 mm, а диаметр отверстия ускоряющего электрода — до 15 mm. В такой системе была получена плотность тока эмиссии до 100 A/cm^2 (рис. 2, b) при токе разряда $\sim 140 \text{ A}$, токе эмиссии $\sim 80 \text{ A}$ и токе коллектора $\sim 70 \text{ A}$. Эффективность извлечения $\alpha \sim 0.5-0.6$, что соответствует гео-

метрической прозрачности сетки с ячейкой $0.3 \times 0.3 \text{ mm}$, которая использовалась в этом случае.

Профиль поперечного сечения пучка, определенный по прожигу системы тонких Al фольг, показал, что на входе в соленоид диаметр пучка равен диаметру отверстия ускоряющего электрода, затем пучок сжимается до диаметра 12 mm и практически не изменяется до выхода из магнитного поля соленоида на расстоянии 30 cm от эмиссионного отверстия.

Обсуждение результатов

1. При одинаковых формах импульсов тока разряда (рис. 2) наблюдаются различия в эмиссионных и коллекторных токах при изменении диаметра сетчатого эмиссионного электрода. В частности, при большем диаметре медленнее нарастает эмиссионный ток, а ток на коллекторе появляется с некоторой (порядка $2 \mu\text{s}$) задержкой относительно тока разряда. По всей вероятности, эти различия связаны с различными плотностями тока электронов, извлекаемых из плазмы. При высоких плотностях тока и концентрации электронов в пучке происходит более быстрое формирование плазменного анода в ускоряющем промежутке и компенсация пространственного заряда пучка в дрейфовом пространстве.

2. Размытие профиля распределения плотности тока на коллекторе может быть связано с различными факторами, и, в частности, в результате расплывания пучка за счет наличия тепловых скоростей и рассеяния электронов на молекулах газа при их движении в газонаполненном дрейфовом канале. Изменением профиля плотности тока в результате рассеяния при энергии 10 keV и давлении газа $10^{-1}-10^{-2}$ Pa можно пренебречь из-за малой величины дифференциального сечения рассеяния $\sigma = 5 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$. Влияние тепловых скоростей на расплывание пучка зависит от величины стандартной девиации [7].

$$\delta \approx t \left(\frac{kT_k}{m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $t = \int dz / (2eU/m)^{1/2}$ — время движения электронов в дрейфовом пространстве.

После прохождения через отверстие в ускоряющем электроде температура увеличивается до величины [8] $T_a = T_k(r_a/r_k)^2$, где T_k — температура электронов на катоде, r_a — радиус отверстия в ускоряющем электроде, r_k — радиус пучка на катоде. При разнице радиусов на 50% температура повышается не более чем в 1.5 раз и, как показывают расчеты, расплывание пучка на границе не превышает 0.8 cm. Таким образом, ни влиянием тепловых скоростей, ни рассеянием электронов за счет упругих взаимодействий нельзя объяснить полученный в эксперименте профиль распределения плотности тока в плоскости его измерения. Размытие профиля можно объяснить движением к коллектору электронов, образованных в результате ионизации газа, концентрация

которых, как указывалось выше, может на порядок величины превышать концентрацию электронов в пучке. Поступлением этих электронов на коллектор можно объяснить и увеличение длительности импульса тока на коллекторе после прекращения тока разряда. Максимум в распределении плотности тока на коллекторе в центре пучка при большом диаметре сетчатого электрода вызван его фокусировкой собственным магнитным полем в пространстве, где продольное магнитное поле еще не сформировано.

3. Невысокое значение коэффициента извлечения электронов при малом диаметре сеточного эмиссионного электрода, примерно равного прозрачности сетки, связано с уменьшением или с исчезновением отрицательного анодного падения потенциала вблизи сеточного электрода.

Заключение

Использование в сильноточных электронных источниках тлеющего разряда позволяет увеличить срок их непрерывной работы. Ограничения практического применения разряда в источниках заряженных частиц, связанные с высоким давлением газа, при котором загорается и горит разряд, могут быть сняты, если инициировать зажигание основного разряда дополнительным разрядом, в качестве которого в данной работе используется тлеющий разряд малой длительности, функционирующий при более высоких давлениях. В плазменном катоде на основе такого разряда получены плотности тока эмиссии до 100 A/cm^2 , сравнимые с плотностями тока плазменных эмиттеров на основе дуговых разрядов.

В газонаполненном диоде можно получать пучки с более высоким первеансом пучка по сравнению с вакуумным. Высокая эффективность транспортировки интенсивного электронного пучка, генерируемого газонаполненным диодом, обеспечивается за счет компенсации пространственного заряда пучка ионами, создаваемыми ионизацией газа пучком, причем в рассматриваемых диапазонах тока ($\sim 100 \text{ A}$) и давления ($10^{-1} - 10^{-2} \text{ Pa}$) газа аксиальное магнитное поле стабилизирует и улучшает его транспортировку.

Список литературы

- [1] Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 1. С. 44–48.
- [2] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687–693.
- [3] Визирь А.В., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 6. С. 27–31.
- [4] Gushenets V.I., Koval N.N., Schanin P.M., Tolkachev V.S. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1999. Vol. 27. N 4. P. 1055–1059.
- [5] Аланакян Ю.Р., Штернов Н.П. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 1. С. 134–136.
- [6] Лазаренко Ф.В., Чебуков Е.С., Энгелько В.И. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 7. С. 159–161.

- [7] Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 303 с.
- [8] Кириштейн П.Г., Кайно Г.С., Уотерс У.Е. Формирование электронных пучков. М.: Мир, 1970. 360 с.