

УДК 537.5

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ РАЗВИТИЯ НЕЗАВЕРШЕННОЙ СТАДИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА РАЗРЯДА

Е. И. Грудиев, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев, О. В. Тихоневич

Экспериментально показана возможность управления скоростью развития незавершенной стадии скользящего разряда по поверхности твердого диэлектрика. В зависимости от давления газа и напряжения источника питания определена скорость развития незавершенной стадии скользящего по поверхности твердого диэлектрика разряда в воздухе. Показано, что скорость развития разряда изменяется от $1.4 \cdot 10^6$ до $7.8 \cdot 10^6$ см/с в диапазоне давления от 10 до 60 Торр и напряжения от 4 до 12 кВ. В спектре излучения плазмы незавершенного скользящего разряда доминирует излучение второй положительной системы азота.

Ключевые слова: скользящий разряд, незавершенная стадия, скорость развития.

Введение. Скользящий по поверхности диэлектрика разряд может быть как в завершенной, так и незавершенной форме. Незавершенная стадия существует при напряжениях, меньших напряжения пробоя, когда канал развивается не на всю длину разрядного промежутка. При этом электрическая цепь замыкается через емкость: канал разряда – второй электрод. Отсутствие сильноточной фазы обуславливает высокую однородность плазменного канала, созданного незавершенным скользящим разрядом на поверхности диэлектрика. Плазма незавершенного скользящего разряда является неравновесной [1]. При этом на поверхности твердого диэлектрика формируется многоканальный или диффузный разряд за счет резкой неоднородности электрического поля на границе двух сред с разной диэлектрической проницаемостью (твердой и газообразной) [2]. Скользящий разряд обеспечивает наличие интенсивного излучения в УФ-спектральном диапазоне [3]. Кроме того, скорость распространения скользящего

разряда зависит от крутизны фронта напряжения, характеристик диэлектрика [4, 5] и давления газа.

В этой работе экспериментально определена зависимость скорости развития незавершенной стадии скользящего по поверхности твердого диэлектрика разряда в воздухе от давления газа и напряжения источника питания. Определены спектральные характеристики излучения плазмы разряда.

Экспериментальная установка, методики и результаты измерений. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик разряда представлена на рис. 1.

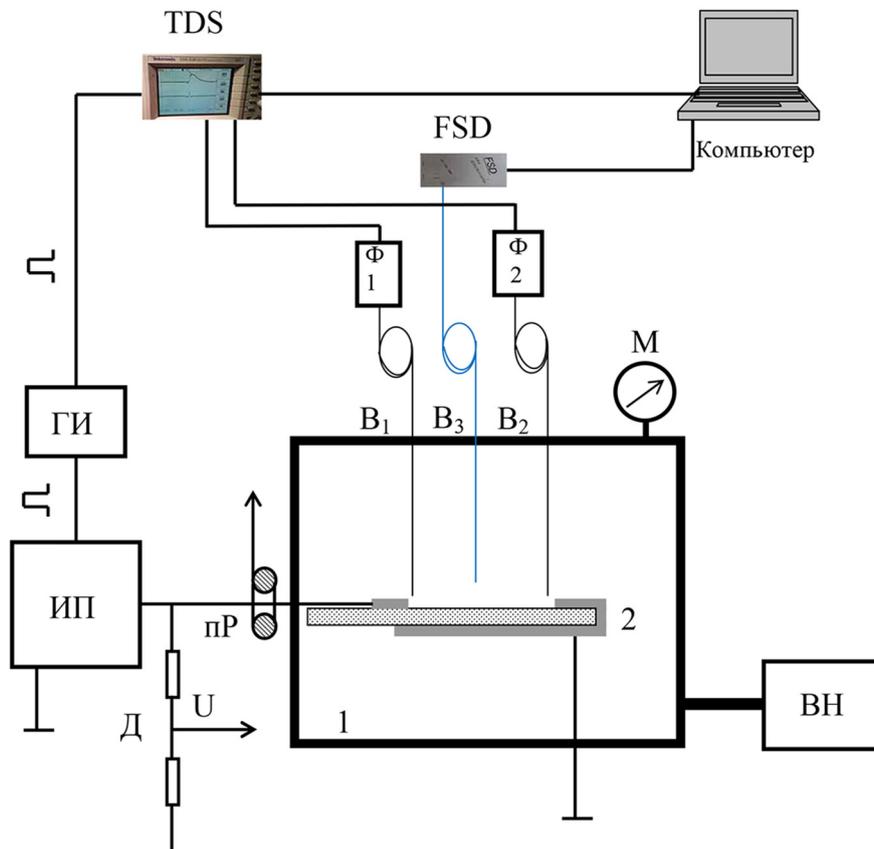


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – система электродов; М – образцовый манометр; ВН – вакуумный насос; ИП – регулируемый источник питания; ГИ – генератор импульсов; Д – делитель напряжения; pP – пояса Роговского; TDS – цифровой осциллограф Tektronix TDS2024C; FSD – спектрометр FSD10; Φ1, Φ2 – фотоприемники; B₁, B₂, B₃ – транспортные оптические волокна.

Эксперименты проводились в вакуумной камере при давлениях от 10 до 60 Торр. Скользящий разряд распространялся по поверхности стеклотекстолита толщиной 1 мм. В качестве рабочего газа использовался воздух. Источник питания позволял регулировать подаваемое напряжение от 0 до 15 кВ. Частота повторения импульсов до 1 кГц. На иницирующий электрод подавались импульсы отрицательной полярности. Напряжение на электродах и давление в камере подбирались таким образом, чтобы избежать контракции разряда. Для измерения электрических параметров разряда использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS2024C. Напряжение измерялось с помощью резистивного делителя 1:1100, ток регистрировался с помощью пояса Роговского.

Для регистрации скорости распространения излучения в видимой области спектра использовались оптоволоконные линии передачи. Входные устройства волоконных линий устанавливались на расстоянии 2...3 мм над плазменным каналом. Для исключения боковой засветки оптоволоконна были утоплены внутрь непрозрачных диэлектрических трубок на 5...7 мм. Входы первого и второго оптических каналов располагались на расстоянии 1 см от электродов. Расстояние между ними составляло 7 см. Излучение



Рис. 2: Осциллограмма измерения скорости распространения фронта ионизации скользящего разряда при $P = 40$ Торр, $U = 7$ кВ, $I = 170$ мА. 1 — напряжение; 2 — ток; 3 — сигнал с первого фотоприемника Ф1; 4 — сигнал со второго фотоприемника Ф2.

по транспортным волокнам поступало на фотоприемники. Длина оптоволоконных каналов составляла 3 метра. В качестве фотоприемников использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-39, ФЭУ-79 и pin-фотодиоды. Сигналы с фотоприемников поступали на входы осциллографа Tektronix TDS2024C.

Спектр излучения плазмы регистрировался с помощью спектрометра с волоконным вводом FSD10. Спектральный диапазон 180–1080 нм. Для подвода излучения к спектрометру использовалось транспортное оптическое волокно длиной 3 метра. Торцевое оптическое волокно располагалось в центре разрядного промежутка на расстоянии 10 мм над плазменным каналом.

Данные с осциллографа и спектрометра поступали на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

На рис. 2 приведен пример осциллограммы измерения скорости распространения фронта ионизации скользящего разряда.

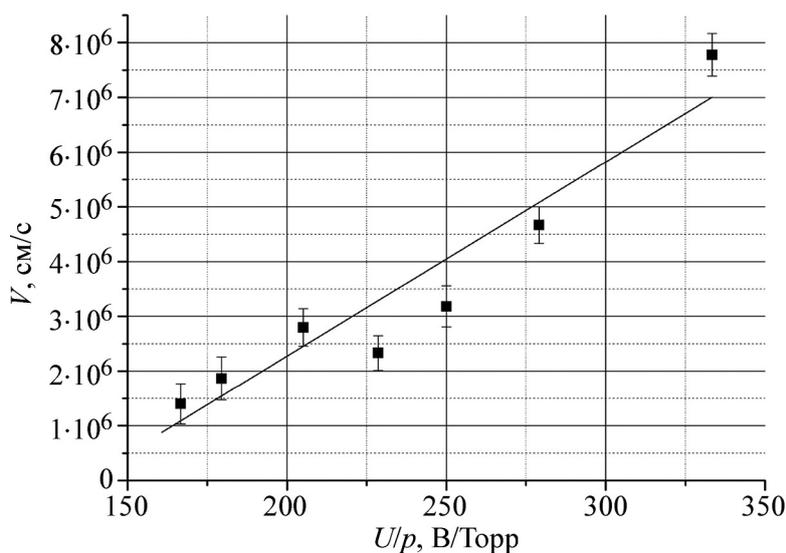


Рис. 3: Скорость распространения фронта ионизации незавершенной стадии скользящего по поверхности твердого диэлектрика разряда.

На рис. 3 показана полученная зависимость скорости распространения фронта ионизации разряда от напряжения на иницирующем электроде отнесенного к давлению U/p .

Полученные результаты показывают, что наблюдается линейная зависимость скорости фронта ионизации при изменении значения U/p от 165 до 335 В/Торр для стеклотекстолитового диэлектрика в данной конфигурации электродной системы.

На рис. 4 представлен спектр излучения плазмы незавершенного скользящего разряда. В спектре доминирует излучение второй положительной системы азота (переход $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$). Спектр излучения является типичным для диффузного разряда [6–8]. Наиболее интенсивные линии соответствуют переходам 0–0 (337.1 нм) и 0-1 (357.6 нм), также достаточно сильны линии 0-2 (380.4 нм) и 1-0 (315.8 нм) [9].

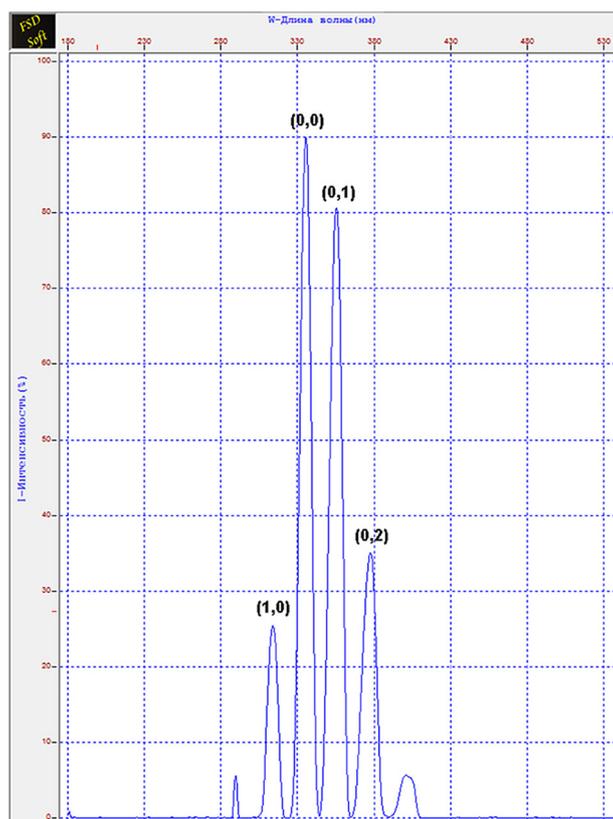


Рис. 4: Спектр излучения плазмы незавершенного скользящего разряда при $P = 28$ Торр, $U = 6.5$ кВ.

Следует отметить, что вклад в светимость плазмы скользящего разряда в других областях спектра исследуемого спектрального диапазона, не наблюдался.

Обсуждение. В работе [11] при скорости нарастания импульса напряжения $(0.6 - 1.4) \cdot 10^{12}$ В/с и давлении от 0.25 до 1 атм скорость распространения скользящего разряда по поверхности твердого диэлектрика изменялась в пределах $(4.4 - 7.8) \cdot 10^7$ см/с. В работе [15] при скорости нарастания импульса напряжения порядка 10^7 В/с и давлении 760, 1520 Торр скорость фронта ионизации изменялась в пределах от 10^7 до $6 \cdot 10^7$ см/с. В наших экспериментах мы получили замедление скорости распространения

фронта ионизации $(1.4 - 7.8) \cdot 10^6$ см/с при скорости нарастания импульса напряжения $(1 - 3) \cdot 10^{10}$ В/с и давлениях от 10 до 60 Торр.

Возможен следующий механизм замедления скорости волны ионизации. Первоначально ионизация осуществляется электронным ударом. После экранировки поперечного поля поверхностными зарядами дальнейшая ионизация происходит в продольном поле, которое потом экранируется объемными зарядами в слое плазмы [11]. Электроны перед фронтом волны появляются в результате фотопроцессов. За волной ионизации формируется проводящий плазменный канал, а ионы заряжают распределённую емкость (плазменный канал – заземленный электрод). Линии тока замыкаются через ток смещения. Волна ионизации при своем движении заряжает распределенную емкость, вследствие чего замедляется, что и наблюдается в наших экспериментах.

Близкие скорости распространения наблюдаются в длинных разрядных трубках (длина которых значительно превышает диаметр) при пониженных давлениях и скоростях роста напряжения порядка 1 кВ/мкс скорость волны ионизации $10^5 - 10^7$ см/с [12, 13]; лазерной смеси гелий-неон при давлении 4 Торр скорость распространения волны ионизации составляла $10^5 - 10^6$ см/с [14, 15].

Скользящие разряды подобного типа (низкоскоростные) в незавершенной и завершенной формах наблюдаются над поверхностью жидких диэлектриков [5].

Наблюдаемая форма скользящего по поверхности диэлектрика разряда может быть отнесена к низкоскоростной форме разряда в отличие от высокоскоростных (наносекундных) форм разрядов [16].

Заключение. Показано, что скорость незавершенной стадии скользящего разряда увеличивается с ростом отношения U/p при данных условиях эксперимента. Таким образом, показана возможность управления скоростью незавершенной стадией скользящего разряда по поверхности твердого диэлектрика. Изменяя условия образования скользящего разряда, можно менять скорость его развития.

Дальнейшего изучения требует вопрос влияния материала диэлектрика и его геометрии, а также влияния состава газовой среды на скорость распространения незавершенного скользящего разряда. Зависимости скорости разряда от соответствующих параметров могут быть получены экспериментальным путем.

Незавершенная стадия скользящего разряда может быть актуальна в прикладном применении. Порядок скоростей $10^4 - 10^5$ м/с сопоставим со скоростью сверхзвуковых ударно-волновых фронтов, потоков газов, фронтов горения. Это может открыть возможности для управления данными процессами путем синхронизации по скорости.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] П. Н. Дашук, А. К. Зинченко, Т. Г. Меркулова, Е. А. Сергеевкова, *ЖТФ* **48**(8), 1613 (1978).
- [2] П. Н. Дашук, Е. К. Чистов, *ЖТФ* **49**(6), 1241 (1979).
- [3] Д. Ю. Зарослов, Г. П. Кузьмин, В. Ф. Тарасенко, *Радиотехника и электроника* **29**, вып. 7, 1217 (1984).
- [4] В. К. Башкин, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев и др., *Прикладная физика* **6**, 54 (2005).
- [5] Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев, А. А. Рухадзе, О. В. Тихоневич, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **37**(7), 38 (2010). <https://doi.org/10.3103/S1068335610070043>.
- [6] V. Lago, D. Grondona, N. Kelly, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **16**(2); April 2009 <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4815155>.
- [7] М. И. Ломаев, Д. В. Рыбка, Д. А. Сорокин и др., *Оптика и спектроскопия* **107**(1), 37(2009). <https://doi.org/10.1134/S0030400X09070054>.
- [8] Е. Х. Бакшт, А. Г. Бураченко, М. И. Ломаев и др., *Квантовая электроника* **45**(4), 366 (2015). <http://dx.doi.org/10.1070/QE2015v045n04ABEH015479>.
- [9] R. W. B. Pearse and A. G. Gaydon, *The identification of molecular spectra* (London, Chapman & Hall, 1963).
- [10] Труды ИОФРАН под ред. А. М. Прохорова, **52**, 128 (М., Наука, Физматлит, 1996).
- [11] И. М. Руткевич, *ЖТФ* **56**, в. 7, 1419 (1986).
- [12] Ю. З. Ионих, *Физика плазмы* **46**(10), 928 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063780X20100049>.
- [13] В. Н. Коновалов, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев и др., *Физика плазмы* **41**(9), 833 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063780X15090068>.
- [14] В. П. Абрамов, И. П. Мазанько, *ЖТФ* **50**(4), 749 (1980).
- [15] В. П. Абрамов, П. И. Ищенко, И. П. Мазанько, *ЖТФ* **50**(4), 755 (1980).
- [16] Г. А. Месяц, Н. М. Зубарев, И. В. Васенина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **47**(7), 32 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620070052>.

Поступила в редакцию 25 сентября 2020 г.

После доработки 23 апреля 2021 г.

Принята к публикации 26 апреля 2021 г.