

04;12

## **Влияние крутизны фронта высоковольтных наносекундных импульсов напряжения на пробой воздушных промежутков**

© Л.М. Василяк, С.П. Ветчинин, Д.Н. Поляков

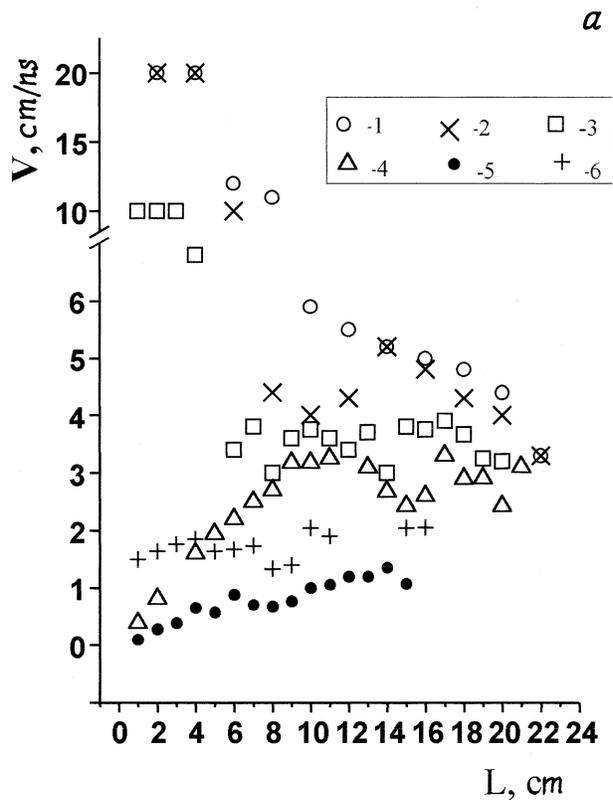
Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий  
Объединенного института высоких температур РАН, Москва

Поступило в Редакцию 2 июня 1999 г.

При уменьшении фронта импульса напряжения отрицательной полярности до 0.5–2.5 ns скорость пробоя возрастает до 10–20 cm/ns. Резкое увеличение скорости объясняется возникновением короткоимпульсного пучка высокоэнергетичных электронов, рождающих в промежутке достаточное количество начальных электронов.

Искровой пробой длинных воздушных промежутков атмосферного давления происходит по стримерному и стримерно-лидерному механизму. Скорость лидера составляет 2–5 cm/ $\mu$ s [1], хотя скорость стримера может достигать 1 cm/ns, поэтому считается, что крутизна фронта импульса напряжения не должна оказывать влияния на время замыкания промежутка. С другой стороны, известно, что пробой длинных газообразных трубок импульсами с наносекундным фронтом происходит в виде высокоскоростных волн ионизации со скоростью замыкания промежутка 1–10 cm/ns [2] за счет возникновения высокоэнергетичных электронов во фронте волны. Известно, что возникновение убегающих электронов при пробое коротких промежутков в плотных газах высоковольтными импульсами с наносекундным фронтом существенно изменяет динамику пробоя по сравнению со статическим или микросекундным пробоем [3,4].

Целью настоящей работы является исследование процессов, влияющих на скорость распространения электрического пробоя в атмосферном воздухе при увеличении крутизны импульса напряжения. Схема эксперимента и применяемые методики аналогичны используемым в работе [5]. Пробой воздушных промежутков длиной до 25 cm разной геометрии (шар–шар с диаметрами 4 cm, плоскость–плоскость в виде



**Рис. 1.** Зависимость скорости пробоя от длины разрядного промежутка: *a* — шар-шар, *b* — плоскость-плоскость: 1-5 — отрицательная полярность, 6 — положительная; 1 — фронт 0.5 ns, 2 — 1.5 ns, 3 — 2.5 ns, 4 — 5 ns, 5, 6 — 8 ns.

дисков диаметрами 21 см, острие-плоскость и острие-острие диаметрами 1 мм и длиной 4 см) осуществлялся импульсами с амплитудой до 420 kV длительностью 60 ns и фронтом от 0.5 до 8 ns. Средняя скорость распространения разряда в промежутке определялась по временной задержке между появлением импульса напряжения на высоковольтном электроде и появлением импульса тока на низковольтном электроде [5].

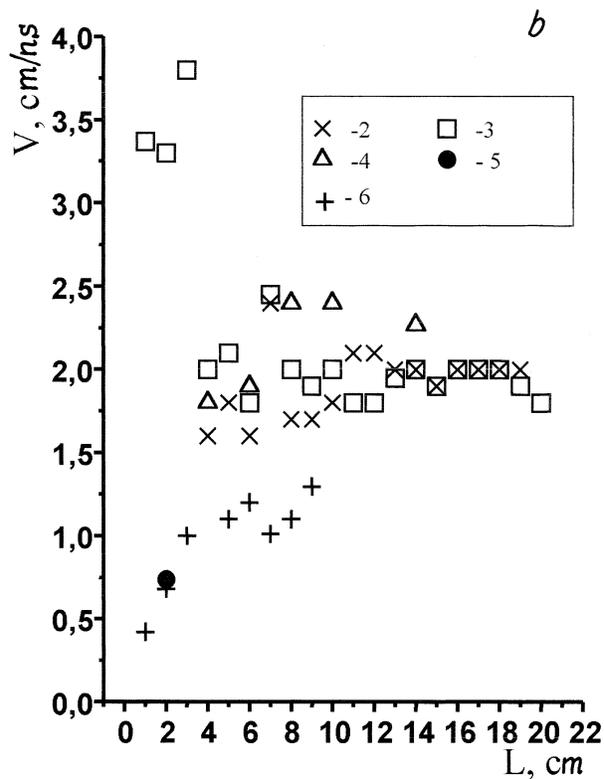


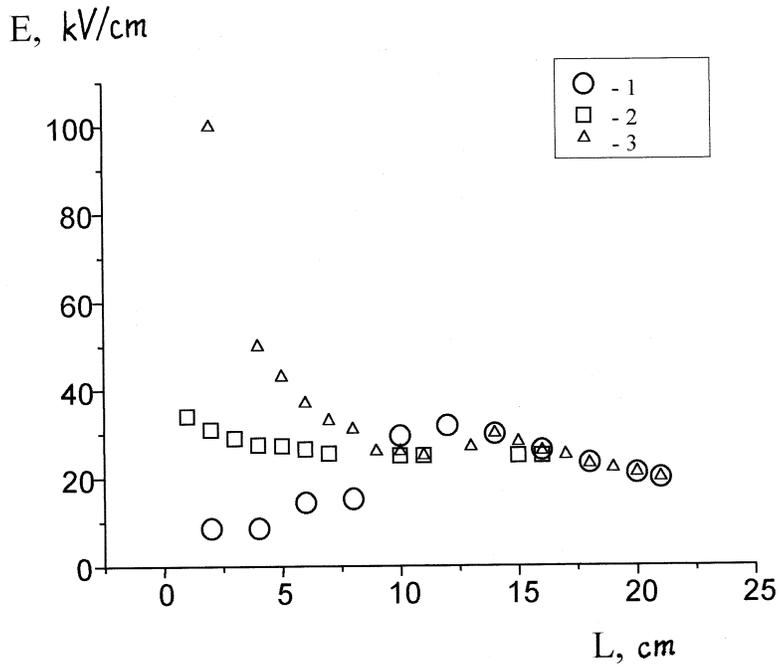
Рис. 1 (продолжение).

Зависимости средней скорости прорастания разряда от длины разрядного промежутка при амплитуде напряжения 420 kV для импульсов отрицательной и 350 kV для импульсов положительной полярности при разных длительностях фронта приведены для конфигурации шар-шар на рис. 1, *a* и плоскость-плоскость на рис. 1, *b*. В неоднородном электрическом поле скорость сильно зависит от крутизны фронта падающего импульса и растет с уменьшением длительности фронта. Средняя скорость для импульсов отрицательной полярности с фронтом меньше 3 ns уменьшается с увеличением длины промежутка и растет для импульсов с более пологими фронтами. Быстрее всего пробой

происходит в конфигурации шар–шар. Скорость пробоя максимальна при длительности фронта 0.5 ns и достигает величины 10–20 cm/ns для импульсов отрицательной полярности в промежутках длиной менее 8 см. С увеличением длины промежутка скорость прорастания канала падает до 2–4 cm/ns и выходит на уровень, который наблюдается для импульсов с фронтом 5–8 ns. Такая же зависимость наблюдается в конфигурации плоскость–плоскость. Для промежутков геометрии острие–острие и острие–плоскость величина скорости меньше, чем для шар–шар, но больше, чем для плоскость–плоскость. Скорость пробоя в однородном поле для импульсов положительной полярности, в отличие от отрицательной, несколько выше, чем в неоднородном, и растет с ростом длины промежутка.

Высокая скорость развития пробоя связана с дополнительными механизмами, возникающими при высоких скоростях нарастания напряжения. На рис. 2 показана величина среднего пробойного поля, соответствующая моменту регистрации пробоя в промежутке шар–шар для импульсов отрицательной полярности. Она сильно зависит от длительности фронта. Для импульсов с длинными фронтами средние пробойные поля в малых промежутках могут достигать значений 200 kV/cm. Для импульсов с предельно короткими фронтами 0.5–2.5 ns, когда пробой коротких промежутков происходит на фронте импульса напряжения, средние пробойные поля в малых промежутках резко падают до значений 15–20 kV/cm. Следует отметить, что при пробое промежутков с однородным полем (плоскость–плоскость) импульсами отрицательной полярности с длительностью фронта 8 ns средние пробойные поля близки к статической напряженности в однородном поле.

Известно, что при пробое промежутков длиной несколько миллиметров импульсами с наносекундным фронтом в начальный момент может возникать пучок быстрых электронов [3]. В наших экспериментах были обнаружены мощные пучки высокоэнергетичных электронов в существенно более длинных промежутках. Быстрые электроны регистрировались по наличию тормозного рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение на поверхности заземленного электрода в геометрии шар–плоскость надежно фиксировалось по почернению пленки РТ-5 после 3–5 пробоев только при пробое промежутков длиной менее 8 см импульсами отрицательной полярности с короткими фронтами 0.5–2.5 ns. Для импульсов с более длинными фронтами рентгеновского излучения из промежутка не обнаружено. Используя метод фольг, удалось определить, что максимум спектра быстрых электронов приходится на энергии



**Рис. 2.** Зависимость среднего поля пробоя от длины разрядного промежутка для конфигурации шар-шар при отрицательной полярности импульсов: 1 — фронт 0.5 ns, 2 — 2.5 ns, 3 — 5 ns.

60 ÷ 100 keV. В нашем случае число быстрых электронов, образующихся при пробое, существенно выше, чем в [3].

Возникающий пучок высокоэнергетичных электронов может существенно повлиять на развитие пробоя и обеспечить сверхвысокие скорости при пробое крутыми импульсами отрицательной полярности. Скорость прорастания стримеров ограничивается рождением начальных электронов перед его головкой. Быстрые электроны и сопутствующие им вторичные электроны, возникающие при движении пучка в газе, создают предварительную ионизацию перед фронтом разряда, существенно облегчая его продвижение вперед. В этом случае для движения фронта ионизации даже с очень высокими скоростями нужна небольшая напря-

женность внешнего электрического поля, что и подтверждается данными рис. 2, где зафиксировано падение напряженности для импульсов с коротким фронтом.

В наших условиях ускоренные электроны появляются на стадии распространения волны пробоя по промежутку, в отличие от [3], где они регистрировались только на фронте тока при замыкании разрядом промежутка. Их возникновение, скорее всего, можно объяснить механизмом поляризационного ускорения на фронте первичного стримера [3], который развивается в прикатодной области во время резкого нарастания напряжения. При достаточной напряженности внешнего поля это стример с сильным локальным полем на головке прорастает по ионизованной дорожке, созданной в газе потоком быстрых электронов. Вследствие большой скорости ионизационных процессов в плотном газе такой отрицательный стример представляет собой мощный высокоскоростной фронт ионизации, который оставляет за собой хорошо проводящий плазменный канал. Последний осуществляет вынос потенциала электрода к головке стримера. При этом ток проводимости, втекающий во фронт, должен быть не меньше, чем требуется для зарядки емкости удлиняющегося хорошо проводящего плазменного канала:  $I = CvU \sim 50\text{--}100\text{ А}$ , где  $C$  — погонная емкость канала стримера,  $v$  — скорость,  $U$  — потенциал электрода. В случае плоскость–плоскость появление высокоэнергетичных электронов затруднено из-за однородного распределения поля.

При положительной полярности импульса напряженность электрического поля вблизи заземленного электрода в промежутке с неоднородным полем будет меньше, чем у высоковольтного, быстрые электроны не образуются либо их мало, к тому же они движутся в направлении, противоположном движению фронта волны ионизации, что резко снижает их воздействие на развитие пробоя.

Таким образом, увеличение крутизны фронта импульса отрицательной полярности приводит к пробое в виде высокоскоростного сильноточного отрицательного стримера, фронт которого является источником высокоэнергетичных электронов, вылетающих из него вперед и создающих предварительную ионизацию перед ним. Такой механизм обеспечивает скорости пробоя на порядок большие, чем при стримерном пробое с фотоионизацией перед фронтом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 98-02-17435).

**Список литературы**

- [1] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд. МФТИ, 1997. 320 с.
- [2] *Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В.* // УФН. 1994. Т. 164. С. 263.
- [3] *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // УФН. 1990. Т. 160. С. 50.
- [4] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991.
- [5] *Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н.* // Материалы Всероссийской научно-образовательной олимпиады "Плазма, XX век", включающие доклады по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-98 и лекции школы молодых ученых. Петрозаводск, 22–27 июня 1998 г. С. 327.