

МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ВОДЫ
С ОСТРИЙНОГО АНОДА В НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

В.Ф. К л и м к и н

Практическое использование дистиллированной воды в различных электрофизических устройствах выявило необходимость всестороннего исследования механизма электрического разряда в воде. Чрезвычайно мало экспериментальных данных, относящихся к высоким напряженностям поля ≥ 1 МВ/см и наносекундным длительностям воздействия напряжения. Что касается гипотез относительно механизма электрического пробоя воды в наносекундном диапазоне, то они различны и иногда прямо противоположны. Например, считается, что механизм пробоя является собственно электрическим и обусловлен ионизационными процессами в самой жидкости [1]. В [2] предлагается тепловой механизм, в котором первичным является образование в жидкости парогазовых пузырьков с последующей их ионизацией. Высокоскоростные спектроскопические исследования предпробивного свечения в воде выявили сплошной спектр и ряд линий серии Бальмера, что связывается с процессами диссоциации, возбуждения и ионизации молекул жидкости [3]. Однако структура линейчатого спектра указывает на то, что процессы возбуждения атомов водорода протекают в газовой фазе [4]. В то же время отмечается уменьшение зависимости импульсной электрической прочности воды от давления и температуры при переходе от микро- к наносекундным длительностям воздействия напряжения [5]. Некоторая противоречивость результатов требует детального уточнения характера предпробивных процессов в воде в наносекундном диапазоне.

В данной работе с помощью сверхскоростной многокадровой лазерной шпирен-регистрации впервые выявлены важные особенности зарождения и развития электрического разряда в воде с острейного анода при длительностях воздействия напряжения ~ 40 –700 нс.

Разрядный промежуток образовывался острым и полусферическим электродами из нержавеющей стали. Радиус закругления вершины острья ~ 90 мкм, а полусферического электрода ~ 5 мм. Расстояние между электродами составляло ~ 1 –2 мм. На электроды подавался импульс напряжения с амплитудой до 40 кВ. Длительность фронта ~ 10 нс, а плоской части ~ 5 мкс. Шпирен-система позволяла получать до шести кадров с регулируемым временным интервалом между ними в пределах ~ 1 –50 нс. В качестве источника подсветки использовался рубиновый лазер с длительностью импульса ~ 5 нс. Опыты проводились с дистиллированной водой (удельное сопротивление $\sim 10^5$ Ом·см), электроды и жидкость дегазации не подвергались.

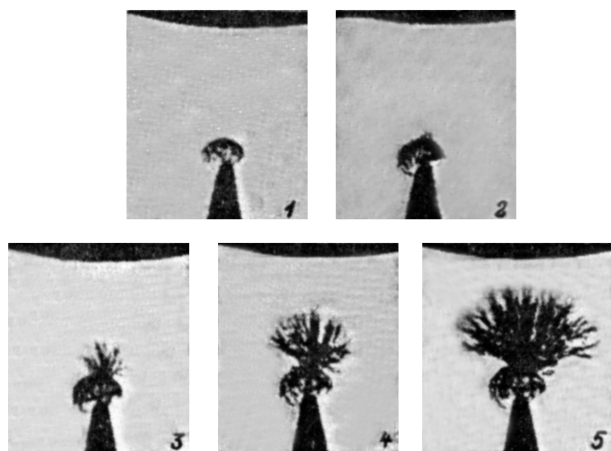


Рис. 1. Сверхскоростные лазерные шлирен-фотографии электрического разряда в воде с анода. Время запаздывания пробоя 750 нс. Расстояние между электродами - 2 мм. Временной интервал между кадрами - 10 нс.

Рассмотрим сначала экспериментальные результаты, соответствующие длительностям воздействия напряжения ≥ 500 нс. Через некоторое время после приложения напряжения к разрядному промежутку (в зависимости от его величины) вблизи острейшего электрода (в контакте с ним или непосредственно в жидкости) возникают первичные ионизационные (стримерные) каналы со слабым градиентом плотности. Развитие стримерных каналов сопровождается фазовым переходом, возникновением микропузырьков и их гидродинамическим расширением. Поперечный размер каналов увеличивается до $\sim 10-20$ мкм, градиент плотности становится значительным, и они хорошо видны на шлирен-фотографиях. Интенсивно эти процессы протекают вблизи поверхности электрода, что приводит к появлению на границе электрода с жидкостью сильных конусообразных оптических неоднородностей размером $\sim 20-40$ мкм. Стримерные каналы распространяются по радиальным направлениям, поэтому начальное возмущение имеет примерно сферическую форму. На рис. 1 представлены типичные шлирен-фотографии электрического разряда в воде с анода при напряжении на промежутке - 27 кВ (поле вблизи острейшего электрода $\sim 1,3$ МВ/см). Момент экспозиции первого кадра ~ 60 нс до пробоя промежутка. Характерный размер начального возмущения ~ 300 мкм, а скорость его развития по направлению к катоду $\sim 3 \cdot 10^5$ см/с. Воз-

можно, что картина несколько усложняется генерацией ударных волн в результате интенсивного поглощения энергии в стримерных каналах. Последующие кадры на рис. 1 показывают возникновение и распространение более быстрой стадии электрического разряда. Ее зарождение происходит на фронте начального возмущения, соответствующего границе первичных стримерных каналов (2 кадр). Скорость развития стримерных каналов значительно увеличивается. Наблюдаются многочисленные их разветвления, электрический разряд имеет форму кисти (или куста) и сильно рассеивает внешний свет (темная область на фотографиях). Скорость распространения кистевого разряда по данным кадров 2-5 составляет $\sim (4-3) \cdot 10^6$ см/с и несколько уменьшается по мере продвижения в глубь промежутка. На границе темной области или иногда чуть впереди в жидкости развиваются новые стримерные каналы, которым соответствует слабое изменение показателя преломления. Вблизи острейного электрода происходит разрушение стримерных каналов. Некоторые детали электрического разряда наблюдались ранее в однородном поле при напряженностях $\lesssim 1$ ВМ/см [6]. Предполагается, что стадия интенсивного кистевого разряда протекает за счет развития ионизационных процессов в самой жидкости в результате локального усиления электрического поля. Поскольку она возникает только после фазовых превращений в первичных стримерных каналах, то в целом процесс развития электрического разряда является сложным и включает в себя элементы и „пузырькового“, и ионизационного механизмов пробоя.

При увеличении напряжения на промежутке картина развития электрического разряда сохраняется. Уменьшается в несколько раз ($\sim 1.5-2$) размер начального возмущения, и более плотной становится структура кистевого разряда. Однако оказалось, что при длительностях воздействия напряжения $\sim 70-200$ нс одновременно с описанным механизмом пробоя существует и конкурирует другой механизм. Легко увидеть различие в их характере, сравнивая рис. 1 и 2. Последний соответствует напряжению на промежутке 30 кВ (поле вблизи острейного электрода ~ 1.8 МВ/см). Видно, что стадия интенсивного разряда (рис. 2, кадр 2) не предшествует возникновению каких-либо возмущений вблизи поверхности острия (рис. 2, кадр 1). Электрический разряд развивается сразу с большой скоростью, которая вначале составляет $\geq 5 \cdot 10^6$ см/с, а затем уменьшается до $\sim 3 \cdot 10^6$ см/с. Впереди сильного возмущения (темная область) на 3 кадре видно множество стримерных каналов, слабо рассеивающих свет, некоторые из которых достигли катода. Различие в скорости как раз и позволяет определить временное запаздывание между двумя процессами: развитием стримерных каналов и образованием темной области, состоящей из микропузырьков и не пропускающей внешний свет. Третий кадр рис. 2 получен примерно за 2-4 нс до пробоя промежутка. Распространение ионизации с большой скоростью $\sim (0.8-2) \cdot 10^7$ см/с в последующий момент завершает начальную стадию формирования электрического разряда. Анализ результатов указывает на то, что этот

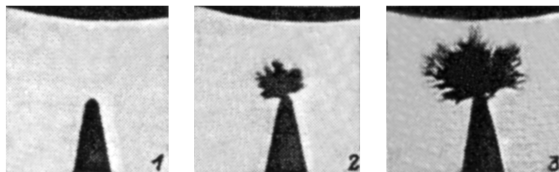


Рис. 2. Сверхскоростные лазерные шlieren-фотографии электрического разряда в воде с анода. Время запаздывания пробоя 110 нс. Расстояние между электродами — 1 мм. Временной интервал между кадрами — 10 нс.

механизм пробоя связан с развитием ионизационных процессов в самой жидкости. В течение распространения электрического разряда в промежутке ионизационные процессы развиваются также и в образующихся микропузырьках, но они не являются первичными и основными.

При дальнейшем увеличении напряжения на промежутке, когда характерные длительности его воздействия составляют ≤ 50 нс, второй механизм пробоя с анода (рис. 2) становится преобладающим.

Полученные результаты показывают многообразие и сложность явлений, протекающих при формировании электрического разряда в воде с анода в наносекундном диапазоне. Они позволяют качественно понять установленные ранее закономерности и выявить причину возникающих противоречий. Незначительные изменения плотности жидкости, связанные с развитием тонких стримерных каналов, вряд ли могут быть обнаружены с помощью электронно-оптических преобразователей из-за искажений изображения при наносекундных экспозициях. Поэтому в работе [2], по-видимому, удалось зарегистрировать только последующие стадии возникновения и быстрого расширения микропузырьков, что и приводит к отсутствию зависимости коэффициента прозрачности темной области (быстроразвивающегося разряда) от длины волны внешней подсветки. Развитием в этих микропузырьках вторичных элементарных процессов обусловлена эмиссия узких линий серии Бальмера [4]. Реализацией преимущественно второго механизма пробоя с анода (ионизационного) можно объяснить уменьшение зависимости импульсной электрической прочности воды от давления в [5].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск, 1975. 256 с.
- [2] Яншин Э.В., Овчинников И.Т., Вершинки Ю.Н. // ДАН СССР. 1974, Т. 214. № 6. С. 1303-1306.

- [3] Yamada H., Sakamoto S., Nakao Y. // J. Electrostatics. 1979. V. 7 P. 155-166
- [4] Clements J.S., Sato M., Davis R.H. // IEEE Trans, Industry Application, 1987, V. 23. N 2. P. 224-234.
- [5] Каляцкий И.И., Кривко В.В. В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников. Томск, 1964. С. 249-251.
- [6] Климкин В.Ф., Пономаренко А.Г. // ЖТФ. 1979. Т. 49. В. 9. С. 1896-1904.

Новосибирский
государственный
университет
им. Ленинского комсомола

Поступило в Редакцию
5 июня 1989 г.
В окончательной редакции
29 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16 вып. 4
02; 11; 12

26 февраля 1990 г.

© 1990

МОНОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ РАСПАДЫ КЛАСТЕРОВ Al_n^+ ($n < 25$)
И Si_n^+ ($n < 12$), РАСПЫЛЕННЫХ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

А.Д. Беккерман, Н.Х. Джемилев,
В.М. Ротштейн

Распыление поверхности твердых тел в виде кластерных ионов — явление, природа которого до конца не выяснена. Исследования последних лет показали, что кластерные ионы, покидающие область бомбардировки, могут испытывать мономолекулярные распады, происходящие вследствие избыточной энергии, накопленной кластером в процессе его образования [1, 2].

В данной работе приводятся экспериментальные результаты изучения роли мономолекулярных распадов кластерных ионов в формировании масс-спектра частиц, распыленных с поверхности Al и Si . Уделено особое внимание определению наиболее вероятных направлений мономолекулярных распадов кластерных ионов Al_n^+ и Si_n^+ и установлению связи между регистрируемыми осколочными ионами и спектром основных ионов. Методика измерений подробно описана в работе [3]. Измерения проводились при бомбардировке поликристаллических образцов ионами He^+ с энергией 8,5 кэВ, плотностью тока в пучке 1 мА/см². Пучок разворачивался в растр 500x500 мкм на поверхности образца. Для устранения влияния неоднородности травления поверхности образца на точность измерений отбор вторичных ионов производился из центрального участка растра травления размером 200x200 мкм.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности распадов кластерных ионов Al_n^+ в бесполовой зоне масс-спектрометра (до входа