

УДК 537.525.5, 537.533.9, 537.533.7

ПЛАЗМЕННЫЕ СЕТОЧНЫЕ КАТОДЫ НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ИНТЕНСИВНОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМОНАПОЛНЕННОМ ДИОДЕ С ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2019 г. В. Н. Девятков¹, *, Н. Н. Коваль¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: vlad@opee.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Описаны конструкции плазменных сеточных катодов на основе дугового контрагированного разряда, предназначенные для работы в условиях наличия неоднородного магнитного поля величиной до 35 мТл, проникающего в их газоразрядную систему из области транспортировки электронного пучка. Приведены параметры электронного источника, используемого для проведения процессов модификации поверхности материалов и изделий импульсным электронным пучком с целью изменения их эксплуатационных свойств.

DOI: 10.1134/S0367676519110097

ВВЕДЕНИЕ

Электронные пучки используются для решения многих задач как в технологической области, так и при проведении научных исследований. Традиционными областями использования интенсивных электронных пучков являются электронно-лучевая сварка, термическая обработка, получение мощного электромагнитного излучения (от рентгеновского до СВЧ), модификация поверхности материалов импульсным электронным пучком [1–3]. В последнем случае использование низкоэнергетических электронных пучков может быть более эффективным как с точки зрения снижения сложности изготовления и стоимости высоковольтного оборудования установок электронно-лучевой обработки материалов и изделий, так и с точки зрения снижения требований к элементам защиты от рентгеновского излучения. Однако использование низкоэнергетического пучка (с энергией электронов до нескольких десятков кэВ), но обеспечивающего необходимый для обработки поверхности материалов энергетический вклад (десятки Дж/см²) за один импульс тока пучка, определяет специфические требования к элементам электронного источника. Транспортировка относительно сильнотокового (сотни ампер) низкоэнергетического электронного пучка может быть осуществлена только

при его стабилизации в ведущем магнитном поле и ионной нейтрализации его пространственного заряда. Использование плазмонаполненного высоковольтного диода для генерации и транспортировки электронного пучка может обеспечить как режим его зарядовой нейтрализации, так и, за счет использования плазменного анода (без “физического” электрода), повысить электрическую прочность ускоряющего зазора. Особые требования предъявляются к катоду электронного источника, который должен работать при наличии в пространстве дрейфа пучка плазмы, значительного обратного ионного тока на катод и при этом формировать пучок с длительностью импульсов от десятков до сотен (и более) мкс. В качестве такого катода может быть использован плазменный катод с разрядной системой на основе дугового разряда низкого давления, в котором стабилизация границы эмиссионной плазмы осуществляется мелкоструктурной металлической сеткой. Однако необходимо учитывать то обстоятельство, что использование продольного магнитного поля, транспортирующего электронный пучок, может осложнить задачу создания газоразрядной системы плазменного катода, генерирующей эмиссионную плазму.

В данной работе приводится описание плазменных катодов на основе одно- и многоканального контрагированного дугового разряда, разра-

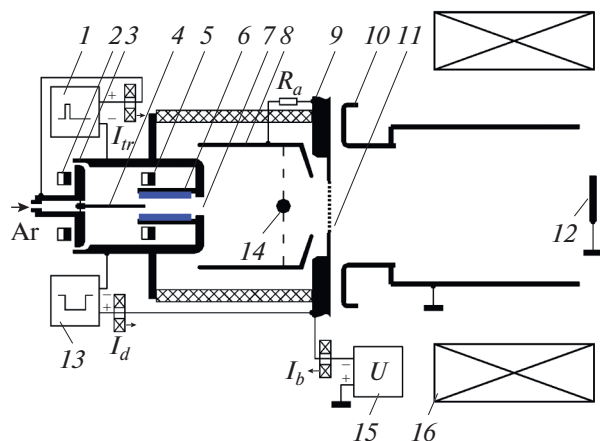


Рис. 1. Электродная схема плазменного катода на основе контрагированного дугового разряда. 1, 13 – источники электропитания, иницирующего и основного разрядов, 2, 5 – постоянные кольцевые магниты, 3, 4 – анод иницирующего разряда, 6 – катод разрядов, 7 – канал контрагирования разряда, 8 – анодная вставка, 9 – анод основного разряда, 10 – ускоряющий электрод и труба дрейфа пучка, 11 – эмиссионное сеточное окно, 12 – коллектор, 14 – корректирующий электрод, 15 – источник ускоряющего напряжения, 16 – соленоид магнитной системы. $R_a = 51$ Ом.

ботанных для работы в составе электронного источника серии СОЛО [4, 5], используемого в ряде установок [6–9].

КАТОД НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

В источниках СОЛО для генерации эмиссионной плазмы в плазменном катоде используется двухступенчатая газоразрядная система на основе дугового контрагированного разряда, иницируемого дополнительным разрядом в скрещенных электрическом и магнитном полях. Длительное время (>10 лет) используются катодные узлы [4], основным недостатком которых является ограниченный, вследствие обрывов в канале контрагирования, максимальный рабочий ток разряда. В [9, 10] описывается катодный узел, в котором за счет увеличения диаметра канала, через который горит дуговой разряд, максимальный ток разряда был увеличен до 300 А, а понижение стабильности иницирования основного разряда компенсируется использованием иницирующего разряда на основе отражательного разряда. На рис. 1 представлена конструкция плазменного катода, выполненного на основе нового катодного узла, являющегося модификацией [4]. В катодную полость диаметром 45 мм и длиной 75 мм был введен анодный электрод 4 (диаметром 2 мм и длиной 35 мм) и магнит 5 для улучшения зажигания иницирующего разряда,

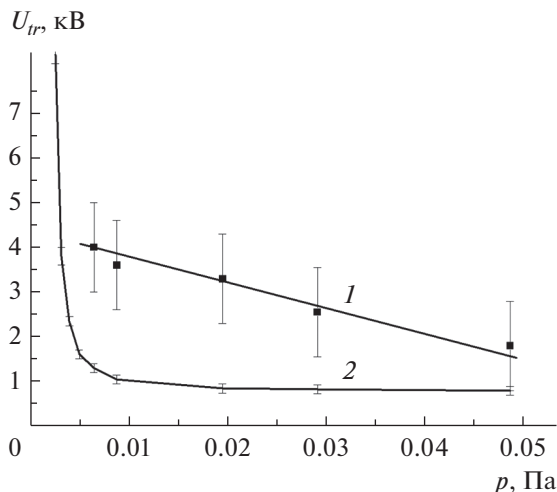


Рис. 2. Зависимости напряжения зажигания иницирующего разряда U_{tr} от давления p (Ar) в вакуумной камере установки при использовании магнита 5 с индукцией 0.05 (1) и 0.1 Тл (2).

что позволило увеличить диаметр канала контрагирования разряда 7 до 10–12 мм при длине канала 12 мм. На рис. 2 приведены зависимости напряжения зажигания иницирующего разряда от величины давления p рабочего газа (Ar), в вакуумной камере. При использовании кольцевого магнита 2 с максимальной индукцией магнитного поля до 0.1 Тл и магнита 5 с индукцией до 0.05 Тл наблюдался значительный разброс напряжения зажигания в разных импульсах (I на рис. 2). Зависимость 2 (рис. 2) получена при использовании магнитов 2, 5 с индукцией 0.1 Тл. В этом случае наблюдалось стабильное зажигание иницирующего разряда и можно отметить, что напряжение зажигания в рабочем диапазоне давлений электронного источника (~ 0.015 – 0.05 Па) не превышало 1 кВ и было ниже чем в [10]. Амплитуда тока иницирующего разряда в этой серии экспериментов $I_{tr} = 8$ А.

Основной дуговой разряд горит с магниевой (Mg) вставки катода 6 (внутренний диаметр 10 мм, длина 35 мм) через канал 7 на эмиссионный электрод 9. Для этого плазменного катода диаметр эмиссионного сеточного окна 11 составлял 40 мм, а диаметр отверстия в электроде 8 (перед эмиссионной сеткой) 50 мм. Так как горение разряда происходит в магнитном поле, проникающем в газоразрядную систему из области транспортировки электронного пучка, то при использовании одного канала, контрагирующего разряд, не удается обеспечить нужное распределение плотности эмиссионной плазмы около эмиссионной сетки большого диаметра. Частично распределение плотности тока разряда по поверхности эмиссионной сетки может быть скорректиро-

вано при использовании перераспределяющего электрода 14 [5].

КАТОД С МУЛЬТИКОНТРАГИРОВАННЫМ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

В [12, 13] была описана разрядная система плазменного катода на основе мультиканального контрагированного дугового разряда для генерации осесимметричного (круглого) электронного пучка, а в [14] подобная разрядная система была использована для генерации ленточного электронного пучка. На рис. 3 представлена схема плазменного катода на основе многоканального разряда. Для снижения задержки зажигания основного разряда, в конструкцию [13] был введен дополнительный Mg – катод 6 (длиной 15 мм, внешним и внутренним диаметром 18 и 10 мм соответственно). Использование в разрядной системе нескольких каналов, через которые горит основной разряд (восемь с диаметром 6.5 мм, расположенных по окружности диаметром 55 мм, и одного центрального с диаметром 3 мм) позволило использовать эмиссионную сетку с диаметром до 60 мм и обеспечить за счет выбора величины магнитного поля необходимое распределение плотности разрядного тока по ее сечению, позволяющее получить электронный пучок увеличенного диаметра.

ПАРАМЕТРЫ КАТОДОВ В РЕЖИМЕ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Газоразрядные системы плазменных катодов (рис. 1 и 3) при указанной геометрии электродов способны обеспечивать разрядные токи с верхним пределом не менее 400 А при напряжении горения разряда 30–100 В (в зависимости от амплитуды тока разряда и величины давления рабочего газа). Увеличение максимального разрядного тока рассматриваемых систем было достигнуто прежде всего за счет увеличения диаметра каналов через которые проходит ток разряда. Ток дугового разряда в основном замыкается на эмиссионную сетку и часть электрода 9. Ток анодной вставки 8 равный $I_a = 0.4–1$ А ограничивается, вероятно, в основном возникновением падения напряжения на сопротивлении R_a (20–50 В относительно анода 9).

В режиме извлечения с плазменных катодов электронного пучка задача достижения максимальной прочности ускоряющего зазора и получения максимальной амплитуды тока электронного пучка до $I_b = 400$ А была решена путем использования в катодах эмиссионной сетки с уменьшенным размером ячейки 0.15×0.15 мм (ранее использовалась сетка с ячейками 0.33×0.33 мм). Режим генерации пучка в диоде с плазменным анодом, формирующемся за счет ионизации рабочего газа са-

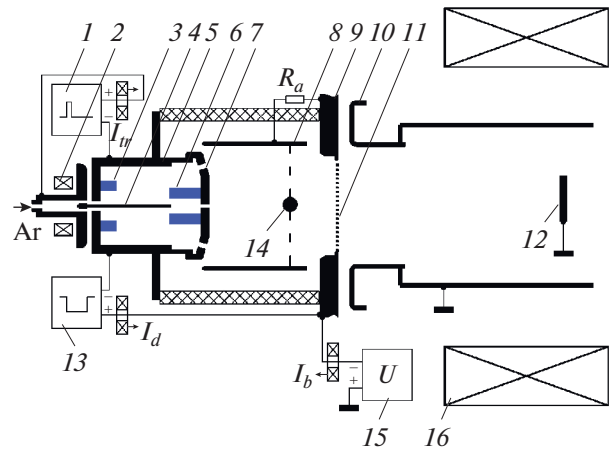


Рис. 3. Электродная схема плазменного катода на основе мультиконтрагированного дугового разряда. 1, 13 – блоки питания разрядов, 2 – магнит, 3 – Mg-катод, 4 – анод иницирующего разряда, 5 – корпус катодного узла ($\varnothing 55$ мм, длина 63 мм), 6 – дополнительный Mg-катод, 7 – контрагирующие каналы, 8 – анодная вставка ($\varnothing 80$ мм, длина 80 мм), 9 – анод основного разряда, 10 – ускоряющий электрод и труба дрейфа пучка, 11 – эмиссионное сеточное окно, 12 – коллектор, 14 – корректирующий электрод, 15 – источник ускоряющего напряжения, 16 – соленоид магнитной системы.

мом электронным пучком, в значительной мере зависит от давления рабочего газа. Это связано как с установлением границы анодной плазмы, так и с процессами в плазменном катоде около эмиссионной сетки.

На рис. 4а, 4б приведены осциллограммы токов и напряжения на разрядном промежутке U_d первого катода (рис. 1). При низком давлении ток пучка I_b может составлять менее 0.5 от тока разряда I_d (рис. 4а) и наблюдаются колебания на осциллограммах токов I_b , I_d и напряжения U_d . При увеличении расхода газа и соответственно повышении рабочего давления (рис. 4б) происходит как уменьшение уровня шумов, так и постепенное переключение тока разряда с анодно-сеточного электрода в ячейки эмиссионной сетки (в ускоряющий промежуток). При относительно больших токах ($I_b \geq 300$ А) колебания на токе пучка наблюдаются и при повышении давления, но становятся более низкочастотными. Колебания на токе пучка связаны, вероятно, с движением плазменного анода, изменением ионного тока на катод и параметров плазмы около эмиссионной сетки. Подобный режим наблюдался, например, в [15]. На рис. 4в приведены осциллограммы для второго катода (рис. 3).

При подключении основного разряда к источнику электропитания по характеристикам близкого к источнику тока, получены импульсы токов разряда с длительностью фронта тока I_d не более

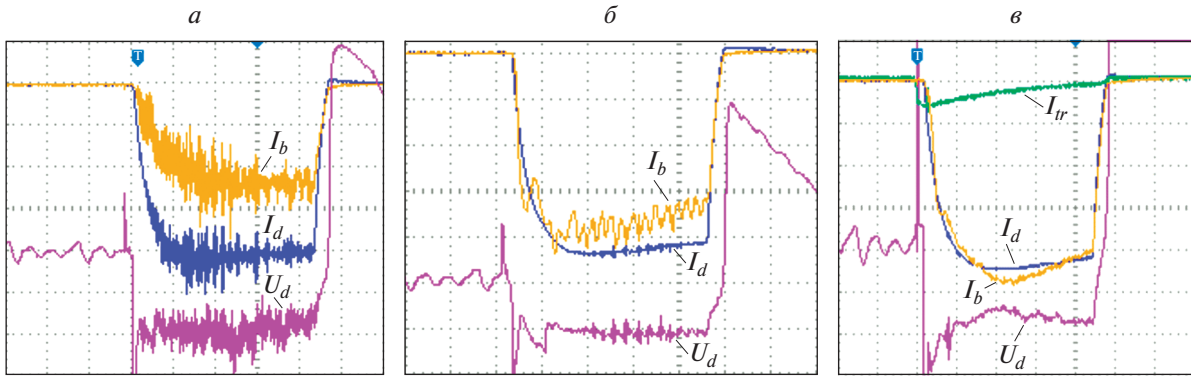


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжения U_d для катода по схеме рис. 1 (а, б) и катода по схеме рис. 3 (в) при $p = 0.015$ (а), $p = 0.05$ (б), $p = 0.025$ Па (в). Масштаб: 100 А/дел. (10 А/дел. для I_{tr}), 50 мкс/дел., 40 В/дел.

5 мкс [9] и электронный пучок с амплитудой тока до 400 А, при длительности импульсов тока 350 мкс и ускоряющем напряжении до $U = 20\text{--}25$ кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные плазменные катоды позволяют формировать низкоэнергетический (5–25 кэВ) импульсный (20–350 мкс) электронный пучок с максимальной амплитудой тока до 400 А. Рабочий диаметр пучка составляет 20–30 мм для первого катода (рис. 1) и до 50–60 мм при работе со второй мультicanaльной разрядной системой (рис. 3). Несмотря на менее стабильное иницирование основного разряда и возможное неоднородное горение основного разряда через несколько каналов контрагирования, определяемое относительно малой крутизной вольтамперной характеристики разряда в области контрагирующих отверстий, вторая система может обеспечивать как эмиссию пучка с увеличенным начальным диаметром, так и коррекцию распределения плотности тока разряда по диаметру эмиссионной сетки. Уменьшение плотности тока эмиссии в центральной части пучка позволяет получить даже при отсутствии дополнительного перераспределяющего электрода (14 на рис. 3) неравномерность распределения плотности энергии на коллекторе менее $\leq 10\%$ [13].

Использование эмиссионной сетки с более мелкой ячейкой (размером 0.15×0.15 мм) привело к снижению эффекта изменения напряжения на межэлектродном промежутке основного разряда U_d [16], возникающего за счет повышения потенциала плазмы относительно эмиссионно-сеточного электрода и проникновения положительного потенциала из ускоряющего промежутка высоковольтного диода через ячейки сетки в разрядную систему при наличии большого ионного потока на плазменный катод. Это в значительной

мере позволило увеличить максимальный рабочий ток электронного источника. Снижение тока пучка, происходящее за счет снижения коэффициента извлечения (отношения тока эмиссии к току разряда) при использовании сетки с меньшим размером ячейки, можно скомпенсировать увеличением рабочего давления. Ток пучка растет в этом случае как за счет увеличения концентрации плазмы в плазменном катоде и изменения условий сеточной стабилизации ее границы, так и частично за счет увеличения той доли пучка, которую вносит процесс вторичной ионно-электронной эмиссии с плазменного катода [17].

Достигнутый уровень амплитуды тока пучка (ограниченный использованными источниками электропитания разряда) вероятно не является предельным, так как плотность эмиссионного тока при $I_b = 400$ А и эмиссионной сетке диаметром 4 см составляла $j \sim 30$ А/см², а в условиях экспериментов [14] сетка с такой же ячейкой позволяла обеспечить плотность тока эмиссии до $j \sim 120$ А/см².

Увеличение максимальной амплитуды тока пучка важно для получения необходимой плотности энергии пучка при увеличении его сечения или использовании импульсов с уменьшенной длительностью. Плотность энергии в электронном пучке после его транспортировки в продольном магнитном поле, достигающая нескольких десятков Дж/см² для импульсов короткой длительности (десятки мкс) и более 100 Дж/см² за импульс (при длительности сотни мкс), достаточна для проведения модификации поверхностного слоя широкого круга материалов и изделий. Обеспечивая возможность воздействия импульсным электронным пучком в широком диапазоне изменения его параметров (как по длительности, так и по величине энергии) электронный источник с описанными плазменными катодами позволяет проводить как научные исследования процессов модификации поверхности материалов и изделий, так и

проводить разработку оптимальных технологических процессов на основе их результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д. и др. // Изв. вузов. Физ. 2013. Т. 56. № 10. С. 41; Koval N.N., Ivanov Y.F., Teresov A.D. et al. // Russ. Phys. J. 2014. V. 56. № 10. P. 1150.
2. Озур Г.Е., Прокурковский Д.И., Карлик К.В. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 58; Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Karlik K.V. // Instr. Exp. Techn. 2005. V. 48. № 6. P. 753.
3. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. // Vacuum. 2001. V. 62. P. 211.
4. Коваль Н.Н., Девятков В.Н., Григорьев С.В., Соцугов Н.С. // Тр. II межд. Крейнделевского семина. "Плазменная эмиссионная электроника". (Улан-Удэ, 2006). С. 79.
5. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. // Тр. V межд. Крейнделевского семина. "Плазменная эмиссионная электроника" (Улан-Удэ, 2015). С. 122.
6. Koval N.N., Sochugov N.S., Devyatkov V.N. et al. // Proc. 8th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. (Tomsk, 2006). P. 51.
7. Grigoriev S.V., Devyatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. // Proc. 9th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. (Tomsk, 2008). P. 19.
8. Григорьев С.В., Девятков В.Н., Миков А.В. и др. // Изв. вузов. Физ. 2014. Т. 57. № 11/3. С. 58.
9. Devyatkov V.N., Ivanov Y.F., Krysin O.V. et al. // Vacuum. 2017. № 143. P. 464.
10. Devyatkov V.N., Vorobyov M.S., Koval N.N., Shugurov V.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 652. Art. № 012066.
11. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. // Изв. вузов. Физ. 2017. Т. 60. № 9. С. 44; Devyatkov V.N., Koval N.N. // Russ. Phys. J. 2018. V. 60. № 9. P. 1509.
12. Devyatkov V.N., Koval N.N. // Изв. вузов. Физ. 2016. № 9/2. С. 49.
13. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. // Изв. вузов. Физ. 2017. № 10/2. С. 32.
14. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. // Сб. матер. и докл. 2-ой Межд. конф. "Электронно-лучевая сварка и смежные технологии". (Москва, 2017). С. 161.
15. Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. // ЖТФ. 2013. Т. 83 № 10. С. 32; Gavrilov N.V., Kamenetskikh A.S. // Techn. Phys. 2013. V. 58. № 10. P. 1426.
16. Devyatkov V.N., Koval N.N. // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 552. Art. № 012014.
17. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N. et al. // IEEE Transact. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 10. P. 1890.