

04.1

Энергия поверхностного разряда в электродной системе параллельных полос

© А.В. Лазукин, А.М. Никитин, Г.А. Романов

Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“, Москва, Россия
E-mail: lazukin_av@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 7 июня 2021 г.

Принято к публикации 21 июня 2021 г.

Приведены результаты экспериментального исследования зависимости энергии поверхностного барьерного разряда от значения питающего синусоидального напряжения частотой 4 и 20 kHz в электродной системе параллельных полос с расстоянием между ними 5 и 30 mm. При расстоянии 5 mm между полосами в электродной системе существует самоограниченный поверхностный разряд. Самоограничение разряда приводит к тому, что с повышением приложенного напряжения энергия, вложенная в электродную систему, возрастает медленнее, чем в случае, когда разряд существует без ограничений. Энергия самоограниченного разряда ниже на 15–40% энергии разряда, существующего без ограничения.

Ключевые слова: поверхностный разряд, энергия, вольт-кулонная характеристика, самоограниченный разряд.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51505.18812

Поверхностный разряд — это разновидность газового разряда атмосферного давления, существующего вблизи поверхности диэлектрика около электрода с малым радиусом кривизны. Диэлектрик разделяет электрод с малым радиусом кривизны и второй электрод системы, между которыми приложено переменное напряжение. Поверхностный разряд в настоящее время используется как основа ряда электротехнологий с применением низкотемпературной плазмы, что обусловлено простотой и надежностью электродных систем и источников питания, отсутствием вакуумной части или расхода инертных газов. Наиболее полный список технологических решений с применением поверхностного разряда и других барьерных разрядов можно найти в обзоре [1] и вводных частях работ [2,3].

Для решения технологической задачи (например, при обработке поверхности полимера или дерева, слоя семян и т.п.) возникает необходимость масштабировать электродную систему поверхностного разряда. В этом случае используют системы параллельных полосовых электродов или электроды-сетки (сравнение подобных систем по ряду параметров выполнено в [2]). Соседние полосовые электроды или границы ячейки (в случае сетки) находятся под одним потенциалом. При достижении этого потенциала выше некоторого начального значения с кромок электродов стартует группа микроразрядов (это проиллюстрировано методами высокоскоростной фотографии, например, в работе [3]). Однако если соседние электроды находятся достаточно близко, встречные группы микроразрядов препятствуют развитию друг друга, и поверхностный разряд становится самоограниченным. Дистанция „самоограничения“ определяется конфигурацией электродов и параметрами питающего

напряжения [4]. Возникновение самоограничения должно отразиться на энергии разряда.

Цель настоящей работы заключается в выявлении зависимости энергии поверхностного разряда от напряжения и частоты в электродных системах с самоограниченным разрядом.

Энергия поверхностного разряда, вложенная в электродную систему за период питающего напряжения, измерялась методом вольт-кулонных характеристик (ВКХ). Схема измерения и вид электродной системы приведены на рис. 1, а. Вид ВКХ для 4 kHz при расстоянии 30 mm между полосами приведен на рис. 1, б.

Электродная система выполнена на диэлектрическом барьере из корундовой керамики ВК-96 толщиной $\Delta = 1$ mm в виде двух параллельных полос из алюминиевой фольги (толщина $20 \mu\text{m}$). Выполнены две системы с расстоянием между полосами 5 и 30 mm. Противоположную сторону диэлектрического барьера занимает заземленный обратный электрод, в котором выделена измерительная секция шириной 10 mm. Измерительная секция заземляется через конденсатор $C1$. Параллельно плечу, образованному геометрической емкостью электродной системы и емкостью $C1$, подключается „компенсирующее“ плечо, состоящее из вакуумного конденсатора переменной емкости C_v и емкости $C2$ (емкости $C1$ и $C2$ одинаковы по номиналу: 4 nF). К средним точкам образованного моста подключается высоковольтный дифференциальный пробник DP (DP-150, Pintek). Таким образом измеряется энергия разряда, существующего только над измерительной секцией, без вклада энергии, вводимой в геометрическую емкость электродной системы. Напряжение контролируется высоковольтным смешанным делителем P6015A (Tektronix). Синусоидальное напряжение частотой 4 или 20 kHz подается

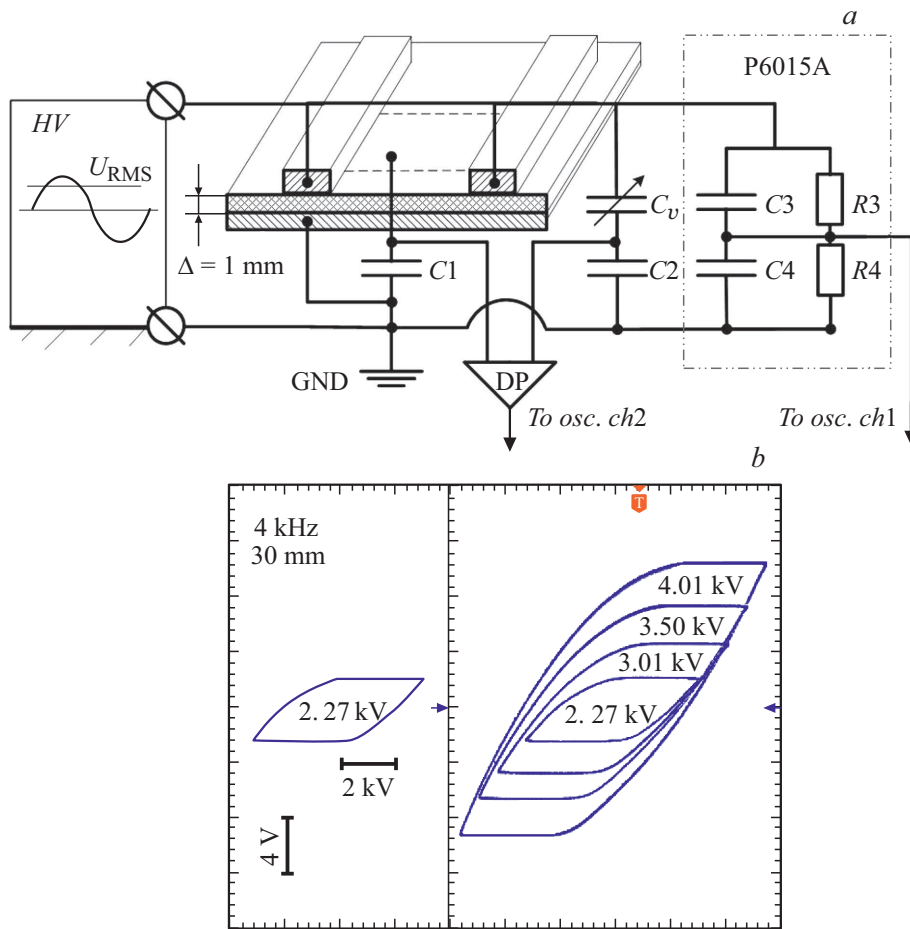


Рис. 1. *a* — электродная конфигурация и схема измерений; *b* — вид ВКХ при частоте 4 kHz для разных величин действующего значения напряжения.

от высоковольтного источника *HV*. Источник выполнен в виде полумостового транзисторного инвертора с выходным каскадом на высоковольтном трансформаторе и дросселе. Индуктивность выходного каскада подбирается таким образом, чтобы обеспечить условия, близкие к резонансной работе контура на разрядную нагрузку.

На рис. 2 приведены результаты измерения энергии для 4 и 20 kHz при повышении напряжения от 1.5 до 4 kV (действующее значение). Начальное напряжение составляет 1.4 kV. Энергия растет с повышением приложенного напряжения по характерной для разрядов атмосферного давления степенной зависимости, что согласуется с литературными данными [2,5]. Энергия разряда также зависит от частоты питающего напряжения, что противоречит данным, приведенным в работе [2]. По данным [2], где использовалась система с расстоянием 3 mm между полосами из медной фольги толщиной 35 μm при питании синусоидальным напряжением 4.7 и 10 kHz, энергия, вложенная в разряд за период питающего напряжения, практически не зависит от частоты. Вероятно, при расстоянии между параллельными полосами в 3 mm зоны горения встречных разрядов смыкаются практически на напряжениях зажигания.

Длины разрядных зон в подобных системах приведены в работе [4], где обстоятельства самоограничения поверхностного разряда оценивались по высокоскоростным фотографиям. В системе параллельных полос с расстоянием 5 mm между ними встречные микроархивы начинают влиять друг на друга при напряжении 2.5 kV. Частота питающего напряжения также влияет на обстоятельства самоограничения. На 20 kHz разрядные зоны смыкаются при 2.5 kV. На 4 kHz полное смыкание разрядных зон наблюдается при напряжениях около 3 kV. Это обстоятельство должно отразиться на соотношении энергий таких разрядов в зависимости от частоты.

Отношение энергий разрядов при 5 и 30 mm между полосами в зависимости от напряжения приведено на рис. 3. При переходе к электродной системе поверхностного разряда с расстоянием 5 mm между параллельными электродами энергия разряда оказывается меньше, чем в случае 30 mm между электродами. С ростом напряжения отношение энергий снижается на 15–40%. Характер снижения зависит от частоты. Для 20 kHz отношение энергий снижается до 0.8–0.9 и держится в этом диапазоне при повышении напряжения от 2 до 3 kV. С дальнейшим повышением напряжения от 3 до 4 kV от-

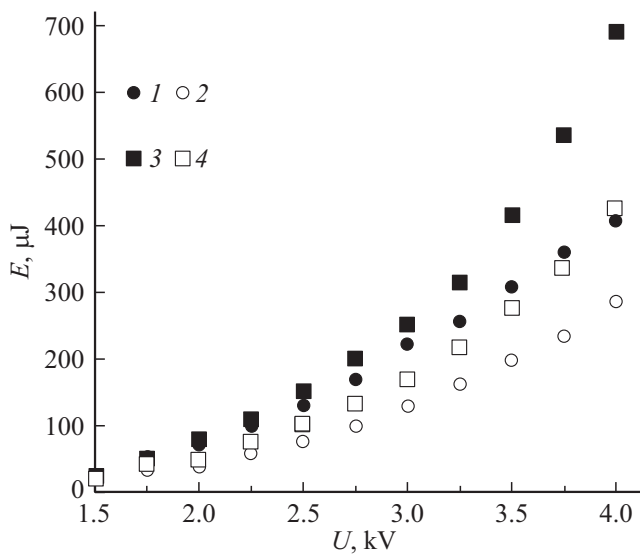


Рис. 2. Энергия поверхностного разряда в зависимости от напряжения. Темные символы — для 20 kHz, светлые — для 4 kHz. 1, 2 — 5 mm между полосами; 3, 4 — 30 mm между полосами.

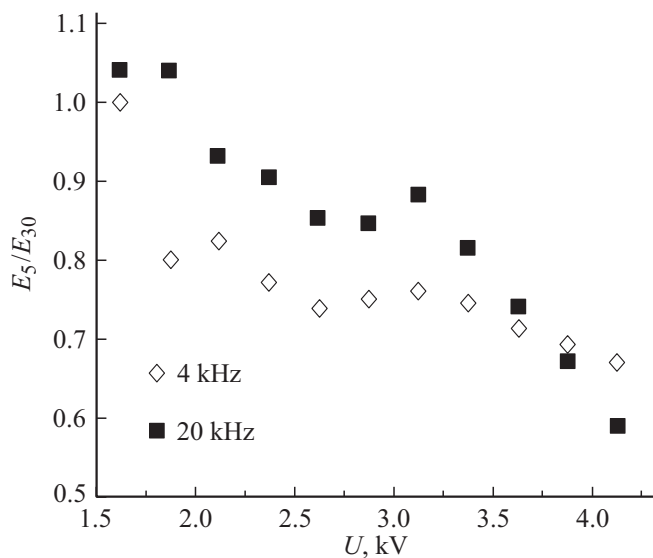


Рис. 3. Отношение энергии разряда при расстоянии между полосами 5 mm (E_5) к энергии разряда при расстоянии между полосами 30 mm (E_{30}) на частотах 4 и 20 kHz.

ношение энергий снижается линейно до 0.6. Для 4 kHz, кроме начального этапа снижения отношения энергий от 1 до 0.8 при повышении напряжения от 1.5 до 1.75 kV, отношение энергий снижается практически линейно с ростом приложенного напряжения от 0.8 до 0.67.

На основе полученных зависимостей можно сделать следующие выводы. Энергия, вложенная в системы с самоограниченным разрядом, не выходит на насыщение в зависимости от напряжения, однако растет не так быстро, как энергия разряда, развивающегося свободно. Вероятно, увеличивается число отдельных микроразря-

дов вдоль кромки, но не увеличивается переносимый в индивидуальном импульсе заряд. На 4 kHz подобная реорганизация разрядных структур проходит лучшим образом, чем на 20 kHz. Следовательно, для систем с самоограниченным разрядом более предпочтительны невысокие частоты питающего напряжения.

С точки зрения технологического применения поверхностного разряда важна не только энергия разряда, но и другие электрофизические характеристики, например интенсивность образования объемного заряда или плотность УФ-потока. Подробное исследование связи энергии самоограниченного поверхностного разряда с ключевыми технологическими характеристиками электродных систем предполагается провести в дальнейшем.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-76-10019).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Brandenburg, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **26**, 053001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/aa6426
- [2] S. Pekárek, J. Mikeš, *Eur. Phys. J. D*, **74**, 59 (2020). DOI: 10.1140/epjd/e2020-100332-3
- [3] I. Selivonin, I. Moralev, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **30** (3), 035005 (2021). DOI: 10.1088/1361-6595/abe0a1
- [4] А.В. Лазукин, И.В. Селивонин, М.Э. Пинчук, И.А. Моралев, С.А. Кривов, *Изв. вузов. Физика*, **61** (9-2), 152 (2018). <https://elibrary.ru/item.asp?id=36614175>
- [5] J. Kriegseis, B. Möller, S. Grundmann, C. Tropea, *J. Electrostat.*, **69**, 302 (2011). DOI: 10.1016/j.elstat.2011.04.007