

Э. В. ЯНШИН, И. Т. ОВЧИННИКОВ, Ю. Н. ВЕРШНИН

МЕХАНИЗМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ВОДЫ

(Представлено академиком В. И. Попковым 16 VII 1973)

Основными факторами, определяющими характер пробоя жидких диэлектриков, является их проводимость и длительность воздействующего напряжения. В зависимости от сочетания этих факторов предполагается, что пробой осуществляется либо по тепловому, либо ионизационному механизму (¹, ²). Последний считается ответственным за пробой чистых жидкостей импульсами длительностью $\leq 10^{-6}$ сек. Однако использование ионизационных механизмов для объяснения экспериментальных результатов встречает значительные затруднения и нуждается в дополнительных предположениях. Так, например, характер зависимости импульсной прочности чистых жидкостей от давления и температуры имеет много признаков теплового механизма пробоя, в котором первичным является образование в жидкости парогазовых пузырьков с последующей их ионизацией. Кроме того вопрос о возможности применения модели «свободного» электрона в жидкостях, тем более в полярных, является, по меньшей мере, спорным. В сольватированном же состоянии подвижность электронов, например в воде, близка к подвижности ионов легких металлов, что не может обеспечить высокие скорости развития процессов, наблюдаемые в эксперименте.

В связи с этим актуален поиск иного механизма электропроводности жидкостей в сильных полях, ответственного за нарушение их электрической прочности.

Так для объяснения закономерностей импульсного пробоя дистиллированной воды необходимо учитывать известный в электрохимии «эффект аномальной подвижности протонов», описанный для слабых полей (³). Высокая подвижность протонов определяется особым «перескоковым» характером их движения. Протон H^+ образует с молекулой воды комплекс H_3O^+ (ион гидроксония), который может отдавать «лишний» протон соседней молекуле воды, ориентированной по отношению к нему определенным образом. Эта молекула превращается в H_3O^+ и т. д. Незначительное смещение протона на 0,35 Å приводит к переносу заряда на межмолекулярное расстояние 2,8 Å. При этом скорость движения заряда ограничивается в основном временем, необходимым для ориентации молекул воды в поле ионов гидроксония.

Предлагается следующий механизм импульсного пробоя воды. Воздействие напряжения на разрядный промежуток сопровождается возникновением на аноде положительного поверхностного заряда, образованного вакансиями электронов. В поле этих вакансий происходит поляризация и смещение ближайших молекул воды, завершающееся переходом электронов с этих молекул на анод. Ионизация молекул воды, в свою очередь, приводит к образованию вблизи анода ионов гидроксония по схеме $H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH^-$. Дальнейший перенос заряда к катоду происходит описанным выше способом с той лишь разницей, что скорость этого процесса определяется, в большей степени временем перескока протонов, так как в сильном электрическом поле молекулы воды оказываются уже ориентированными благоприятным образом.

Отметим, что этот процесс переноса положительного заряда осуществляется в основном электронами, причем в области сильных полей все более приобретает черты «дырочного» механизма, свойственного полупроводникам.

Протекание этого «квазидырочного» тока приводит к разогреву прианодных слоев воды. Нарушение электрической прочности промежутка связано с переходом воды в критическое состояние. Как следует из изложенного, этот механизм является неионизационным. Ранее (^{1,2}) тепловые механизмы и вытекающие из них критерии предлагались для описания пробоя жидких диэлектриков, обладающих значительной ионной проводимостью,

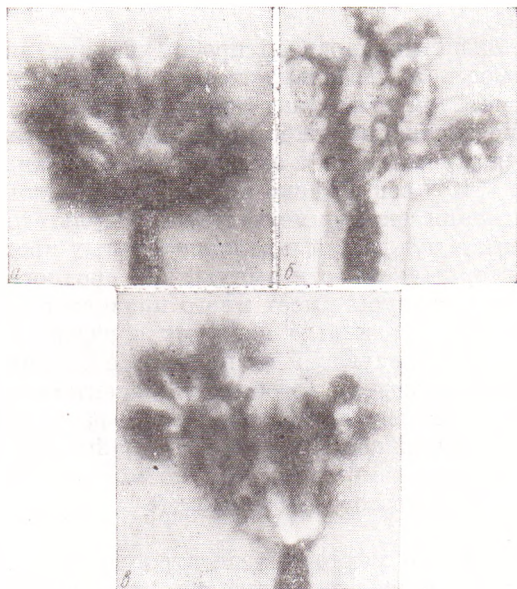


Рис. 1. Теневые картины, разряда: *a* — с анода через 20 нсек. с момента возникновения свечения, *b* — с катода через 200 нсек. с начала импульса (образовавшиеся каналы и электрод окружены ударными волнами), *v* — в момент изменения полярности воздействующего импульса в процессе развития разряда с катода. Длительность экспозиции кадра 10 нсек.

и реализовались лишь при длительном воздействии напряжением. Исходя из «квазидырочного» характера наведенной электропроводности, этот механизм оказывается справедливым и при воздействии импульсов длительностью $<10^{-6}$ сек., учитывая, что образование зародышей газовой фазы в режиме ударного нагрева жидкостей может происходить за время $<10^{-9}$ сек. (⁴).

Предложенный механизм не противоречит известным опытным данным и подтверждается нашими экспериментами. Исследования производились на установке, включающей в себя сверхскоростной электроннооптический фоторегистратор «Канал» (⁵) (усиление по свету $\sim 10^4$, минимальная длительность кадра и временной развертки 10 нсек.), спектрограф ИСП-51, генератор наносекундных импульсов ($U=250$ кв, $\tau_{\text{имп}} \sim 200$ нсек., $\rho=75$ ом). Время нарастания напряжения на промежутке составляло ~ 10 нсек.

При воздействии фронта импульса положительной полярности на промежуток острие — плоскость ($R_{\text{острия}} \sim 30$ мкм, $d=15$ мм), когда напряжение на нем достигало 100 кв, на острие возникало диффузное шарообразное свечение, расширяющееся в радиальных направлениях со скоростью $\sim 10^7$ см/сек, сохраняя при этом гладкие края в течение ~ 5 нсек. В этой области развиваются ярко светящиеся участки, имеющие вид дендритов. Область, занятая свечением, не пропускает внешний свет, и поэтому на фоне достаточно интенсивной подсветки и при высоком пороге фоторегистратора на снимках выглядит темной, а на ней выделяются наиболее яркие участки * (рис. 1*a*).

* Аналогичная картина при развитии разряда с анода в однородном поле была зарегистрирована ранее в работе (⁶).

щих изменений оптических свойств воды и эмиссии света из нее не обнаружено. Коэффициент прозрачности $K_{\text{пр}}$ слоя толщиной $z \sim 10^{-2}$ см уменьшился до значения $< 5\%$.

Для выяснения природы рассеяния света проводилась регистрация временной зависимости спектра пропускания следующим образом. Рабочее тело импульсной лампы ИСП-400 проектировалось на изучаемый участок разрядного промежутка, а затем фокусировалось на входную щель Π_1 спектрографа. Получаемое спектральное разложение поступало на вход фоторегистратора. Наблюдаемый участок промежутка вырезался щелью Π_2 , ориентированной перпендикулярно Π_1 . Таким образом, на фотокатод регистратора поступало спектральное разложение света, проходящего через участок промежутка площадью $S = \Delta\Pi_1 \cdot \Delta\Pi_2 = 4 \cdot 10^{-4}$ см². Спектральное разрешение $\Delta\lambda$ при одновременном наблюдении диапазона $3000 \text{ \AA} < \lambda < 6500 \text{ \AA}$ было не хуже 100 \AA , временное разрешение ~ 2 нсек.

На начальном участке хронограммы регистрировался без изменений спектр лампы. В момент пересечения «темной» областью участка S , на хронограмме наблюдалось резкое потемнение одновременно во всем исследуемом спектральном диапазоне.

Отсутствие зависимости $K_{\text{пр}}$ от λ означает, что рассеяние света происходит на микропузырьках*, размер которых $\alpha \geq 10 \lambda$. Объемную плотность этих микропузырьков можно определить из выражения (7)

$$K_{\text{пр}} = I/I_0 = \exp(-2\pi N\alpha^2 z).$$

Принимая средний размер пузырьков 5 мкм , $K_{\text{пр}} = 5\%$, $z = 10^{-2}$ см, находим $N > 10^8 \text{ см}^{-3}$. Столь высокая плотность микропузырьков в жидкости реализуется при ее вскипании в режиме ударного нагрева. При этом частота зародышеобразования в воде может достигать величины $10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$ (4). То, что нами не было зарегистрировано рэлеевской зависимости $K_{\text{пр}}$ от λ , вызвано, по-видимому, тем, что микропузырьки быстро расширялись при развитии в них ионизационных процессов.

В случае отрицательной полярности острия характер предпробойных явлений резко видоизменяется: свечение развивается в виде каналов, «темные» области отсутствуют и т. д. (рис. 16). При этом для возникновения свечения на острие за время ≤ 10 нсек. требуется более чем двукратное увеличение амплитуды импульса. Так, при воздействии на промежуток ($R_{\text{острия}} \sim 30 \text{ мкм}$, $d = 6 \text{ мм}$) импульса амплитудой 250 кв наблюдалось значительное запаздывание момента появления свечения, $\tau_{\text{зап}} = 30 - 100$ нсек. Было установлено, что появлению начального свечения предшествует образование у острия ударной волны электрострикционного происхождения. Это указывает на то, что выравнивания поля у острия не происходит, т. е. электроны в воде находятся в гидратированном состоянии даже при напряженности макрополя

$$E = \frac{2U}{R \ln(4d/R)} \approx 25 \text{ МВ/см.}$$

Таким образом, даже в столь сильных полях ударная ионизация отсутствует. Наиболее вероятно, что первоначальные ионизационные процессы развиваются в кавитационных полостях, образующихся за фронтом ударной волны**. Эти процессы сопровождаются эмиссией жестких фотонов, что приводит к ионизации молекул воды. Можно предположить, что в дальнейшем процесс развивается так же, как было описано выше, с той лишь разницей, что движение квазидырок происходит в зоне дей-

* «Темная область» не являлась макрополостью, так как полость не могла расширяться в жидкости со скоростью 10^7 см/сек .

** Первичные микропузырьки вблизи катода могут быть инициированы тепловыми эффектами, сопровождающими движение электронов, а также резистивным нагревом поверхности электрода.

ствия фотоионизации и поэтому свечение пространственно локализовано.

В заключение необходимо отметить, что для ионизации молекул жидкости вблизи анода необходимо лишь наличие электронных вакансий на его поверхности, в то время как для осуществления ударной ионизации и тем более автоионизации требуется напряженность электрического поля, по крайней мере, >25 Мв/см, достигнутой в описанном эксперименте. Учитывая обобщенный характер внешних электронов, наиболее ярко выраженный в органических молекулах и то, что в полях $E=1-10$ Мв/см молекулы оказываются жестко ориентированными за счет собственных и наведенных дипольных моментов, могут сложиться условия для дырочного характера движения носителей и реализации предпробойных процессов, аналогичных описанным выше, для широкого класса жидкостей.

Институт автоматки и электротриетрии
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступило
18 I 1973

Сибирский научно-исследовательский
институт энергетикки
Новосибирск

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. И. Скана в и, Физика диэлектриков. Область сильных полей, М., 1958.
- ² И. Адамчевский, Электрическая проводимость жидких диэлектриков, Л., 1972.
- ³ Дж. Бокрис, Б. Конуэй, Современные аспекты электрохимии, М., 1967.
- ⁴ В. П. Скрипов, Метастабильная жидкость, «Наука», 1972.
- ⁵ Б. А. Барышев, Л. В. Гявгянен и др., Автометрия, № 6, 53 (1971).
- ⁶ А. П. Алхимов, В. В. Воробьев и др., ДАН, 194, № 5, 1052 (1970).
- ⁷ Ф. А. Королев, Теоретическая оптика, М., 1966.