

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИКОЙ ПОДЛОЖКИ

И.В. Ложкин

liv20f014@student.bmstu.ru

В.Р. Бессонов

bvr20f080@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен метод бесконтактного управления газовыми разрядами посредством подложки из твердого диэлектрика. Метод заключается в том, что на подложку искусственно наносится рельеф микронных размеров, благодаря чему усиливается воздействие диэлектрика на процессы ионизации и пробоя газа. Описано влияние зазоров между подложкой и электродами исключается возможность электрического разряда по поверхности диэлектрика. В результате понижается напряжение отпирания газового промежутка. Сделаны выводы о конфигурации микрорельефа, который позволяет изменять кривизну плазменного канала, что можно применять для направления траектории искрового разряда, ускорения и стабилизации процессов пробоя воздуха.

Ключевые слова

Искровой разряд, скользящий разряд, низкотемпературная плазма, диэлектрическая подложка, микротрещины, микрорельеф, разрядник, эквивалентная схема

Поступила в редакцию 21.12.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Некоторые характеристики газовых разрядов вблизи поверхности твердого диэлектрика выгодно отличаются от аналогичных показателей обычного пробоя газа [1]. Например, использование скользящего разряда в высоковольтной импульсной технике позволяет повысить быстродействие коммутаторов [2], а также КПД разрядников [3] и импульсных ламп [4]. Проблема в том, что в процессе эксплуатации подобных устройств скользящая искра разрушает диэлектрическую подложку (рис. 1). Срок службы диэлектрической подложки можно увеличить, исключив возможность контакта плазменного канала с ее поверхностью. Для этого на подложке создают микрорельеф. Микротрещины образуют множество областей с повышенной плотностью поверхностных зарядов [5]. Благодаря концентрации зарядов на неровностях можно изменить градиент электрического потенциала в воздушном промежутке так, чтобы лидерный разряд сформировался на некотором расстоянии от поверхности подложки (рис. 2). В данной статье рассмотрен метод, который позволяет частично сохранить преимущества скользящего разряда, не подвергая твердый диэлектрик быстрому износу. Диэлектрическая подложка остается долговечной, поскольку в процессе эксплуатации не возникают скользящие разряды.

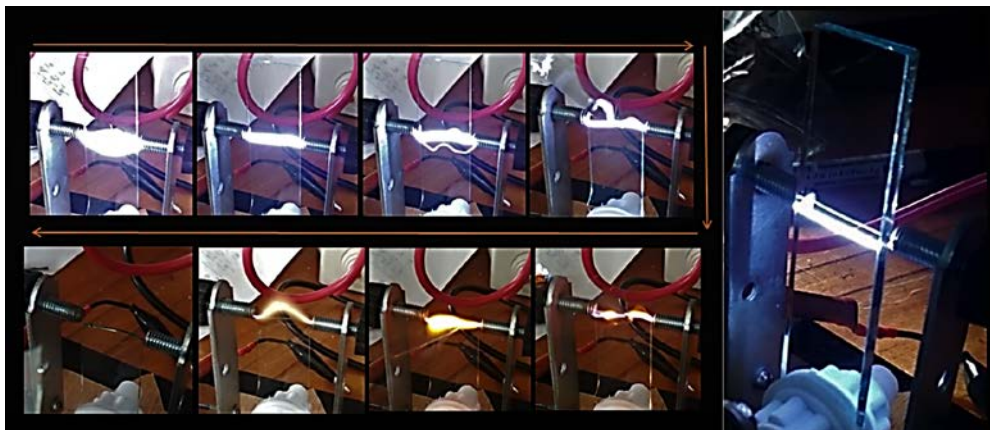


Рис. 1. Процесс разрушения стекла скользящим разрядом



Рис. 2. Искровой разряд вблизи диэлектрической пластины с микрорельефом

Методы и материалы. В качестве подложки будем использовать пластины из силикатного стекла со следующими параметрами: длина 25,4 мм, ширина 76 мм, толщина 1...8 мм, диэлектрическая проницаемость 7. Грани пластины должны находиться за пределами воздушного промежутка, иначе останется риск перекрытия вдоль поверхности стекла. Этот фактор может увеличить погрешность измерений, поэтому наибольший размер пластины приходится на ширину. Силу тока в высоковольтной цепи измеряют с помощью катушек индуктивности, намотанных на провод, идущий к разряднику (рис. 3). Характерный размер микрорельефа оценивают с помощью цифрового микроскопа с кратностью до 500 (рис. 4).

Экспериментальная установка. Собранный установка позволяет с микронной точностью регулировать зазоры между диэлектрической пластиной и электродами (рис. 5).

Постановка эксперимента. Конструкция разрядника, изображенного на рис. 6 [3], будет служить наглядной моделью для постановки эксперимента с микрорельефом.

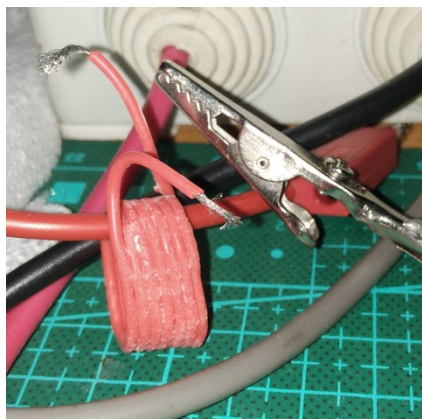


Рис. 3. Катушка индуктивности на высоковольтном проводе разрядника



Рис. 4. Цифровой микроскоп

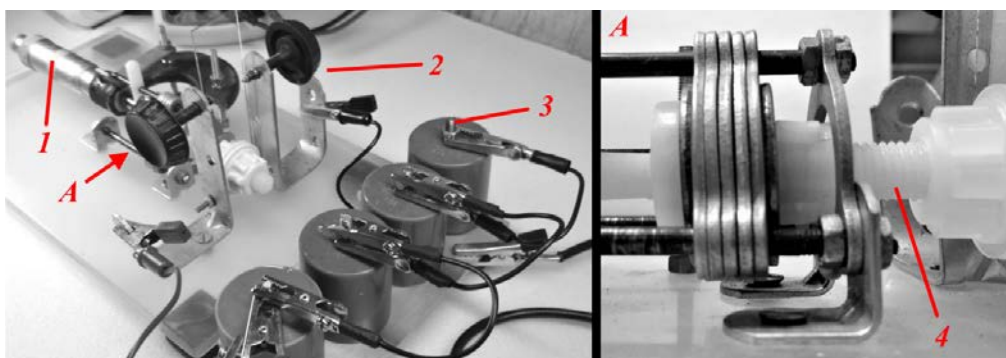


Рис. 5. Установка для управления искровым разрядом:

1 — микрометр; 2 — разрядник с воздушным промежутком; 3 — подвижное крепление для пластины; 4 — батарея конденсаторов, а также высоковольтный генератор постоянного тока

Эксперимент заключается в измерении падения напряжения пробоя воздуха при использовании микрорельефа на диэлектрических подложках. Пластины стекла устанавливают вблизи искрового промежутка. Далее с помощью микрометра настраивают зазоры между пластиной и электродами. Вначале необходимо подобрать зазоры пластины, которые гарантированно не допускают перекрытия по поверхности диэлектрика такое. Размер зазоров выбирают равным 5 мм. Далее нужно подобрать для зазоров пластины такой оптимальный размер, чтобы разряд не переходил в скользящую форму, но при этом микрорельеф продолжал усиливать ионизацию газа. Когда оптимальные зазоры выставлены (1...3 мм), остается только измерить максимальную длину стабильного пробоя воздуха и сравнить ее с расстоянием пробоя без диэлектрической подложки.

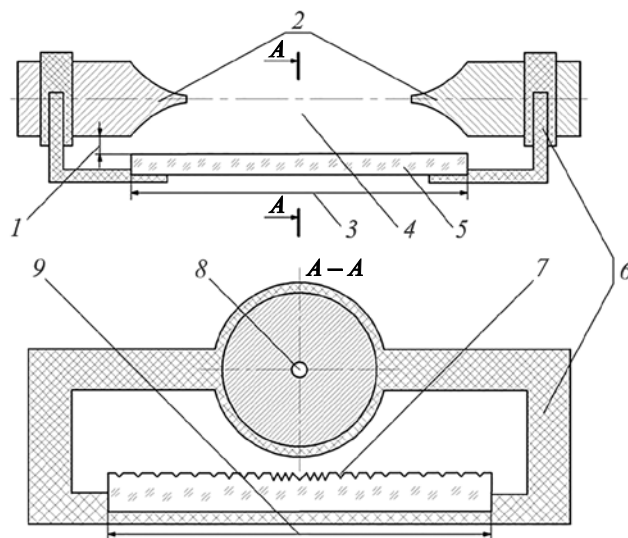


Рис. 6. Разрядник с повышенной стабильностью и длиной разряда:
 1 — зазоры подложки (пластины); 2 — электроды; 3 — длина подложки;
 4 — воздушный промежуток; 5 — диэлектрическая подложка; 6 — каркас
 разрядника; 7 — микрорельеф; 8 — острие катода; 9 — ширина подложки

Проведение эксперимента. Микрорельеф конфигурации «диполь» (рис. 6) создается с помощью скользящих разрядов постоянного тока при преобладающей тангенциальной компоненте электрического поля (рис. 7). Пластины стекла устанавливают вплотную к стержневым электродам, параллельно фронтально ориентированной плоскости симметрии стержней. Длину разрядного промежутка выставляют в 2–3 раза меньше максимальной длины пробоя при заданных условиях. Далее инициируют 500–2000 пробоев воздуха по поверхности диэлектрической пластины, при этом через каждые 50–200 разрядов необходимо увеличивать длину разрядного промежутка на 10 % от первоначального расстояния. Скользящие искры испаряют стекло и оставляют микротрещины на пути следования. Кривизна этих микротрещин растет по мере увеличения расстояния между электродами (см. рис. 7). К моменту, когда длина воздушного промежутка будет поэтапно увеличена на 80...120 %, больше половины разрядов не будут касаться поверхности твердого диэлектрика. Именно на этом этапе завершается формирование картины микротрещин. Сила тока в плазменном канале не должна превышать 5 мА при создании микрорельефа конфигурации «диполь» на пластине из силикатного стекла толщиной 1...2 мм, иначе пластина будет разрушена термическим воздействием искры (см. рис. 1).

Микрорельеф. Микрорельеф конфигурации «диполь» (рис. 8) состоит из микротрещин, картина распределения которых подобна модели силовых линий электрического поля между электродами. Будем использовать данную конфигурацию, поскольку она продемонстрировала наиболее стабильную работу

в разряднике [1]. Максимальная глубина микротрещин находится в пределе 50 мкм. Незавершенный скользящий разряд в стримерной форме стелется по всему микрорельефу, причем густота стримеров изменяется пропорционально густоте микротрещин (рис. 9). Это значит, что искусственный рельеф микронных размеров способен направлять движение электрических зарядов по поверхности твердого диэлектрика [6].

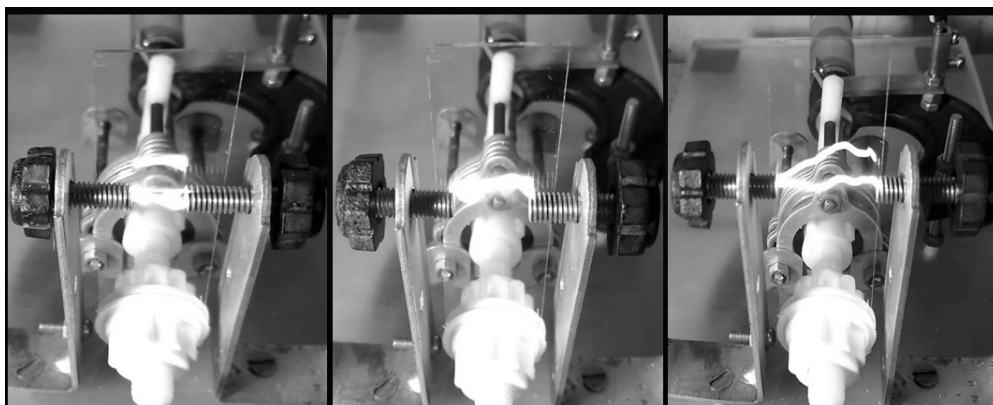


Рис. 7. Создание микрорельефа конфигурации «диполь»

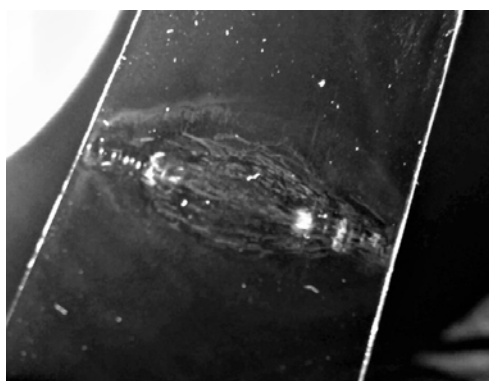


Рис. 8. Конфигурация «диполь»



Рис. 9. Стримеры на микрорельефе

Результаты и всестороннее рассмотрение вопроса. Описанные ниже эффекты наблюдались нами при стандартных условиях ($p = 0,1$ МПа; $T = 298$ К).

В представленных опытах на электроды подается напряжение $U_0 = 18$ кВ, сила тока в канале искры не превышает 10 мА. По результатам опытов (рис. 10) выявлено, что диэлектрическая подложка с микрорельефом способна понизить среднюю пробивную напряженность воздуха более чем на 25 %. Это на порядок больше, чем подложка без микрорельефа.

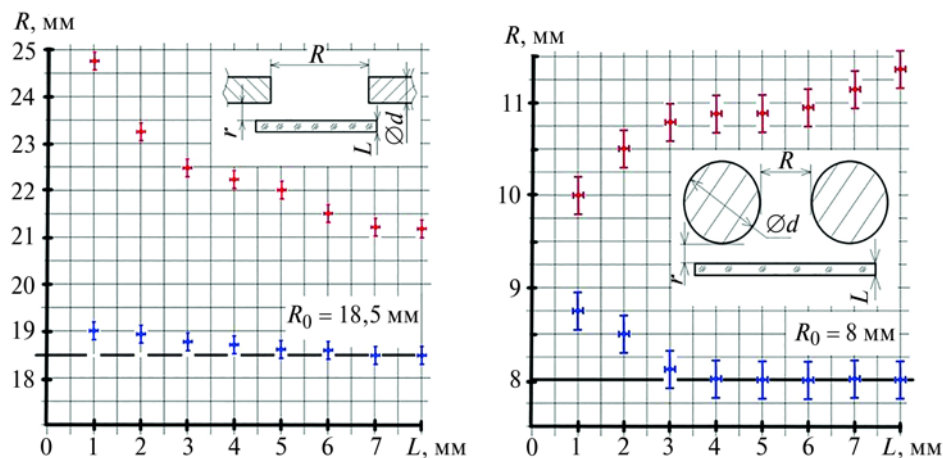


Рис. 10. Зависимость длины пробоя воздуха от толщины диэлектрической подложки в разрядном промежутке при разных конфигурациях электродов: *а* — схема разряда между стержневыми электродами, $d = 5$ мм; *б* — схема разряда между сферическими электродами, $d = 16$ мм; красным цветом показаны значения, полученные на подложке с микрорельефом; синим — без микрорельефа

Падение разрядного напряжения. Чтобы объяснить экспериментально полученные данные, сначала обратимся к принципу работы микрорельефа. В нем задействованы как электродинамические, так и электростатические эффекты, а именно сквозной поверхностный ток и неоднородная поляризация. В начальный момент времени на электроды подается высокое напряжение. Вблизи электродов на участках поверхности подложки индуцируются связанные заряды. Параллельно этому по диэлектрической подложке начинают протекать сквозные токи [7]. Благодаря нанесению микрорельефа образуются скопления свободных и связанных зарядов на поверхности. В воздушном промежутке возникают области повышенной напряженности электрического поля и дополнительные очаги ионизации, продукты которой усиливают ударную ионизацию между электродами. В результате уменьшается средняя пробивная напряженность воздуха.

Поскольку твердый диэлектрик находится в сильном электрическом поле и по нему текут сквозные токи, то поверхность этого диэлектрика можно рассматривать как RC -цепь, состоящую из элемента поверхностного сопротивления и поверхностной емкости пластины. Сочетание разрядного устройства и диэлектрической пластины с микрорельефом (рис.12) представляет собой RLC -цепь (рис. 11), где L — индуктивность искрового разрядника; R_1 — поверхностное сопротивление диэлектрика; C_1 — поверхностная емкость диэлектрика; C_2, C_3 — емкости воздушных зазоров между электродами и поверхностью диэлектрической пластины.

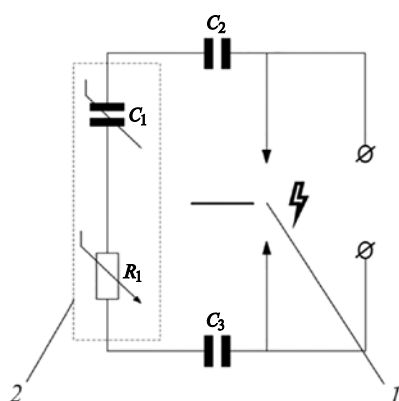


Рис. 11. Эквивалентная схема:

1 — разрядный промежуток; 2 — поверхностное сопротивление и поверхностная емкость диэлектрика



Рис. 12. Рабочее положение пластины

В электрическом поле через твердый диэлектрик проходят сквозные токи, по которым определяется электропроводность диэлектрика G [8]:

$$G = \frac{i_{\text{скв}}}{U} = \frac{i_s + i_v}{U} = \frac{i_{\text{ут}} - i_{\text{абс}}}{U},$$

где U — приложенное к электродам напряжение; $i_{\text{скв}}$ — сквозной ток; i_s — поверхностный сквозной ток; i_v — объемный сквозной ток; $i_{\text{ут}}$ — ток утечки; $i_{\text{абс}}$ — ток абсорбции.

Осциллограмма цикла зарядки и разрядки конденсатора. При использовании микрорельефа снижается амплитудное напряжение цикла зарядки конденсатора и разрядки на пробой воздуха (рис. 13). Это свидетельствует о стабилизации процесса формирования искры.

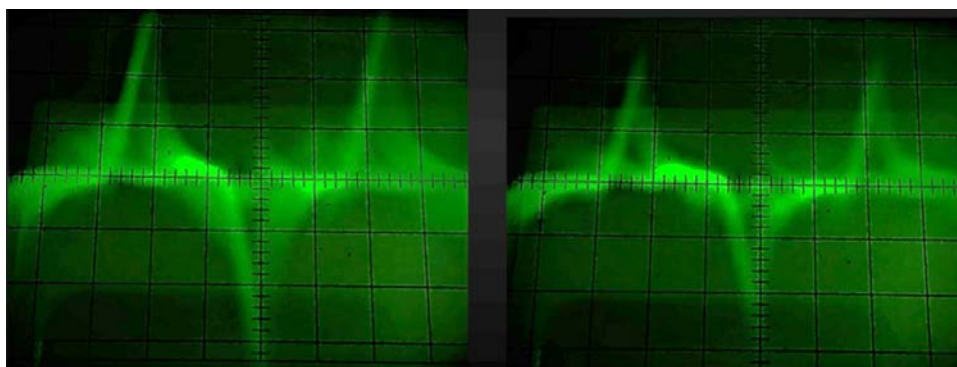


Рис. 13. Осциллограммы циклов зарядки и разрядки конденсаторов при искровом разряде

Повышение частоты разрядов. Если не увеличивать расстояние между электродами в соответствии с падением пробивной напряженностью воздуха, то можно зафиксировать повышение частоты искровых разрядов на 50 % (рис. 14). Из вышеописанных результатов следует, что диэлектрическая подложка с микрорельефом позволяет ускорить процесс отпирания газового промежутка.

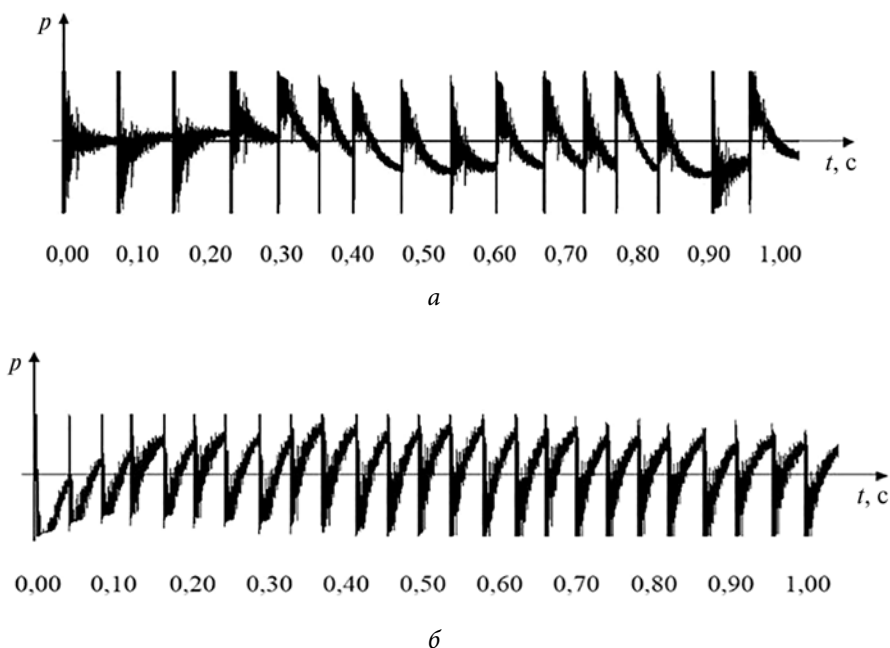


Рис. 14. Сигналограммы звука разрядов, записанные на микрофон:
а — без микрорельефа; б — с микрорельефом

Преимущества метода микрорельефа. Скользящий разряд может возникнуть при напряжении в несколько раз меньше, чем U_0 [1, 2]. Метод микрорельефа обеспечивает падение пробивной напряженности лишь на 20...30 %. Однако в сравнении со скользящим разрядом [9] предлагаемый нами метод имеет следующее преимущество: срок службы диэлектрической подложки увеличивается на порядки, так как она практически не подвергается механическому и термическому воздействию искры в ходе эксплуатации.

Метод также обладает некоторыми дополнительными возможностями. Важно отметить, что метод нанесения рельефа микронных размеров на подложку дает возможность изменять кривизну плазменного канала искры в воздухе, т. е. усиливать воздействие диэлектрика на низкотемпературную плазму. Нанося микрорельеф точно, можно задать направление траектории разряда. Это, как правило, асимметричные конфигурации, которые создаются подвижным электродом или электродами из самоклеющейся фольги (рис. 15).

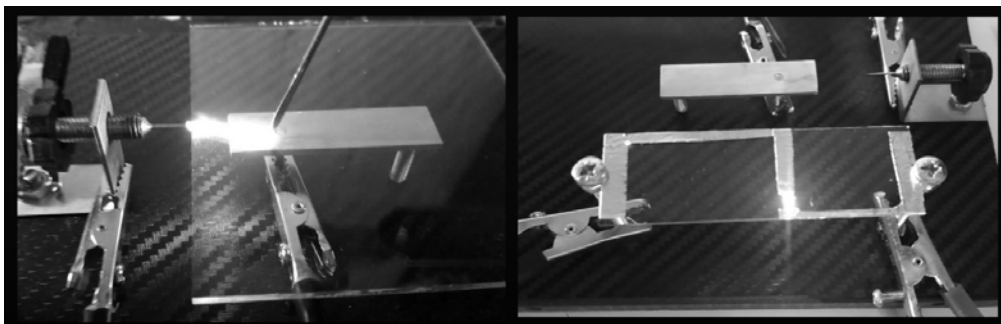


Рис. 15. Способы создания микрорельефа ассиметричной и симметричной конфигураций в произвольной области подложки

Заключение. По итогу метод микрорельефа можно охарактеризовать как универсальный метод контроля и стабилизации электрических разрядов. Его использование подразумевает отсутствие поверхностных разрядов, поэтому подложка из твердого диэлектрика служит значительно дольше, чем в устройствах на скользящем разряде. Метод также применим для управления кривизной шнура холодной плазмы. Основное свойство микрорельефа заключается в том, что для отпираания воздушного промежутка требуется напряжение ниже, чем U_0 . Таким образом, разрядное устройство получает запас пробивной способности, что выводит высоковольтную импульсную технику в более благоприятный режим работы. Это актуально для любой техники, в конструкции которой есть разрядное устройство, поскольку данный метод способствует повышению ресурса системы [10].

Литература

- [1] Mursenkova I., Sazonov A., Liao Yu., Ivanov I. Visualization of the interaction region of an oblique shock wave with a boundary layer by the radiation of a nanosecond surface sliding discharge. *Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 76–87. <http://doi.org/10.26583/sv.11.3.07>
- [2] Урханова Л.А., Хаглеев А.Н., Мокеев М.А. и др. Модификация пленок полиэтилена в низкотемпературной плазме скользящего разряда для создания рулонной гидроизоляции. *Вестник ВСГУТУ*, 2021, № 4(83), с. 72–78. http://doi.org/10.53980/24131997_2021_4_72
- [3] Ложкин И.В., Морозов А.Н., Струков Ю.А. и др. *Разрядник с повышенной стабильностью и длиной разряда*. Патент № RU 201009 U1, 2020.
- [4] Shabanov G.D. On the possibility of making a natural ball lightning using a new pulse discharge type in the laboratory. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2019, vol. 189, no. 1, pp. 95–111. <http://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038318>
- [5] Веревкин В.Н., Михайлова Е.Д., Марков А.Г. Обеспечение электростатической искробезопасности применения стеклопластиков в технологических трубопроводах,

- аппаратах и оборудовании. *Безопасность труда в промышленности*, 2021, № 10, с. 53–59. <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-10-53-59>
- [6] Ложкин И.В., Морозов А.Н., Барышников С.П. и др. Способ управления холодной плазмой посредством микрорельефа на твёрдом диэлектрике. Патент № RU 2757458С1, 2021.
- [7] Серебряков А.С., Осокин В.Л., Семенов Д.А., Жужин М.С. *Техника высоких напряжений. Изоляция электрических установок высокого напряжения*. Старый Оскол, ГНТ, 2021, с. 352–358.
- [8] Мурадян Г.А., Гудкова Е.С., Хилажева Е.Д. и др. Влияние скользящего разряда на пролиферативную активность и гибель клеток эндотелия церебральных микрососудов *in vitro*. *Биомедицинская химия*, 2021, т. 67, № 2, с. 150–157. <http://doi.org/10.18097/PBMC20216702150>
- [9] Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Козлов Ю.Н. и др. УФ-излучение высоковольтного многоэлектродного поверхностного разряда в газовой среде. *Физика плазмы*, 2019, т. 45, № 3, с. 268–273. <http://doi.org/10.1134/S036729211902001X>
- [10] Гилёв О.А. *Устройство определения остаточного ресурса искрового разрядника*. Патент № RU 213771 U1, 2021.

Ложкин Иоанн Викентьевич — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Бессонов Вячеслав Романович — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Скуйбин Борис Георгиевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ложкин И.В., Бессонов В.Р. Исследование взаимодействия искровых разрядов с поверхностью диэлектрической подложки. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 12 (89). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-954>

STUDY OF INTERACTION BETWEEN THE SPARK DISCHARGE AND THE DIELECTRIC SUBSTRATE SURFACE

I.V. Lozhkin

liv20f014@student.bmstu.ru

V.R. Bessonov

bvr20f080@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers a method for contactless control of the gas discharges using a solid dielectric substrate. The method consists in artificially applying the micron-sized relief onto the substrate, thereby enhancing the dielectric effect on the gas ionization and breakdown processes. The influence of gaps between the substrate and the electrodes is described, as it eliminates the possibility of an electrical discharge along the dielectric surface. As a result, the unlocking voltage of the gas gap decreases. Conclusions are made on the micro-relief configuration making it possible to change the plasma channel curvature, which could be used to direct the spark discharge trajectory, accelerate and stabilize the air breakdown processes.

Keywords

Spark discharge, sliding discharge, low-temperature plasma, dielectric substrate, micro-cracks, micro-relief, spark gap, equivalent circuit

Received 21.12.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Mursenkova I., Sazonov A., Liao Yu., Ivanov I. Visualization of the interaction region of an oblique shock wave with a boundary layer by the radiation of a nanosecond surface sliding discharge. *Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 76–87. <http://doi.org/10.26583/sv.11.3.07>
- [2] Urkhanova L.A., Khagleev A.N., Mokeev M.A. et al. Modification of polyethylene films in low-temperature gliding discharge plasma to create roll waterproofing. *Vestnik VSGUTU*, 2021, no. 4 (83), pp. 72–78. (In Russ.). http://doi.org/10.53980/24131997_2021_4_72
- [3] Lozhkin I.V., Morozov A.N., Strukov Yu.A. et al. *Razryadnik s povyshennoy stabil'nost'yu i dlinoy razryada* [Arrester with increased stability and discharge length]. Patent no. RU 201009 U1, 2020. (In Russ.).
- [4] Shabanov G.D. On the possibility of making a natural ball lightning using a new pulse discharge type in the laboratory. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2019, vol. 189, no. 1, pp. 95–111. <http://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038318>
- [5] Verevkin V.N., Mikhaylova E.D., Markov A.G. Ensuring electrostatic spark safety for the use of fiberglass in the process pipelines, apparatus, and equipment. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2021, no. 10, pp. 53–59. (In Russ.). <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-10-53-59>
- [6] Lozhkin I.V., Morozov A.N., Baryshnikov S.P. et al. *Sposob upravleniya kholodnoy plazmoy posredstvom mikrorel'efa na tverdom dielektrike* [A method for controlling cold

- plasma using a microrelief on a solid dielectric]. Patent no. RU 2757458 C1, 2021. (In Russ.).
- [7] Serebryakov A.S., Osokin V.L., Semenov D.A., Zhuzhin M.S. *Tekhnika vysokikh napryazheniy. Izolyatsiya elektricheskikh ustanovok vysokogo napryazheniya* [High voltage technology. Insulation of high voltage electrical installations]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2021, pp. 352–358. (In Russ.).
- [8] Muradyan G.A., Gudkova E.S., Khilazheva E.D. et al. Effect of sliding discharge on proliferation and death of brain microvessel endothelial cells in vitro. *Biomeditsinskaya khimiya*, 2021, vol. 67, no. 2, pp. 150–157. (In Russ.).
<http://doi.org/10.18097/PBMC20216702150>
- [9] Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Kossyi I.A. et al. UV radiation of high-voltage multi-electrode surface discharge in gaseous medium. *Plasma Physics Reports*, 2019, vol. 45, no. 3, pp. 246–251. <http://doi.org/10.1134/S1063780X19020016>
- [10] Gilev O.A. *Ustroystvo opredeleniya ostatochnogo resursa iskrovogo razryadnika* [Device for determining the residual life of the spark gap]. Patent № RU 213771 U1, 2021. (In Russ.).

Lozhkin I.V. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Bessonov V.R. — Student of the Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Skuybin B.G., Ph. D. (Phy.-Math.), Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Lozhkin I.V., Bessonov V.R. Study of interaction between the spark discharge and the dielectric substrate surface. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 12 (89). (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-954>