

УДК 66.088

Вакуумная дуга на поликристаллическом кремниевом катоде

Духопельников Д. В.¹, Кириллов Д. В.^{1,*},

[*kinilovdv@gmail.com](mailto:kinilovdv@gmail.com)

Марахтанов М. К.¹, Воробьев Е. В.¹,

Булычев В. С.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе продемонстрирована возможность использования вакуумного дугового испарителя с арочным магнитным полем для испарения кремния и кремний содержащих сплавов. Показано, что в арочном магнитном поле переменной конфигурации дуговой разряд горит устойчиво, катодная привязка движется в центре арки магнитного поля, как в случае металлических катодом, разрушения катода не происходит. При малой индукции магнитного поля движение катодной привязки замедляется и начинается процесс локального расплавления катода с дальнейшим его разрушением. При увеличении индукции магнитного поля катодные пятна движутся равномерно по поверхности катода со скоростью до 5 м/с. Получены вольт-амперные характеристики разряда при различных значениях индукции арочного магнитного поля испарителя.

Ключевые слова: кремний, дуговой испаритель, вакуумная дуга, испарение, эрозия, технология

Введение

Тонкие плёнки кремния и его соединений широко используется в электронике, оптике и машиностроении. Кремний является перспективным материалом для изготовления литий-ионных аккумуляторов, а также является основным материалом для развивающейся наноэлектроники [1]. Покрытия из кремния и его соединений осаждают химическими и физическими методами в вакууме, например, магнетронными системами распыления. Устройства магнетронного распыления позволяют создавать высококачественные плёнки, при этом высока энергоёмкость процесса (500 эВ/атом) и низка скорость роста плёнки. Перспективным представляется использование метода вакуумного дугового осаждения, который имеет низкую энергоёмкость (50 эВ/атом) значительно более высокую производительность. При этом возможно гибко управлять потоками плазмы и структурой покрытия. В настоящее время этот метод не используются

для испарения кремния в связи со сложностью осуществления продолжительного горения дугового разряда на подобных материалах.

В работе [2] сообщается о дуге на дисковом катоде из поликристаллического кремния. При токе разряда 10-16 А напряжение изменялось от 15 до 50 В при давлении в вакуумной камере от $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. Скорость роста плёнок составила 82 нм/мин при токе разряда 14 А и расстоянии до катода 9,5 см. Время непрерывного горения разряда составило порядка 30 секунд. Впервые вакуумная дуга на промышленном дуговом испарителе с водоохлаждаемым монокристаллическим кремниевым катодом с проводимостью *p*-типа была описана в работе [3]. Разряд устойчиво горел при токе разряда 96-100 А, при напряжении 17,8 В. Продолжительность горения разряда до принудительного отключения питания составило 2 минуты 48 секунд. В течение этого времени произошло оплавление рабочей поверхности и разрушение части катода вследствие большой концентрации мощности на поверхности катода (рис. 1).

Таким образом, до сих пор не было предложено решения по способу устойчивого испарения кремния и сплавов на его основе посредством вакуумного дугового разряда.

Целью данной работы является исследование возможности устойчивого испарения кремния и сплавов на его основе с помощью вакуумного дугового испарителя с управляемым движением катодного пятна. Решение проблемы оплавления и разрушения катода предлагается решать путём равномерного распределения подводимой мощности по всей рабочей поверхности катода. В вакуумном дуговом разряде это может быть осуществлено с помощью управляемого движения катодной привязки внешним арочным магнитным полем [4, 5].



а)



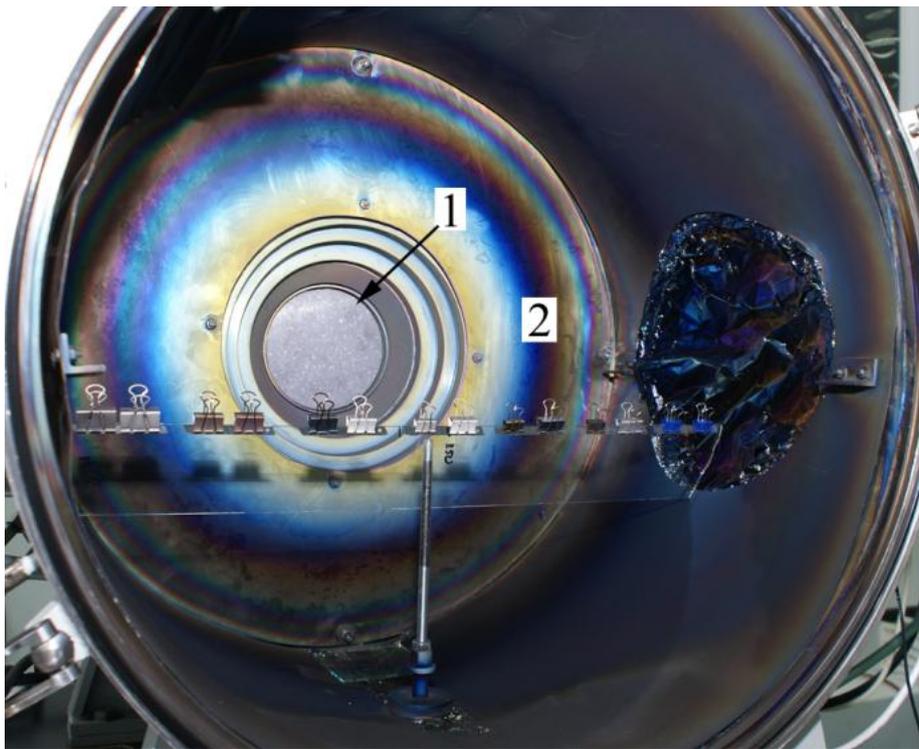
б)

Рис. 1. Кремниевый катод, на котором длительное время горела вакуумная дуга [3]

Оборудование

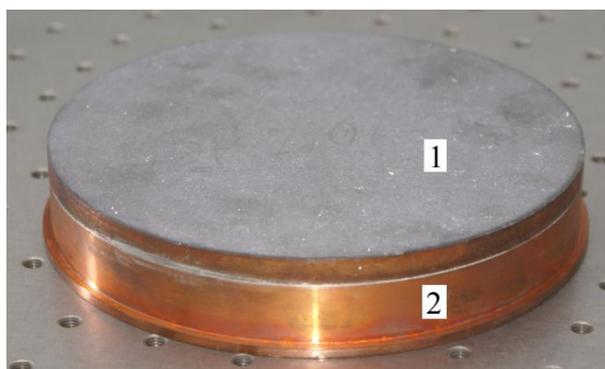
Работы проводились на установке вакуумного дугового осаждения покрытий, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Вакуумная камера представляла собой цилиндр диаметром 700 мм и длиной 500 мм (рисунок 2). Остаточное разряжение создавалось с помощью двух вакуумных насосов Oerlikon Leybold Trivac D65B и Oerlikon Leybold Turbovac TW 2401. Для напуска газов установка оснащена регуляторами расхода MKS Instr. 2179A и контроллером MKS Instr. 647C. Измерение вакуума производилось с помощью вакуумметра MKS Instr. Dual Mag 972B.

Промышленный образец вакуумного дугового испарителя был выполнен по торцевой схеме [6, 7]. На рабочей поверхности катода создавалось арочное магнитное поле с помощью двух электромагнитных катушек [8, 9]. Положение центра арки задавалось соотношением токов в катушках. Инициация дугового разряда осуществлялась инъекцией плазмы в межэлектродный зазор. Катод испарителя представлял собой диск диаметром 150 мм и толщиной 8 мм из сплава кремний-алюминий (90 % кремния, 10 % алюминия), который был напаян на медную основу индиевым припоем (рис. 3). Охлаждение медного основания катода производилось проточной водой.



1 – катод дугового испарителя; 2 – вакуумная камера (анод)

Рис. 2. Торцевой дуговой испаритель с кремниевым катодом

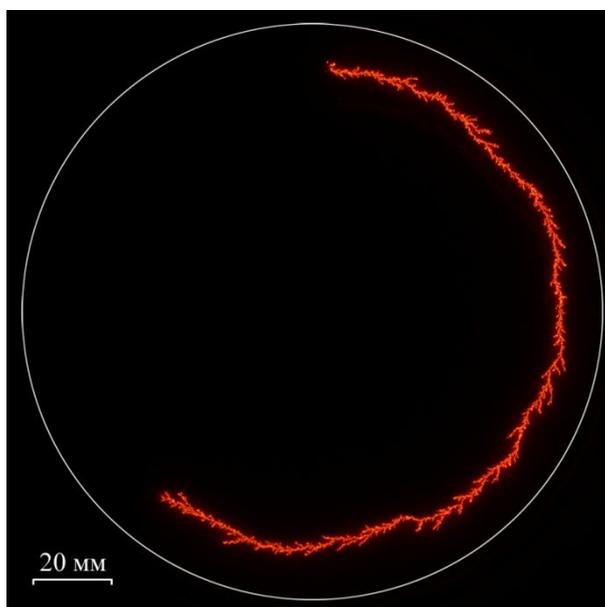


1 – диск из сплава кремний-алюминий; 2 – медное основание

Рис. 3. Катод, изготовленный из кремниевого сплава с медным основанием

Источником электрического питания для дугового испарителя служил сварочный инвертор EWM Tetrix 230 AC/DC с блоком согласования и инициации разряда, разработанным в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для контроля тока разряда использовался цифровой амперметр, встроенный в источник питания (точность 5 %). Напряжение разряда регистрировалось мультиметром Tektronix DMM4050.

Скорость движения катодных пятен по поверхности катода вычислялась по длине трека на фотографиях разряда при известном времени выдержки (рис. 4). Фотографирование проводилось фотокамерой Sony DSLR-A100 с выдержкой 1/20 с.



а) ток разряда 100 А, индукция магнитного поля 2,5 мТл; б) ток разряда 100 А, индукция магнитного поля 11 мТл

Рис. 4. Фото движущихся катодных пятен при различном магнитном поле и токе разряда 100 А. Выдержка 1/20 секунды. Белой окружностью показана граница катода

Эксперимент

Перед пуском дугового испарителя вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $1 \cdot 10^{-3}$ Па, затем в камеру напускался аргон до давления $1,6 \cdot 10^{-2}$ Па. После зажигания дугового разряда через 30 секунд установилось устойчивое движение катодных пятен внутри арки магнитного поля (рис. 4). Движение катодных пятен происходило в антиамперовом направлении, как в случае с металлическим катодом [9].

Вакуумная дуга горела устойчиво в диапазоне токов от 30 до 130 А. При токе разряда меньше 30 А зажигание разряда было затруднено, разряд горел нестабильно. Напряжение разряда изменялось от 18,7 до 25,6 В при различных токах разряда и индукции магнитного поля. Зависимости напряжения от тока разряда приведены на рис. 5. Напряжение при увеличении тока разряда растёт монотонно по линейному закону для всего диапазона индукций магнитного поля. Увеличение индукции магнитного поля приводит к сдвигу вольт-амперной характеристики в область более высоких напряжений.

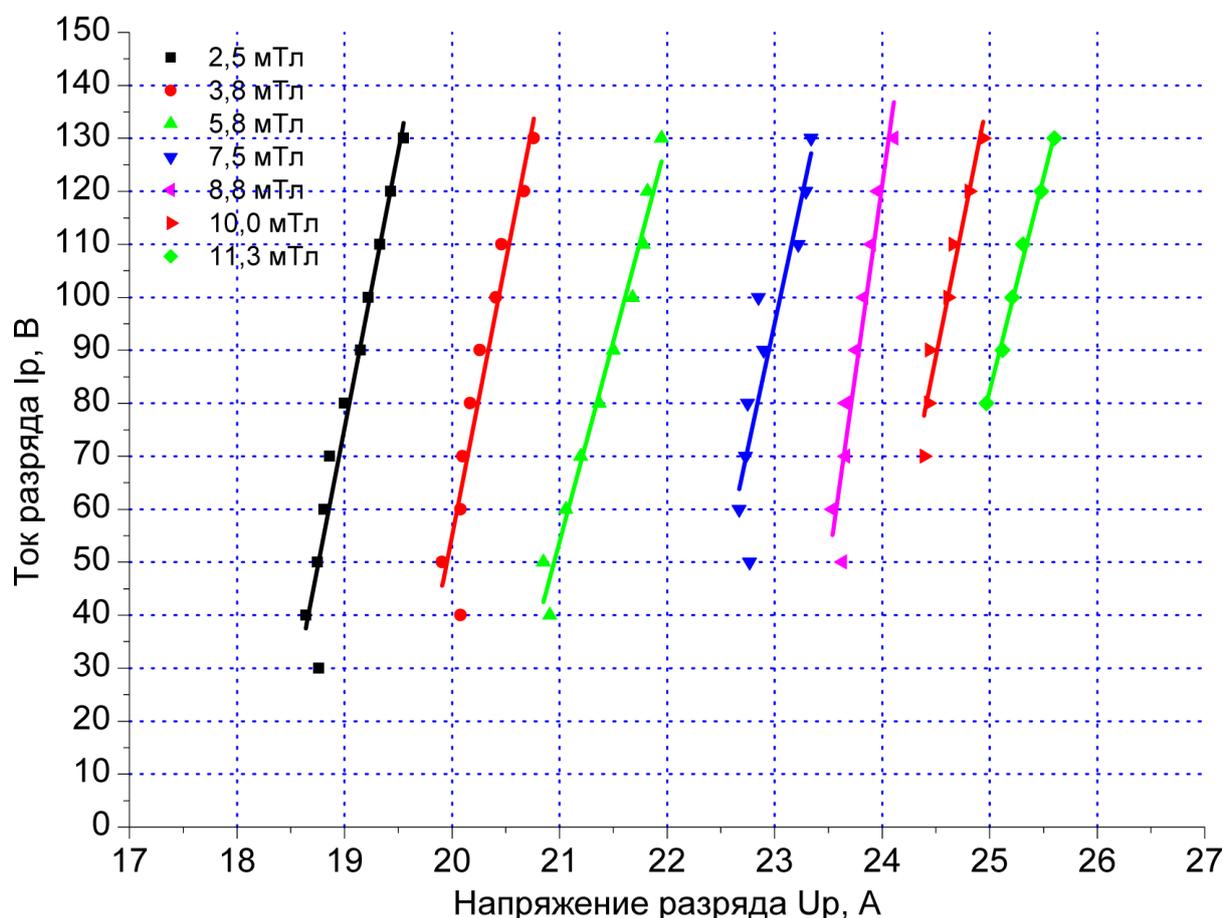


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика вакуумного дугового разряда на кремнии при различных величинах индукции арочного магнитного поля

При значениях магнитного поля менее 1 мТл движение катодных пятен происходит в центре арки магнитного поля со скоростью около 0,1 м/с. Катодное пятно длительное

время задерживаются на одном месте, затем скачком переходит в другую область на некотором расстоянии. В результате на катоде формируются сильно оплавленные углубления диаметром 1-3 мм, что напоминает результаты, полученные в работе [3] при горении дуги на монокристаллическом кремниевом катоде при отсутствии магнитного поля.

Увеличение индукции магнитного поля выше 10 мТл приводит к изменению характера движения катодных пятен, перемещение которых становится равномерным со скоростью около 5 м/с. Характер движения при этом такой же, как на металлическом катоде из меди или алюминия. Фотография катода после работы с арочным магнитным полем течение 10 минут приведена на рис. 6.

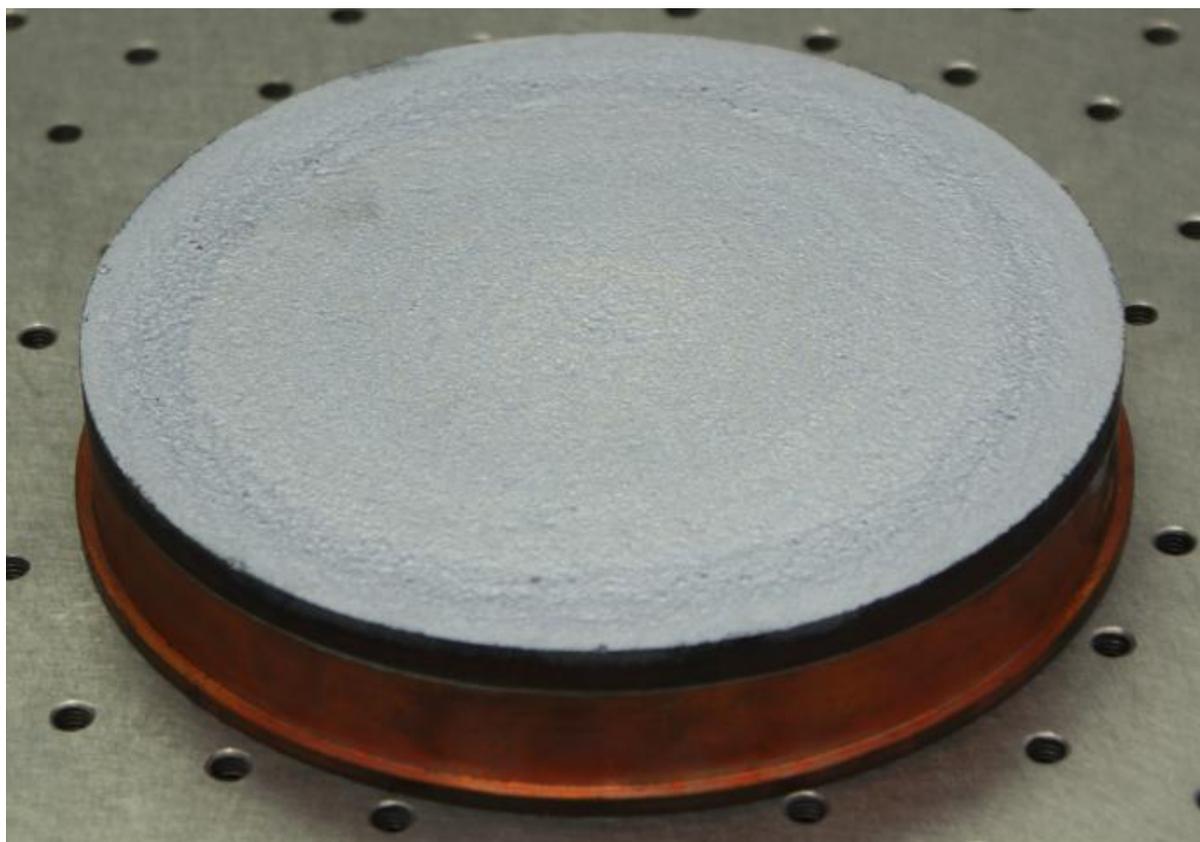
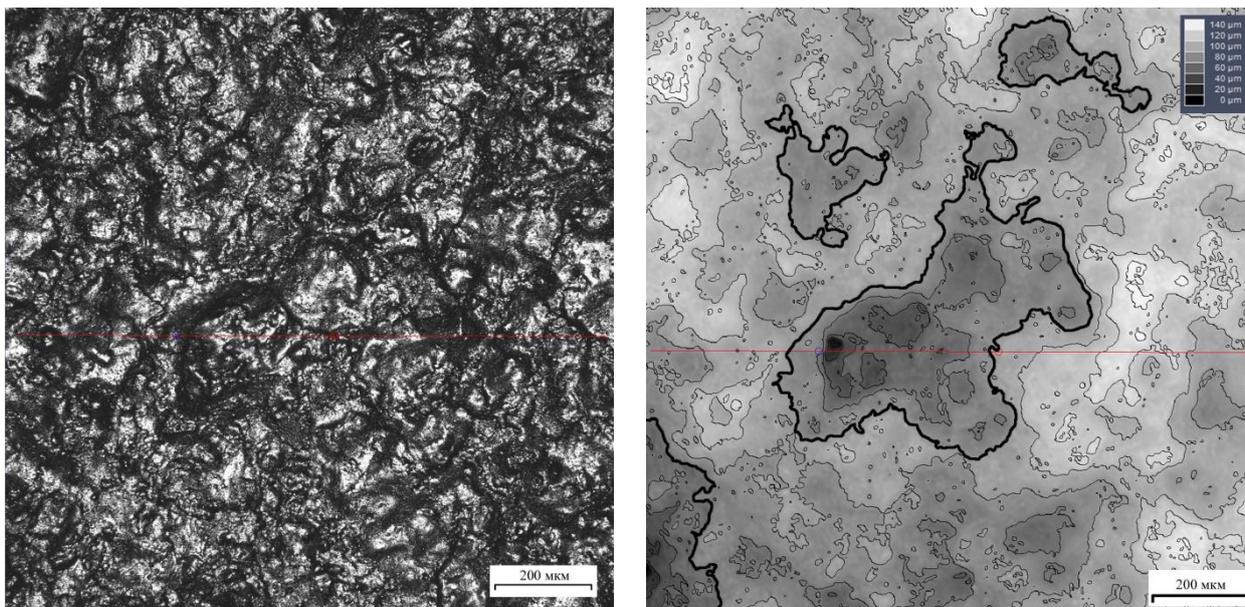


Рис. 6. Рабочая поверхность катода из кремния после испытаний

На рис. 7 приведена микрофотография поверхности отработавшего катода, а также соответствующая ей картина топографии поверхности. Поверхность катода покрыта кратерами, средний размер которых лежит в диапазоне от 150 до 450 мкм с глубиной от 40 до 100 мкм. Более мелкие кратеры, которые наблюдаются на поверхности катода, имеют размеры от 8 до 40 мкм. Поверхность кратеров сильно оплавлена. Каждый крупный кратер состоит из одного или нескольких более мелких кратеров. По размерам, форме и внешнему виду кратеры на кремнии напоминают кратеры на алюминиевом катоде [10].



а)

б)

а) микрофотография участка катода; б) топография поверхности, крупные кратеры выделены жирной линией

Рис. 7. Поверхность отработавшего кремниевого катода

Заключение

В работе подтверждена возможность испарения кремния в промышленном вакуумном дуговом испарителе с арочным магнитным полем. При этом была обеспечена длительная работа дугового испарителя без растрескивания и разрушения катода. Этот результат был достигнут применением арочного магнитного поля, которое обеспечивало движение катодного пятна с повышенной скоростью, не допуская локального перегрева катода. При малой индукции магнитного поля катодное пятно двигалось медленно, оставляя значительные следы эрозии. Повышение магнитного поля до 10 мТл приводило к увеличению скорости движения катодных пятен до 5 м/с. При этом мощность, подводимая к катоду, равномерно распределялась по рабочей поверхности, не вызывая локальных перегревов и разрушения катода. Характер движения катодных пятен на кремнии в этом режиме подобен движению катодных пятен металлических катодам, например, медному или алюминиевому. Минимальный ток разряда, при котором устойчиво горел разряд, составляет 30 А. Вольт-амперные характеристики разряда были возрастающими и смещались в область более высоких напряжений при увеличении индукции магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-08-31286 мол_а.

Список литературы

1. Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний – материал для нанoeлектроники. М.: Техносфера, 2007. 351 с.
2. Naoe M., Yamanaka Sh. Evaporation of silicon by vacuum-arc discharge // Japanese Journal of Applied Physics. 1969. Vol. 8, no. 2. P. 287-288. DOI: [10.1143/JJAP.8.287](https://doi.org/10.1143/JJAP.8.287)
3. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Мелик-Парсаданян А.К., Пархоменко Ю.Н. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 9. С. 22-27.
4. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна // Журнал технической физики. 1959. Т. 29, № 3. С. 287-298.
5. Духопельников Д.В., Жуков А.В., Костин А.А., Юрченко А.А. Управление движением катодного пятна в линейных вакуумно-дуговых испарителях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 11. С. 45-49.
6. Аксёнов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. 83 с.
7. Дороднов А.М. Некоторые применения плазменных ускорителей в технике // Физика и применение плазменных ускорителей: сб. / под ред. А.И. Морозова. Минск, Наука и техника, 1974. С. 330-365.
8. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с арочным магнитным полем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. С. 21-32. DOI: [10.7463/1112.0482485](https://doi.org/10.7463/1112.0482485)
9. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 1. Режим доступа: <http://technomag.stack.net/doc/256359.html> (дата обращения 10.12.2014).
10. Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Формирование катодного кратера в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом // Письма в Журнал технической физики. 1998. Т. 24, № 13. С. 14-19.

Vacuum arc on the polycrystalline silica cathode

D.V. Duhopel'nikov¹, D.V. Kirillov^{1,*},
M.K. Marahtanov¹, E.V. Vorob'ev¹,
V.S. Bulychev¹

*kinilovdv@gmail.com

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: Silica, vacuum arc evaporator, cathodic arc, evaporation, erosion, technology

Thin films of silica and its compounds are used in modern technology to produce Li-ion batteries, wear-resistant and protective coatings, thin-films insulators, etc. This coating is produced with CVD methods, with magnetron sputtering systems or with electron-beam evaporation. The vacuum arc evaporation method, presently, is not used.

The paper demonstrates a possibility for a long-term operation of vacuum arc evaporator with polycrystalline silica-aluminum alloy (90% of silica) cathode and with magnetic system to create a variable form of arch-like magnetic field on the cathode surface. It was shown that arch-like configuration of magnetic field provides a stable discharge and uniform cathode spots moving with the velocities up to 5 m/s with magnetic fields induction about 10 mT. Thus, there is no local melting of the cathode, and this provides its long-term work without chips, cracks and destruction. Cathodes spots move over the cathode surface leaving big craters with melted edges on its surface. The craters size was 150-450 μ m. The cathode spot movement character and the craters on the cathode surface were like the spots movement, when working on the copper or aluminum cathodes. With the magnetic field induction less than 1 mT, the cathode spots movement was the same as that of on the silica mono-crystal without magnetic field. Thus, the discharge volt-ampere characteristics for different values of magnetic fields were obtained. Volt-ampere characteristics were increasing and were shifted to the higher voltage with increasing magnetic field. The voltage was 18.7-26.5 V for the arc current 30-140 A.

So, it was confirmed that vacuum arc evaporation method could be used for effective evaporation of silica and silica-based alloys and for thin films deposition of this materials.

References

1. Gerasimenko N.N., Parkhomenko Yu.N. *Kremniy – material dlya nanoelektroniki* [Silicon is material for nanoelectronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 351 p. (in Russian).
2. Naoe M., Yamanaka Sh. Evaporation of silicon by vacuum-arc discharge. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1969, vol. 8, no. 2, pp. 287-288. DOI: [10.1143/JJAP.8.287](https://doi.org/10.1143/JJAP.8.287)

3. Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Melik-Parsadanyan A.K., Parkhomenko Yu.N. Vacuum arc on the single-crystal silicon cathode for nanomaterials production. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal = Handbook. An Engineering journal*, 2008, no. 9, pp. 22-27. (in Russian).
4. Kesaev I.G., Pashkova V.V. Electromagnetic fixation of the cathode spot. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Technical Physics*, 1959, vol. 29, no. 3, pp. 287-298. (in Russian).
5. Dukhopel'nikov D.V., Zhukov A.V., Kostin A.A., Yurchenko A.A. Cathode spot movement control in linear vacuum-arc evaporators. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2005, no. 11, pp. 45-49. (in Russian).
6. Aksenov I.I., Padalka V.G., Khoroshikh V.M. *Formirovanie potokov metallicheskoj plazmy: Obzor* [Formation of metal plasma flows: Overview]. Moscow, TsNIIatominform Publ., 1984. 83 p. (in Russian).
7. Dorodnov A.M. Some applications of plasma accelerators in engineering. In: Morozov A.I., ed. *Fizika i primeneniye plazmennyykh uskoriteley: sb.* [Physics and application of plasma accelerators: coll. papers]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974, pp. 330-365. (in Russian).
8. Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Ryazanov V.A. Research of generation profile of cathode of arc evaporator with arched magnetic field. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 11, pp. 21-32. DOI: [10.7463/1112.0482485](https://doi.org/10.7463/1112.0482485) (in Russian).
9. Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Shchurenkova S.A. The dynamic of cathode spots movement along the cathode surface in transverse magnetic field. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.stack.net/doc/256359.html> , accessed 10.12.2014. (in Russian).
10. Marakhtanov M.K., Marakhtanov A.M. Formation of a cathode crater in a low-voltage cold-cathode vacuum arc. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1998, vol. 24, no. 13, pp. 14-19. (English translation: *Technical Physics Letters*, 1998, vol. 24, no. 7, pp. 504-506. DOI: [10.1134/1.1262171](https://doi.org/10.1134/1.1262171)).