

03:04

Оптимизация длины незавершенной стадии канального поверхностного разряда для заданной амплитуды высоковольтного импульса напряжения

© А.А. Котов

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Троицк
E-mail: akotov@triniti.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.

Проведено экспериментальное исследование характеристик незавершенной стадии канального поверхностного разряда при умеренных скоростях роста приложенного напряжения. Обнаружено, что зависимость длины разряда от скорости роста приложенного напряжения dU/dt и при постоянной амплитуде импульсов имеет пологий максимум. Наличие максимума объяснено нелинейной зависимостью времени распространения разряда от dU/dt , что позволяет оптимизировать длину разряда с точки зрения получения ее максимального значения.

Электрический разряд по поверхности диэлектрика (поверхностный, скользящий разряд) по-прежнему является предметом современных научных исследований [1], а его свойства позволяют использовать его для получения разрядов с уникальными свойствами, например малоиндуктивного z -разряда [2]. Канальный поверхностный разряд (КПР) является разновидностью поверхностных (скользящих разрядов), а в незавершенной стадии — барьерных разрядов. Он отличается своей высокой направленностью, что делает его применение удобным для получения и исследования свойств протяженных плазменных образований, в том числе в плотных газовых средах (при давлении 1 atm и более). Физические свойства обеих стадий КПР, завершенной и незавершенной, а также схемы электропитания и диагностики электрических параметров КПР описаны в [3,4]. Развитие КПР происходит в 2 стадии: незавершенной (скользящий разряд) — слаботочная форма и завершенной — сильноточный разряд [3]. В завершенной стадии КПР

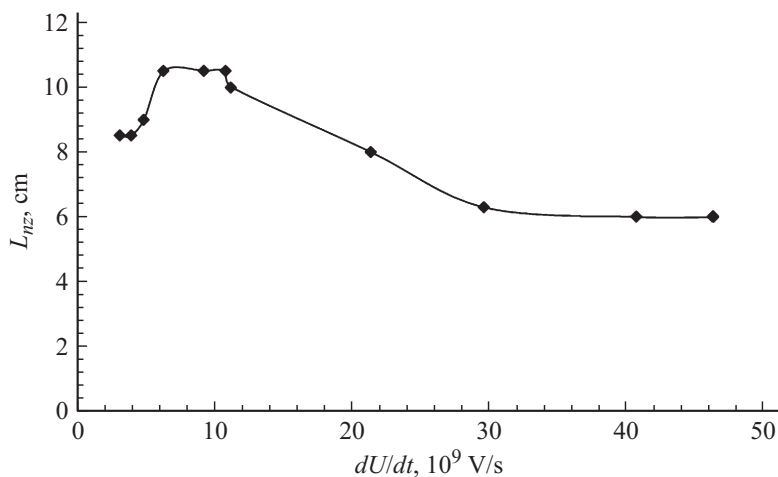


Рис. 1. Экспериментальная зависимость длины незавершенной стадии $L_{из}$ КПР от величины dU/dt .

является мощным источником УФ-излучения, поэтому он применяется, например, в исследованиях процессов ионизации газовых сред [5].

Как известно, основными факторами, определяющими амплитуду тока и скорость распространения незавершенной стадии КПР, являются диэлектрическая постоянная подложки ϵ , параметры газовой среды и скорость нарастания напряжения на электродах разряда, формируемого схемой электропитания КПР [3]. При использовании КПР для различных приложений возникает задача получения максимально длинных незавершенных (и соответственно — завершенных) КПР при заданной амплитуде высоковольтного импульса напряжения. Такое исследование было проведено с КПР на керамической подложке ($\epsilon \sim 150$) с длиной канала 11.5 см, в воздухе при $T = 300$ К. Схема электропитания формировала одиночные высоковольтные импульсы напряжения $U(t)$ с примерно линейным фронтом нарастания и постоянным максимальным значением $U_0 = 10$ кВ, разряд распространялся вдоль канала (координата x) [3]. Эксперименты проводились в диапазоне скоростей нарастания напряжения $(0.14\text{--}4.6) \cdot 10^{10}$ V/s.

В эксперименте визуально фиксировалась длина незавершенной стадии КПР ($L_{из}$ КПР) с точностью ~ 1 мм для различных значений dU/dt . Результаты измерения длины $L_{из}$ КПР в зависимости от

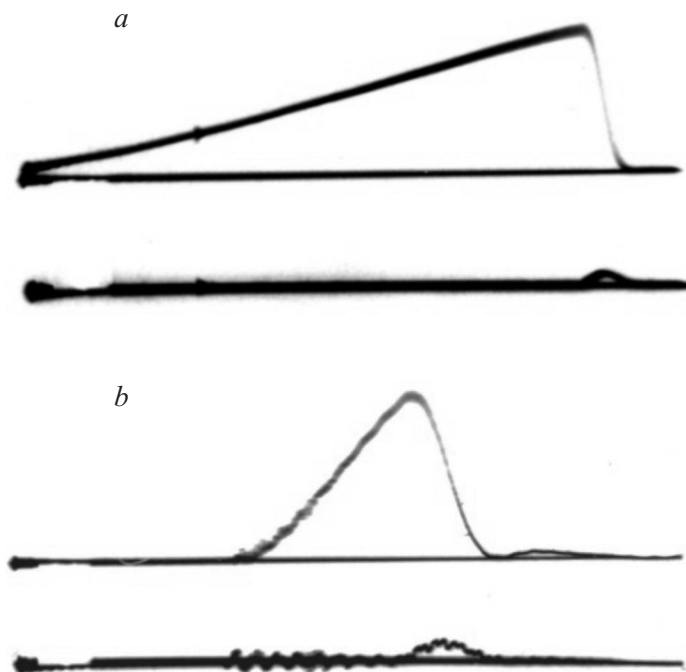


Рис. 2. Типичные осциллограммы тока (внизу) и напряжения (вверху) для 2 значений скорости нарастания напряжения на разряде: *a* — $dU/dt = 4 \cdot 10^9$ V/s, длительность развертки осциллографа $\tau = 4 \mu\text{s}$; *b* — $dU/dt = 35 \cdot 10^9$ V/s, $\tau = 2 \mu\text{s}$.

скорости нарастания напряжения на электродах разряда представлены на рис. 1, из которого видно, что эта зависимость имеет пологий максимум при $dU/dt \sim 10^{10}$ V/s.

С целью выяснения причин появления экстремума кривой, описывающей зависимость длины незавершенной стадии L_{nz} КПР от величины dU/dt , были проведены экспериментальные измерения средней скорости незавершенной стадии канального поверхностного разряда от величины dU/dt на том же устройстве для КПР с длиной канала 11.5 см. На устройство подавалась серия одиночных импульсов с различной скоростью нарастания напряжения, и по осциллограммам тока и напряжения фиксировалось время перехода незавершенной стадии канального разряда в завершённую. На рис. 2 изображены типичные осциллограм-

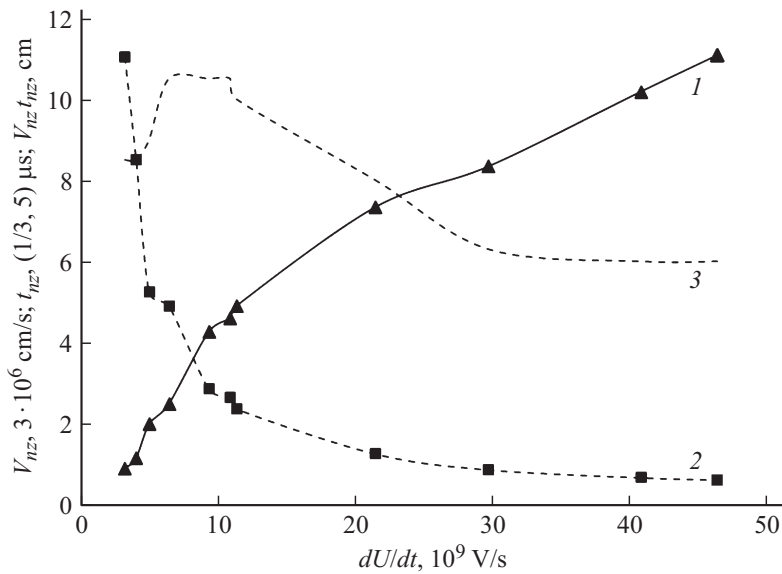


Рис. 3. Характеристики незавершенной стадии КПР: 1 — экспериментальная зависимость средней скорости распространения V_{nz} КПР от dU/dt , 2 — время распространения незавершенной стадии КПР t_{nz} , 3 — функция $V_{nz} t_{nz}$.

мы тока и напряжения для 2 значений скорости нарастания напряжения на разряде, из анализа подобных осциллограмм были получены времена распространения незавершенного КПР для разных значений dU/dt . При прохождении разрядом (в незавершенной стадии) всей длины канала он переходит в завершённую (сильноточную) форму. Момент перехода характеризуется резким падением напряжения (верхняя осциллограмма) и появлением импульса тока на нижней осциллограмме (рис. 2). Время от начала незавершенной стадии разряда до появления сигнала тока завершённой (сильноточной) стадии на электрическом шунте соответствует длительности процесса прохождения разрядом всей длины канала. Из осциллограмм была получена экспериментальная зависимость средней скорости распространения незавершенной стадии КПР от величины dU/dt в широких пределах изменения последней. Результаты измерения средней скорости незавершенной стадии КПР в зависимости от скорости нарастания напряжения на разряде представлены на рис. 3. Исходя из полученной зависимости средней скорости

незавершенной стадии КПР, для каждой длины разряда, полученной экспериментально на том же устройстве, было рассчитано время распространения разряда (рис. 3). Видно, что если зависимость средней скорости распространения V_{nz} от dU/dt растет примерно по линейному закону, то кривая, описывающая поведение времени распространения незавершенной стадии КПР t_{nz} в рассматриваемом диапазоне dU/dt ($4 \cdot 10^9 \div 35 \cdot 10^9$ V/s), резко падает и имеет нелинейный характер. Произведение этих 2 величин $V_{nz}t_{nz}$, т.е. длина незавершенного КПР, должно иметь ожидаемый экстремум, что и подтверждается кривой 3 на рис. 3. Данная зависимость совпадает с данными для длины незавершенного КПР, приведенными на рис. 1. Полученный результат является важным и имеет следующее объяснение. Несмотря на то что с ростом dU/dt растут как амплитуда тока незавершенной стадии КПР, так и скорость его распространения ([3], рис. 3), при этом одновременно падает (нелинейно) время распространения, поэтому произведение $V_{nz}t_{nz}$, т.е. длина незавершенной стадии КПР, оптимально, т.е. имеет максимум, в описанном эксперименте при $dU/dt \approx 10^{10}$ V/s.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование показывает, что зависимость длины незавершенной стадии КПР от скорости роста приложенного напряжения при заданной амплитуде высоковольтного импульса напряжения имеет максимум при $dU/dt \sim 10^{10}$ V/s. Объясняется появление экстремума нелинейной зависимостью времени распространения незавершенной стадии КПР и оптимальным значением произведения $V_{nz}t_{nz}$ в данной области.

В заключение автор выражает благодарность М.А. Васину, В.А. Определёнкину за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Григорьев А.Н., Павленко А.В., Ильин А.П., Карнаухов Е.И. // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 1. С. 66.
- [2] Бурцев В.А., Забродский В.В., Калинин Н.В., Большаков Е.П. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 2. С. 43.
- [3] Колесников Ю.А., Котов А.А. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 8. С. 1512.
- [4] Колесников Ю.А., Котов А.А. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 7. С. 1401.
- [5] Козлова Е.И., Котов А.А., Колесников Ю.А., Новиков В.П. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 5. С. 477.