

Особенности функционирования разрядной системы вакуумной дуги с катодом из чистого бора в импульсном режиме

В. И. Гушенец, А. С. Бугаев, Е. М. Окс

Проведены экспериментальные исследования импульсного вакуумного дугового разряда с катодом из чистого бора. Поскольку в нормальных условиях бор имеет высокое удельное сопротивление ($1,8 \times 10^6$ Ом см), инициирование дугового разряда требует нагрева катода до температур выше $600-650$ °С, при которых бор приобретает заметную проводимость. Представлены результаты, касающиеся зажигания дугового разряда с катодом из бора и обеспечения стабильности его горения, а также результаты измерения параметров разряда, оптического эмиссионного спектра и масс-зарядового состава дуговой плазмы. Практически на 100 % плазма, сформированная разрядом, состоит из одно- и двухзарядных ионов бора, в соотношении 1:1.

Ключевые слова: вакуумный дуговой разряд, ионы бора, плазма вакуумной дуги, магнитный сепаратор, масс-зарядовый состав ионов плазмы.

Введение

Вакуумный дуговой разряд с катодным пятном является эффективным генератором плотной плазмы, используемой в различных практических применениях. Формирование покрытий с использованием вакуумного дугового разряда ограничивается в основном катодными материалами из металлов и некоторыми полупроводниковыми материалами с высокой проводимостью. В последнее время наблюдается активная исследовательская деятельность в осаждении неметаллических (полупроводниковых и керамических) пленок на мишени. Особый интерес связан с формированием покрытий из бора и его соединений (карбида и нитрида бора) ввиду уникальности свойств этого материала. Эти покрытия находят применение в научных исследованиях по термоядерному синтезу [1], сверхпроводимости [2] и в ряде других приложений [3, 4].

Бор обладает полупроводниковыми свойствами и в нормальных условиях имеет высокое удельное сопротивление ($\sim 1,8$ МОм см), что не позволяет его использовать в вакуумно-дуговых разрядных системах в качестве катода без создания специальных условий. Как и практически любой полупроводниковый материал, бор имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления, т. е. увеличение температуры бора приводит к снижению его удельного сопротивления.

Такой подход ранее был использован в планарном магнетроне, в котором в результате предварительного нагрева мишени (катода) из бора был реализован сильноточный импульсный режим горения разряда с самораспылением мишени и получена плазма с содержанием ионов бора более 90 % [5]. Однако для тлеющего разряда принципиальным ограничением тока магнетронного разряда, а, следовательно, и плотности плазмы, является переход разряда в дуговую форму. Именно поэтому достижение реализации стабильной дуги с катодом из чистого бора обеспечивает возможность дальнейшего повышения параметров плазмы бора.

На данный момент известны работы по инициированию катодного пятна на чистом боре и зажигание непрерывного или квазинепрерывного (длительностью в сотни миллисекунд) дугового разряда в парах материала катода за счет нагрева его до температур, при котором удельное сопротивление снизилось до величины менее 0,1 Ом см [1, 6, 7].

Несмотря на демонстрацию принципиальной возможности реализации дуги с катодом из

Гушенец Василий Иванович¹, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Бугаев Алексей Сергеевич¹, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Окс Ефим Михайлович^{1,2}, зав. лабораторией, д.т.н.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. 8 (3822) 49-19-33. E-mail: gvi@opee.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2017 г.

чистого бора, вопросы стабильного инициирования катодного пятна на боре, условия горения дугового разряда в импульсном режиме, впрочем, как и параметры дуговой плазмы изучены недостаточно. В этой работе мы представляем результаты экспериментального исследования процессов инициирования вакуумного дугового разряда с катодом из чистого бора, а также результаты исследования в такой разрядной системе массового и масс-зарядового состава плазмы.

Техника эксперимента

Схематичное изображение созданной вакуумной дуговой разрядной системы с катодом из чистого бора приведено на рис. 1. В экспериментах использовался коммерчески доступный катод 1 из бора чистоты 99,6 %, производимый компанией GoodFellow (<https://www.goodfellowusa.com>) и представляющий собой цилиндр длиной 15 мм и диаметром 10 мм. Катод закреплялся в молибде-

новой оправке 5. Для предотвращения перехода катодного пятна с катода на оправку и зажигания дугового разряда с молибденовой детали оправка имеет в выходной части проточку. С этой же целью используется изолятор 8, выполненный из пластины нитрида бора BN. Спираль нагревателя 4 изготовлена из вольфрамовой проволоки диаметром 0,7 мм. Для снижения тепловых потерь нагревателя установлен тепловой экран 6. Поджигающий электрод выполнен из вольфрамового прутка диаметром 1,6 мм. Все остальные детали изготовлены из нержавеющей стали.

Разрядное устройство смонтировано на фланце, имеющем каналы для прокачки охлаждающей жидкости (деионизованной воды или трансформаторного масла). Спираль нагревателя, его токовводы и тепловой экран находятся под плавающим потенциалом, что также препятствует зажиганию дугового разряда между деталями катододержателя и анодом.

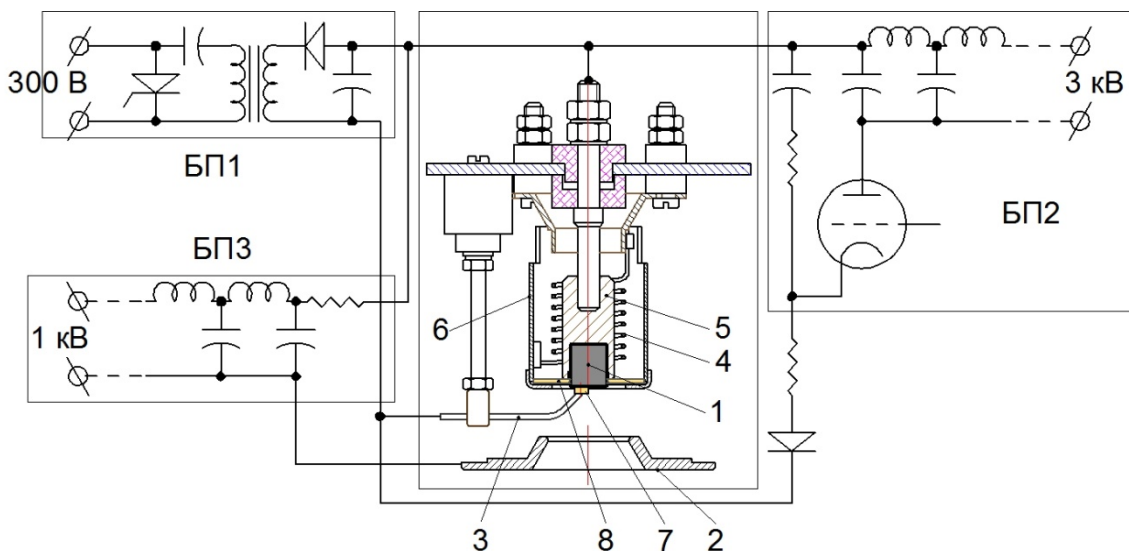


Рис. 1. Разрядная система вакуумной дуги. 1 – катод, 2 – анод, 3 – поджигающий электрод, 4 – нагреватель, 5 – держатель катода, 6 – тепловой экран, 7 – диэлектрическая таблетка, 8 – изолятор из BN, БП1, БП2 и БП3 – блоки питания.

Инициирование катодного пятна осуществляется пробоем по поверхности диэлектрической таблетки 7, выполненной из вакуумноплотной корундовой керамики ВК94-1. На поверхность таблетки нанесен графитовый слой для облегчения зажигания дугового разряда. Диаметр этой таблетки не более 2,5 мм, а толщина 1 мм. Таблетка прижимается к поверхности катода 1 поджигающим электродом 3 и за счет его упругости удерживается на поверхности катода.

Для инициирования катодного пятна и зажигания дугового разряда используются три источника питания, два из которых подключены к поджигающему электроду, а третий к аноду. Генера-

тор высоковольтных импульсов БП1 с тиристорным ключом имеет следующие параметры: амплитуда напряжения холостого хода до 15 кВ, ток короткого замыкания до 40 А и длительность токового импульса не более 20 мкс.

Источник питания БП2 с тиратронным коммутатором более мощный (в отличие от генератора высоковольтных импульсов БП1) с амплитудой напряжения холостого хода до 3 кВ. Этот источник способен сформировать токовый импульс длительностью 100 мкс и амплитудой до 100 А на нагрузке 15 Ом.

Третий источник питания разряда БП3 не имеет коммутирующего элемента, подключен к

аноду, используется для переключения и зажигания основного разряда в цепи анода. Длительность формируемого этим источником питания токового импульса до 300 мкс, а максимальная возможная амплитуда тока 100 А.

Результаты эксперимента

Все эксперименты, результаты которых приводятся ниже, проводились без напуска буферного газа в камеру и при давлении остаточного газа не выше чем 10^{-6} мм рт. ст. Перед началом работы катод разогревался до температуры 600 ± 650 °С излучением с раскаленной спирали нагревателя. Измерение температуры катода производилось с помощью тепловизора фирмы Fluke. После достижения требуемой температуры на поджигающий электрод подавалось импульсное напряжение от генератора высоковольтных импульсов, что приводило к пробое, развивающемуся по поверхности диэлектрической таблетки. В результате частичного испарения проводящего слоя с поверхности изолятора загорался разряд в парах материала слоя. Одновременно или с задержкой в несколько микросекунд к поджигающему электроду прикладывалось напряжение от второго источника питания. Между катодом и поджигающим электродом зажигается дуговой (назовем его «подхватывающий») разряд с ярко светящейся областью малого размера на катоде, которое можно интерпретировать как катодное пятно. В процессе горения разряда пленка из графита на поверхности таблетки замещается на пленку из чистого бора. При недостаточной температуре катода инициирование разряда не происходило, а имел место только емкостной слаботочный разряд на фронте высоковольтного импульса.

При наличии напряжения на конденсаторах формирующей линии БПЗ и достаточной величине тока «подхватывающего» разряда (от 70 А) возникал разряд в цепи анода. Без «подхватывающего» разряда основной разряд не формируется. Осциллограммы импульсов тока, измеренные в цепях поджигающего электрода, анода, и напряжение на промежутке катод–анод показаны на рис. 2. Обратим внимание на тот факт, что приведенная осциллограмма напряжения U_d представляет собой сумму напряжения горения разряда и падения напряжения на катодном столбике за счет протекающего через него тока. Уменьшение напряжения анод–катод связано с дальнейшим прогревом последнего.

Для дуги с катодом из чистого бора достаточно часто наблюдаются обрывы тока основного

разряда I_d (см. рис. 2, осциллограмма $I_d - 2$), возникающие после прекращения тока «подхватывающего» I_{ig} . Обрыву тока предшествует сильная модуляция на осциллограммах напряжения с дальнейшим резким его увеличением. Время возникновения обрыва нестабильно, но чем ниже температура катода, тем раньше возникает срыв, сдвигаясь влево по временной шкале вплоть до момента прекращения тока инициирования.

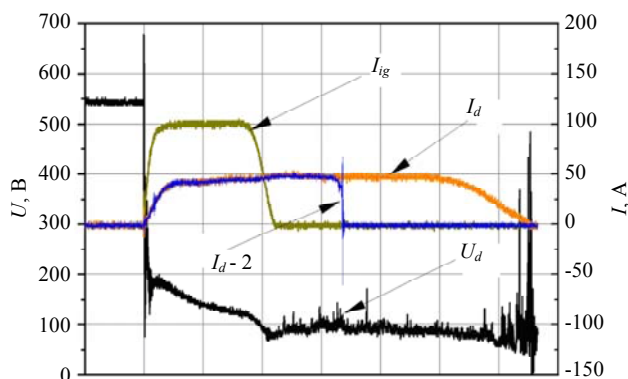


Рис. 2. Осциллограммы тока подхватывающего разряда в цепи поджигающего электрода (I_{ig}), тока основного разряда в цепи анода (I_d) и напряжения катод-анод (U_d). Развертка по горизонтали – 50 мкс на деление.

Вероятно, возникающие обрывы тока основного разряда связаны с относительно небольшим напряжением на линии БПЗ и значительным расстоянием анод-катод. Так, когда отодвинули анод еще на 1 см, срыв тока стал наблюдаться каждый импульс и в точке, где ток I_{ig} обращался в ноль. Причина, заставившая отодвинуть анод, состояла в возникающих пятнах, часто называемых анодными, на его кромке. Использование анода из молибдена не избавило от анодных пятен, и только увеличение расстояния до катода с 13 до 20 мм значительно снизило частоту их возникновения.

Наличие анодных пятен приводит к появлению в спектре атомов и ионов материала электрода. В таблице приведены результаты обработки оптического спектра свечения плазмы, полученного с помощью волоконно-оптического спектрометра USB2000 фирмы Ocean Optics. Расшифровка оптического спектра свечения плазмы показывает, что наряду с линиями, принадлежащими бору, в спектре присутствуют линии вольфрама, углерода и водорода, хотя их интенсивность и невелика. Наличие линий углерода и водорода связано с парами масла в остаточном газе, а появление линий вольфрама вызвано возникновением анодного пятна на поджигающем электроде.

Таблица

Состав оптического спектра свечения плазмы. λ – длина волны в нм, V – интенсивность линии в %

λ , нм	206,5	249,7	279,3	345,2	412,2	447,3	486,5	494,0	589,2	656,3	703,7
V , %	26,96	3,39	3,32	52,71	3,63	0,81	0,67	2,09	2,24	1,64	2,54
Элемент	B	B	W	B	B	B	W	B	C	H	C

Анализ полученных цветных фотографий, снятый с помощью фотоаппарата Canon EOS-650D, позволил установить, что в зоне, прилегающей к поджигающему электроду, имеется небольшая светящаяся область с фиолетовым оттенком. Этот эффект – результат возникновения анодного пятна на данном электроде вследствие большой концентрации плазмы и небольшой собирающей поверхности положительного электрода. Для замыкания тока в области, прилегающей к поджигающему электроду, возникает положительное анодное падение, часто приводящее к контрагированию разряда и образованию анодного пятна.

В отличие от катодного пятна на металлических катодах, пятно на катоде из чистого бора малоподвижно, остается в месте возникновения и с ростом тока, длительности токового импульса и мощности в разряде оно увеличивается в размерах за счет прогрева прилегающих областей. Такой дуговой разряд можно было бы интерпретировать как разряд с диффузной привязкой пятна на катоде, если бы не поток микрокапель. Визуальное наблюдение за горением разряда, а также анализ полученных фотографий показали, что горение дугового разряда с катодом из бора сопровождается значительным потоком раскаленных микрочастиц. Тогда как дуговой разряд с диффузной привязкой на катоде характеризуется малой величиной потока микрокапель [7].

Исследование масс-зарядового состава генерируемой дуговым разрядом плазмы выполнялось с использованием сепаратора заряженных частиц на основе 90-градусного секторного магнита с радиусом центральной орбиты 36 см. При этом дуговая разрядная ячейка была встроена в полый анод ионного источника с системой формирования и ускорения ионного пучка. С помощью диафрагмы из извлекаемого ионного пучка с током 200 мА и диаметром 60 мм вырезали его часть с размерами 6×40 мм и далее её пропускали через магнит сепаратора. Сепарированный ионный пучок почти на 100 % состоит из ионов бора одно- и двухзарядных (см. рис. 3), амплитуды остальных составляющих, если они и существуют, незначительны и не обнаруживаются на фоне шума. На осциллограммах токи составляющих пучка приведены в величинах, отражающих количество ионов той или ионной масс-зарядовой фракции, когда изме-

ренная величина тока этой фракции делится на величину заряда.

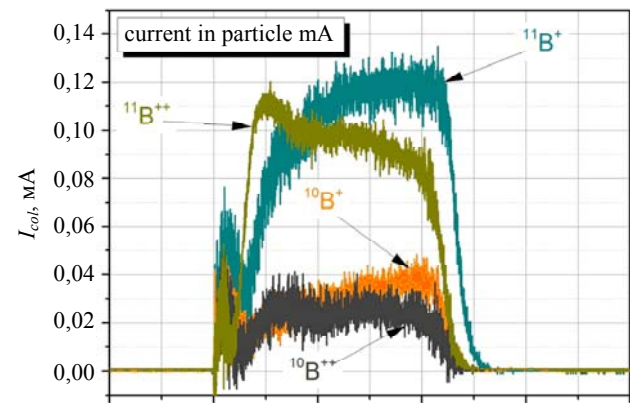


Рис. 3. Осциллограммы токов составляющих сепарированного ионного пучка I_{col} . Горизонтальная развертка 25 мкс/дел.

В отличие от планарного магнетрона с мишенью из бора [5], в плазме которого генерировались лишь однозарядные ионы бора, в плазме импульсного дугового разряда доля двухзарядных ионов бора сравнима с однозарядными даже для достаточно длинных импульсов. Из представленной на рис. 3 формы импульса тока ионов двухзарядного компонента $^{11}B^{2+}$ видно, что с течением времени горения разряда доля двухзарядных ионов бора снижется, а однозарядных ионов растет.

Изменением длительности разрядного тока можно варьировать масс-зарядовый состав сформированной дуговым разрядом плазмы, например, при длительности до 20÷25 мкс в плазме преобладают двухзарядные ионы, а в непрерывном режиме горения в плазме присутствуют только однозарядные ионы бора [6].

Заключение

Вакуумный дуговой разряд с катодным пятном является одним из возможных методов ионного осаждения пленок на мишени наряду с магнетронным и термоионным разрядами. Но, в отличие от последних, для дугового разряда не требуется подачи рабочего газа, так как разряд горит в парах материала катода. Поэтому следует ожидать, что состав генерируемой плазмы будет состоять только из ионов материала катода.

Именно с целью получения пучка, содержащего только ионы бора, без сепарации последнего

нами была разработана специальная конструкция разрядного устройства с катодом из чистого бора. Для инициирования катодного пятна на катоде и зажигания дугового разряда в парах бора нами была разработана специальная конструкция катодного узла с нагревом катода до температур 600–650 °С. Измерения оптического спектра излучения плазмы, генерируемой дуговым разрядом, показали, что наряду с линиями, принадлежащими бору, имеются спектральные линии вольфрама, углерода и водорода. Присутствие линий двух последних элементов – это не проблема, поскольку переход к безмасляным средствам получения вакуума позволит избавиться от упомянутых элементов. С вольфрамом дело обстоит гораздо сложнее, т.к. пока нет полного понимания, как решить проблему анодного пятна, возникающего на поджигающем электроде.

Сформированный ионный пучок на 100 % состоит из одно- и двухзарядных ионов бора, и отношение их ионных токов зависит от длительности импульса разрядного тока. Для длительности импульса 100 мкс отношение токов однозарядных ионов бора к двухзарядным в среднем за импульс близко к единице. Отсутствие в пучке ионов элементов, линии которых были обнаружены в оптическом спектре излучения плазмы, может быть связано с тем, что ионизация имеет

место в основном в области, прилегающей к катодному пятну, а также вследствие относительно малой величины их амплитуд они не обнаруживаются на фоне шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 16-19-10034.

ЛИТЕРАТУРА

1. Williams J. M., Klepper C. C., Olivers D. J., Hazelton R. C., Freeman J. H. / AIP Conference Proceedings. 2008. No. 1066. P. 469.
2. Balbag M. Z., Pat S., Cenik M. I., Akan T., Ekem N., Musa G. // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2007. Vol. 9. No. 4. P. 858.
3. Williams J. M., Klepper C. C., Chivers D. J., Hazelton R. C., Moschella J. J., and Keitz M. D. / AIP Conference Proceedings. 2008. No. 1066. P. 261.
4. Klepper C. C., Williams J. M., Truhan J. J., Qu J., Riestler L., Hazelton R. C., Moschella J. J., Blau P. J., Anderson J. J., Popoola O. O., Keitz M. D. // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. No. 10. P. 3070.
5. Vizir A., Nikolaev A., Oks E., Savkin K., Shandrikov M., Yushkov G. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. No. 2. P. 302.
6. Richter F., Peter S., Filippov V. B., et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1999. Vol. 27. No. 4. P. 1079.
7. Richter F., Krannich G., Hahnet J., et al. // Surf. Coat. Technol. 1997. Vol. 90. P.178.

PACS: 52.80.Mg

Specific features of a pulsed vacuum arc with a boron cathode

V. I. Gushenets¹, A. S. Bugaev¹, and E. M. Oks^{1,2}

¹Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskoy av., Tomsk, 634055, Russia

²Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050 Russia
E-mail: gvi@opee.hcei.tsc.ru

Received February 16, 2017

The paper presents experimental research results on a pulsed vacuum arc discharge with a cathode made of the commercially available boron. Boron is a wide-band-gap semiconductor having a high specific resistance (~1.8 MOhm cm) under normal conditions. Because of the so high resistance, the initiation of an arc discharge with a pure boron cathode requires preliminary heating of the cathode to temperatures above 600 °C. The discharge is initiated by a flashover of an alumina ceramic insulator separating the cathode and trigger electrode. In this paper, we report on the special vacuum arc evaporation source with a pure boron cathode and experimental data on the initiation of an arc discharge, stability of the discharge and its parameters, mass-charge state of the arc plasma and its optical emission spectrum. The arc plasma is almost 100 percent composed of singly and doubly charged

boron ions with a ratio close to 1/1 (in particle-current units) at a discharge current pulse duration of 20–100 μs.

Keywords: boron vacuum arc, bending magnet, mass charge spectrum, boron ion plasma.

REFERENCES

1. J. M. Williams, C. C. Klepper, D. J. Olivers, R. C. Hazelton, and J. H. Freeman, in *AIP Conference Proceedings* (2008). P. 469.
2. M. Z. Balbag, S. Pat, M. I. Cenik, T. Akan, N. Ekem, and G. Musa, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. **9**, 858 (2007).
3. J. M. Williams, C. C. Klepper, D. J. Chivers, R. C. Hazelton, J. J. Moschella, and M. D. Keitz, in *AIP Conference Proceedings* (2008). P. 261.
4. C. C. Klepper, J. M. Williams, J. J. Truhan, J. Qu, L. Riestler, R. C. Hazelton, J. J. Moschella, P. J. Blau, J. J. Anderson, O. O. Popoola, and M. D. Keitz, *Thin Solid Films* **516**, 3070 (2008).
5. A. Vizir, A. Nikolaev, E. Oks, K. Savkin, M. Shandrikov, and G. Yushkov, *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 302 (2014).
6. F. Richter, S. Peter, V. B. Filippov, et al., *IEEE Transactions on Plasma Science* **27**, 1079 (1999).
7. F. Richter, G. Krannich, J. Hahnet, et al., *Surf. Coat. Technol.* **90**, 178 (1997).