

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 537.5

**ИОНИЗАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ САМООРГАНИЗАЦИИ
ФОРМЫ ЗАВЕРШЕННОЙ СТАДИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО
РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ В ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ**Е. И. Грудиев^{1,2}, А. М. Игнатов¹, Г. П. Кузьмин¹

При исследовании завершенной стадии скользящего по поверхности диэлектрика разряда в атмосфере воздуха в частотном режиме обнаружен эффект самоорганизации формы протекания разряда. При повышении частоты следования импульсов происходит изменение пути протекания тока. С поверхности диэлектрической подложки, начиная с середины разрядного промежутка, канал разряда перемещается в объем окружающей газовой среды. Предложено объяснение этого явления за счет накопительного эффекта ионизации в газовом объеме из-за разницы времени колебательной релаксации кислорода в зависимости от температуры на поверхности диэлектрической подложки и в газовом объеме над поверхностью.

Ключевые слова: скользящий разряд, завершенная стадия, частотный режим, ионизационные процессы, колебательная релаксация.

Введение. В настоящее время ведутся работы по использованию электрических разрядов для инициации и стабилизации горения в высокоскоростных потоках топливных смесей [1, 2]. В [1] проводились исследования горения воздушно-пропановой смеси, иницированного при помощи сильноточного продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом канале. В [2] для инициации горения газовой смеси исследовался многоззорный разрядник, расположенный по периметру канала протекания газовой топливной смеси. В [3] предложено использовать двухимпульсный лазерный разрядник, который первым

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail:grudiev-ei@rudn.ru.

² РУДН, 117198 Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

импульсом осуществляет предыонизацию в заданной области потока газовой смеси, а вторым импульсом – ее воспламенение. Нами предложено для целей предыонизации и последующего воспламенения обедненных газовых смесей использовать скользящий по поверхности диэлектрика разряд (рис. 1).

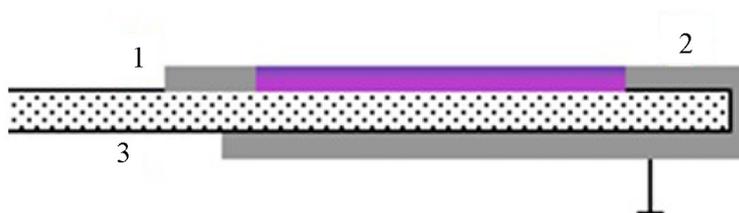


Рис. 1: Схема расположения электродов скользящего разряда: 1 – иницирующий электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – слой диэлектрика.

Эффективность применения скользящего разряда в качестве источника УФ-излучения была показана при его использовании для предыонизации газовой среды в CO_2 и эксимерных лазерах [4, 5], для обработки тонких полимерных слоев фототравлением и реализации процессов сухой литографии, исключая процесс жидкостного травления [6], а также для медицинских целей [7].

Удобство расположения электродов плоской геометрии позволяет использовать скользящий разряд в газопроточных системах. Скользящий по поверхности твердого диэлектрика разряд может обеспечить объемное засвечивание участка протекаемого рабочего газа при относительно низких напряжениях (по сравнению с другими типами разрядов, осуществляющих прямой пробой в газовом промежутке [5]). Практическое применение скользящего разряда в области воспламенения рассматривалось в работе [8] – продемонстрирован взрывной характер горения паров масла при достаточной энергии, вкладываемой в завершенный скользящий разряд.

В зависимости от набора рабочих параметров, таких как амплитуда импульса напряжения на иницирующем электроде, крутизна его переднего фронта, давление газовой среды, межэлектродное расстояние и др., наблюдаются две стадии разряда: незавершенная [9] – слаботочный разряд, поддерживаемый токами смещения заряда конденсатора, образованного слоем плазмы на поверхности диэлектрика и заземленным электродом, и сильноточная завершенная стадия, наступающая непосредственно при замыкании разрядного промежутка.

Однако при исследовании рабочих параметров завершенного скользящего разряда в диапазоне низких частот следования импульсов (в пределах 1 кГц) была обнаружена

дуговая форма разряда [10], которая является проявлением самоорганизации формы протекания тока.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Эксперименты проводились в вакуумной камере при давлениях от 10 до 60 Торр на установке, схема которой приведена в работе [9]. В качестве рабочего газа использовался воздух. Скользящий разряд распространялся по поверхности стеклотекстолита типа FR-4 толщиной 1 мм (длина разрядного промежутка $L = 9$ см), а также ленточного сапфира ($L = 6$ см, толщина 1.5 мм). На иницирующий электрод подавалось импульсное напряжение отрицательной полярности. Амплитуда напряжения изменялась в пределах от 3 до 15 кВ. Частота повторения импульсов от 50 Гц до 1 кГц. Крутизна фронта напряжения $\sim 10^{10}$ В/с. Для измерения электрических параметров разряда использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS220. Напряжение измерялось с помощью резистивного делителя 1:1000, ток регистрировался с помощью пояса Роговского в режиме интегрирования на собственной индуктивности с коэффициентом 1.2 А/В. Допустимая частота регистрируемого сигнала до ~ 10 МГц. Интегральная фотосъемка разряда производилась цифровой фотокамерой Canon EOS 500D.

На рис. 2(а)–(в) показаны фотографии завершеного скользящего разряда в воздухе по поверхности стеклотекстолита толщиной 1 мм. Длина разрядного промежутка 9 см. Амплитуда напряжения источника импульсного питания 8 кВ. Давление воздуха 25 Торр.

На изменение формы протекания скользящего разряда могут влиять конвекционные, эрозийные и ионизационные процессы. Для того чтобы определить влияние конвекционных и эрозийных эффектов на изменение формы разряда, был проведен эксперимент по иницированию разряда по поверхности ленточного сапфира толщиной 1.5 мм. Сапфир в качестве материала диэлектрической подложки выбран из соображений его эрозийной устойчивости по сравнению со стеклотекстолитом. Влияние конвекции за счет нагрева газа устранено путем переворачивания подложки разрядным промежутком вниз. Были получены результаты, аналогичные зависимости формы разряда на стеклотекстолите. На рис. 3 показана фотография разряда на сапфире в перевернутом состоянии.

Таким образом, можно сказать, что изменение степени эрозии и конвекция не оказывают существенного влияния на переход завершеного разряда в объемную форму. Влияние увеличения тока завершеной стадии в частотном режиме также не является существенным. Как показывает эксперимент, увеличение частоты следования импуль-

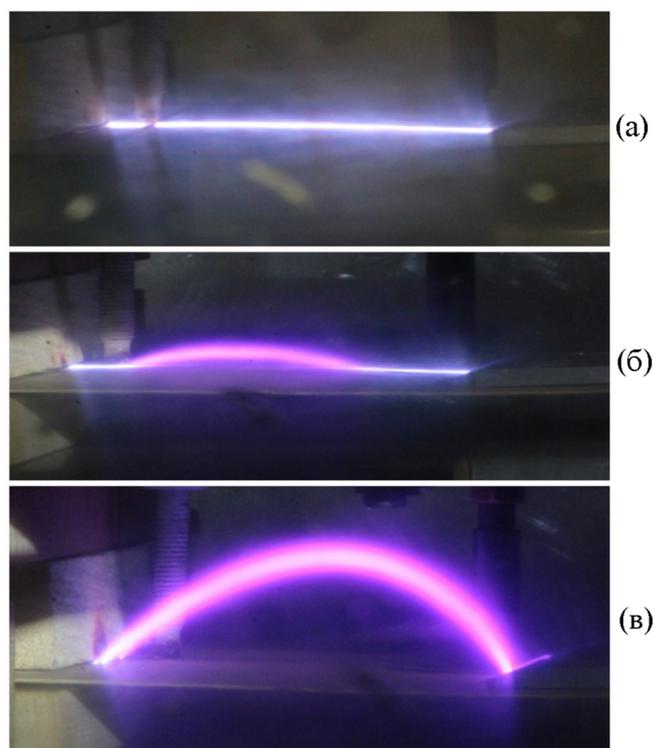


Рис. 2: Изменение формы скользящего разряда при изменении частоты следования импульсов питания; (а) 250 Гц, (б) 300 Гц, (в) 350 Гц (стеклотекстолит, $L = 9$ см, $p = 25$ Торр). Экспозиция 1/30 с.

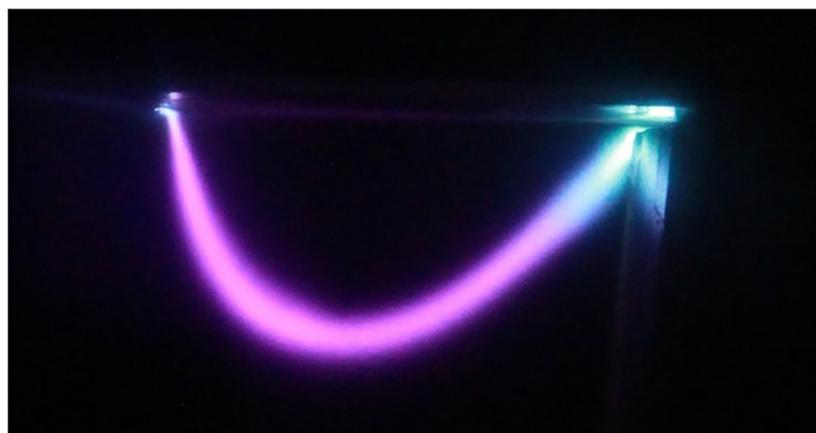


Рис. 3: Разряд на сапфировой подложке при частоте следования импульсов питания 500 Гц. Разрядный промежуток сформирован на нижней стороне диэлектрической подложки. Экспозиция 1/30 с.

сов питания на порядок (100–1000 Гц) приводит к увеличению тока в импульсе не более 10%.

Влияние ионизационных процессов становится очевидным при замене состава газовой среды. Наличие в составе воздушной атмосферы многоатомных молекул обеспечивает возможность низкопороговой диссоциативной ионизации [11]. Порог диссоциации азота в два раза превышает пороговые значения для кислорода. Действительно, при насыщении воздуха азотом и уменьшении парциального кислорода частота импульсов, необходимая для перехода разряда в объемную стадию, увеличивается. В атмосфере одноатомного газа аргона объемная стадия не наблюдается при давлении до 1 атм и напряжении до 15 кВ, используемых в данной установке.

Рассмотрим подробнее процесс распространения скользящего разряда по поверхности диэлектрика в воздухе. В незавершенной стадии при движении по каналу разряда лидерного стримера происходит ионизация газа над поверхностью диэлектрика. В интервале между импульсами происходит ионизационная релаксация, время которой зависит от температуры газа. Согласно [12] для кислорода при разнице температуры от 10^3 К до 4×10^3 К время колебательной релаксации уменьшается на два порядка. При наличии завершенной стадии яркостная температура на поверхности диэлектрика может превышать 4×10^3 К [13, 14], что при определенной частоте следования импульсов может приводить к ионизационному вкладу в объемную проводимость.

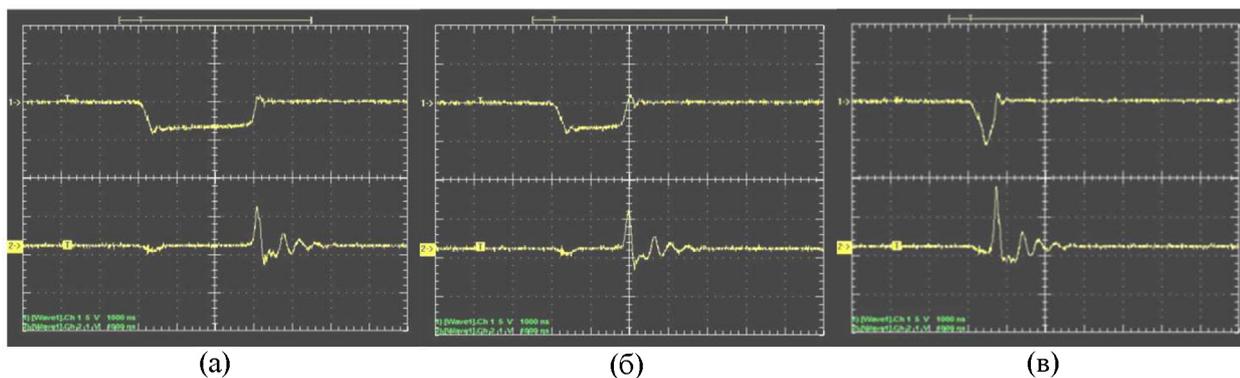


Рис. 4: Осциллограммы напряжения (верхняя, развертка 5.5 кВ/дел, 1 мкс/дел) и тока (нижняя, развертка 1.2 А/дел, 1 мкс/дел) в зависимости от частоты следования импульсов питания при давлении 25 Торр; (а) 250 Гц, обычная форма скользящего разряда; (б) 300 Гц, начало формирования дуговой стадии разряда; (в) 500 Гц, разряд полностью перешел в дуговую стадию.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке при инициировании разряда на сапфировой подложке ($L = 6$ см, $p = 25$ Торр). Осциллограммы (а) и (в) типичны для случаев, соответственно, распространяющегося скользящего разряда (значительное время межэлектродного замыкания [9]) и самостоятельного дугового разряда (короткое время замыкания). Рассмотрим подробнее форму разряда, которая на сапфире реализуется аналогично представленной на рис. 2(б). В случае завершеного скользящего разряда (а) и самостоятельной дуги (в) наблюдается стабильная повторяемость сигналов (рис. 4), в то время как в случае (б) время замыкания значительно изменяется от импульса к импульсу (в пределах 3 мкс). Следует также отметить, что при уменьшении частоты следования импульсов происходит обратный переход из данной формы разряда в завершённый скользящий разряд.

Выводы. При давлении воздуха 25 Торр в диапазоне частот следования импульсов 200–500 Гц наблюдается как частичный, так и полный переход завершеного скользящего разряда в дуговую форму. Предположительно, обеспечиваются условия, при которых время колебательной релаксации кислорода в объеме среды становится больше, чем в высокотемпературной области скользящего разряда, что может приводить к накопительному эффекту вклада ионизационных и рекомбинационных процессов в электронную проводимость в объеме. Детальная картина происходящих процессов, обуславливающих изменение формы скользящего разряда, является предметом дальнейших исследований. Такой эффект самоорганизации формы завершеного скользящего разряда в воздухе в зависимости от частоты следования импульсов питания наблюдался впервые и не исключено, что его необходимо учитывать при применении такого типа разрядов для поджига и стабилизации горения воздушно-топливных смесей.

Данная работа финансировалась в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. П. Ершов, С. А. Каменщиков, А. А. Логунов и др., Теплофизика высоких температур **47**, 822 (2009). <https://doi.org/10.1134/S0018151X09060030>.
- [2] E. M. Barkhudarov, N. K. Berezhetskaya, V. A. Kop'ev, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 365203(9pp) (2010). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/36/365203>.
- [3] C. Dumitrache, R. Van Osdol, C. Limbach, A. P. Yalin, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting (2017). <https://doi.org/10.2514/6.2017-1976>.

- [4] Д. Ю. Зарослов, Г. П. Кузьмин, В. Ф. Тарасенко, *Радиотехника и электроника* **29**, 1217 (1984).
- [5] И. О. Ковалев, Г. П. Кузьмин, А. А. Нестеренко, *Труды ИОФ РАН, Импульсные СО₂-лазеры* (М., Наука, Физматлит, 1996).
- [6] К. А. Валиев, Л. В. Великов, С. Д. Душенков и др., *Письма в ЖЭТФ* **16**, 990 (1983).
- [7] С. С. Садовникова, В. Г. Добкин, Г. П. Кузьмин, *Вопросы эпидемиологической диагностики, клиники и лечения туберкулеза* (М., 1996).
- [8] В. К. Башкин, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **7**, 35 (2004).
- [9] Е. И. Грудиев, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **48**(6), 12 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068335621060075>.
- [10] Е. И. Грудиев, *Школа-конференция молодых ученых “Прохоровские недели” 2021, Тезисы докладов*. М., С. 79.
- [11] А. Н. Завилопуло, Ф. Ф. Чипев, О. Б. Шпеник, *ЖТФ* **75**, 19 (2005).
- [12] И. А. Генералов, *Вестник Московского университета* **2**, 51 (1962).
- [13] П. Н. Дашук, А. К. Зинченко, Т. Г. Меркулова, Е. А. Сергеевкова, *Журнал технической физики* **48**(8), 1613 (1978).
- [14] П. Н. Дашук, А. К. Зинченко, М. Д. Ярышева, *ЖТФ* **51**(2), 324 (1981).

Поступила в редакцию 25 октября 2024 г.

После доработки 26 декабря 2024 г.

Принята к публикации 22 января 2025 г.