

Параметры плазмы при наносекундном пробое и капиллярном разряде в твердом диэлектрике

© С.В. Барахвостов, И.Л. Музюкин

Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: lfd@iep.uran.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2008 г. В окончательной редакции 9 апреля 2008 г.)

Исследован энергомассовый состав плазмы, образующейся в результате пробоя монокристаллов KCl и при разрядах в капиллярах, образованных при пробое образцов из полиэтилена высокого давления и KCl. Обнаружено, что поток плазмы, образуемый головной частью канала разряда в KCl, является существенно менее интенсивным, чем поток плазмы капиллярного и поверхностного разрядов. Кроме того, при первом пробое KCl не обнаружено многозарядных ионов материала образца. Выявлена близость значений энергии и зарядовых чисел для капиллярного и поверхностного разрядов.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Wq, 52.50.Dg

Введение

Использование электрических разрядов в газовых средах при высоком давлении является одним из способов получения неидеальной плазмы [1]. Она возникает на дуговой стадии процесса, в связи с чем для реализации этого способа необходимо использовать источники с большим запасом энергии, способные вложить в дугу большую удельную мощность. Разновидностью этого способа являются импульсные методы зажигания дуги в диэлектрических трубках и капиллярах с газовым наполнением, а также импульсный пробой микросекундной длительности жидких диэлектриков. Эти способы позволяют получить плазму с высокой степенью ионизации, концентрацией зарядов до 10^{20} cm^{-3} и температурой до 10^5 K при давлении до 50 МПа.

Представляется перспективным использование для этих целей высоковольтных импульсов наносекундной длительности с крутизной фронта импульса порядка 10^{14} V/s . Ранее было установлено, что при распространении каналов наносекундного разряда с анода их скорость в объеме диэлектрика достигает 10^6 m/s . Плотность тока в канале разряда достигала 100 MA/cm^2 , а электропроводность плазмы в канале разряда на стадии его распространения обеспечивалась переходом валентных электронов конденсированного диэлектрика в квазисвободное состояние. Последнему процессу способствовали эффекты металлизации диэлектрика на фронте фазового перехода „твердый диэлектрик–плазма“ [1,2]. Можно ожидать, что сочетание указанных особенностей этого процесса в итоге приведет к возникновению в канале наносекундного разряда с анода плотной плазмы, содержащей значительное количество многозарядных ионов. При экспериментальной проверке этой гипотезы диэлектрические среды были представлены кристаллическим хлоридом калия, а также полиэтиленом высокого давления. Наносекундные разряды осуществлялись в объеме диэлектриков, а также в капиллярах, образованных при пробое образца.

Экспериментальная часть

Предварительно были проведены эксперименты по замеру скорости движения канала разряда в KCl, а также скорости истечения плазмы в момент достижения каналом анодного разряда поверхности диэлектрика. Эксперимент проводился в воздухе при нормальном давлении с использованием фотохронографа ФЭР-7. Импульс высокого напряжения подавался от генератора „Радан 220“ с длительностью фронта $\sim 200 \text{ ps}$, амплитудой 220 kV, длительностью 5 ns (на согласованной нагрузке), с запасаемой энергией 1 J. Так как диэлектрический кристалл являлся несогласованной нагрузкой, то импульс генератора представлял собой последовательность отраженных импульсов с затухающей амплитудой.

Для анализа плазмы, истекающей из канала пробоя, использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Разрядная схема коаксиального типа смонтирована в вакуумной камере (1). Исследуемый диэлектрический образец (3) помещен в диэлектрический держатель (2), предназначенный для предотвращения пробоя по поверхности образца. Положительный импульс высокого напряжения подавался на острый электрод А. С другой стороны на образец накладывалась металлическая фольга с отверстием диаметром 0.5 mm, играющая роль катода. Малый диаметр отверстия необходим для уменьшения вклада поверхностного разряда. Ток измерялся в цепи катода К при помощи резистивного шунта (4). Плазма пробоя анализировалась при помощи спектрометра Томсона (6) с усилителем на МКП (7) с автоматической системой регистрации либо с помощью цилиндра Фарадея (8). Эксперименты проводились в вакууме при остаточном давлении 10^{-4} Pa . Вакуум в системе создавался паромасляным насосом с вымораживанием паров.

Энергетический и зарядовый состав плазмы исследовался по методике, описанной в [3]. Подготовка образцов имела свои особенности для кристаллов KCl и

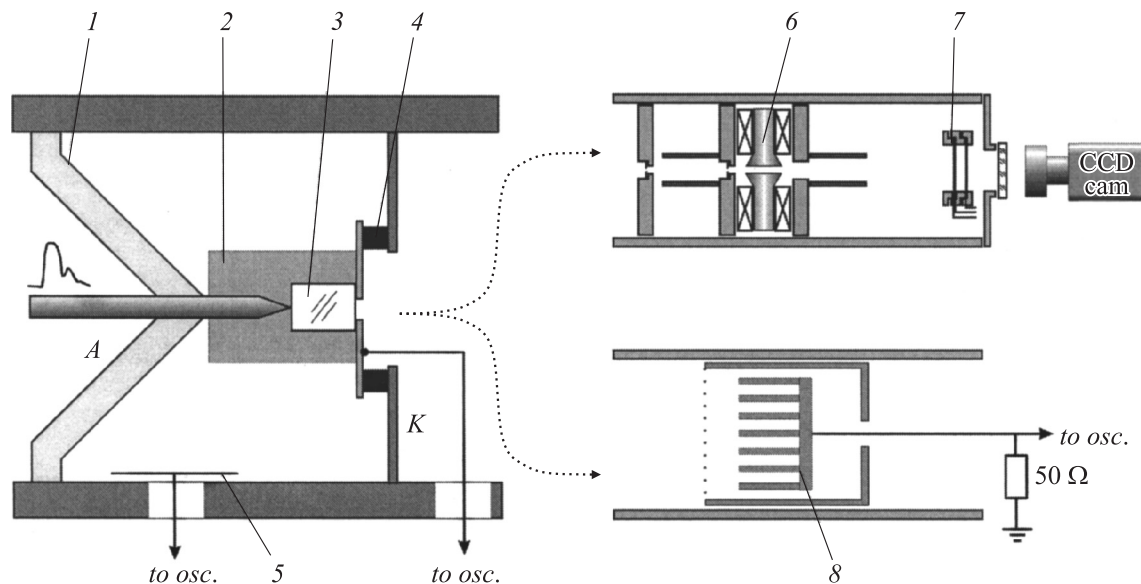


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера, 2 — держатель образца, 3 — образец, 4 — токовый шунт, 5 — делитель напряжения, 6 — спектрометр Томсона, 7 — усилитель на МКП, 8 — цилиндр Фарадея.

полиэтилена. Кристалл KCl использовался для получения плазмы первичного пробоя кристалла и пробоя в капилляре, тогда как образцы из полиэтилена — только для получения плазмы пробоя в капилляре. Это связано с тем, что, используя анизотропию кристалла в отношении пробивной напряженности, в нем можно получить один канал [4]. Таким образом, оказалось возможным спрогнозировать выход канала разряда на поверхность со стороны катода с точностью до 0.2 mm. В образце из полиэтилена разряд может значительно отклоняться от минимального пути до противоположного электрода. Таким образом, спрогнозировать место выхода канала разряда хотя бы с миллиметровой точностью не представляется возможным, поэтому в образце из полиэтилена исследовался только капиллярный разряд. Для этого производился первоначальный пробой, после чего отверстие в катодной пластине совмещалось с выходом канала разряда.

Результаты и их обсуждение

Полученная фотохронограмма движения границы разряда с последующим выбросом плазмы в воздух представлена на рис. 2. Из нее видно, что в момент достижения фронтом анодного разряда (1) свободной поверхности диэлектрика наблюдается выброс плазмы (2). Исследование закономерностей истечения плазмы в момент достижения каналом анодного разряда поверхности диэлектрика показало, что сначала в течение около 20 ns происходит выброс локально протяженной плазмы со скоростью $\sim 25 \cdot 10^3$ m/s (1). Затем эта скорость резко уменьшается до значений $< 5 \cdot 10^3$ m/s (2) (рис. 3). При размещении в месте выхода канала разряда на свободную поверхность твердой мишени на ней образуется

кратер со всеми характерными признаками высокоскоростного удара [5].

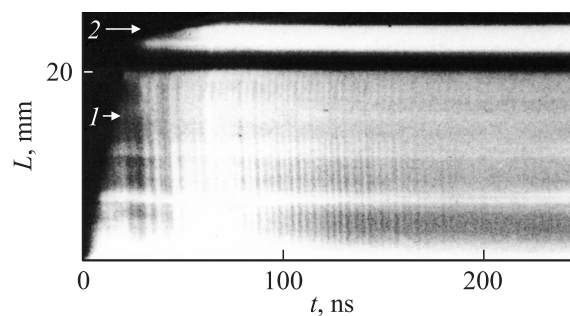


Рис. 2. Фотохронограмма анодного пробоя в KCl: 1 — фронт анодного разряда, 2 — выброс плазмы из канала пробоя.

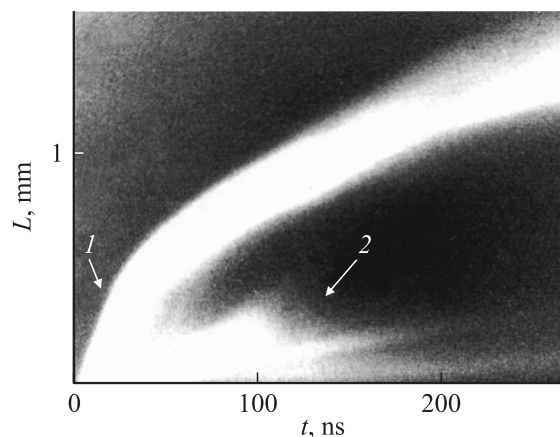


Рис. 3. Фотохронограмма выброса плазмы из канала анодного пробоя: 1 — высокоскоростная компонента, 2 — низкоскоростная компонента.

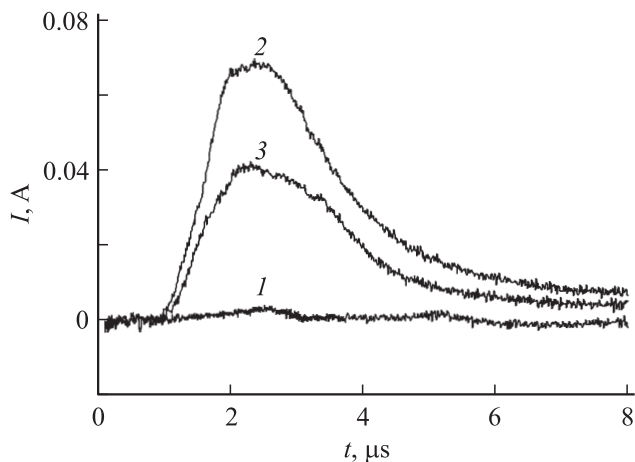


Рис. 4. Сигнал с цилиндра Фарадея: 1 — пробой KCl, 2 — первый разряд по капилляру, 3 — второй разряд по капилляру.

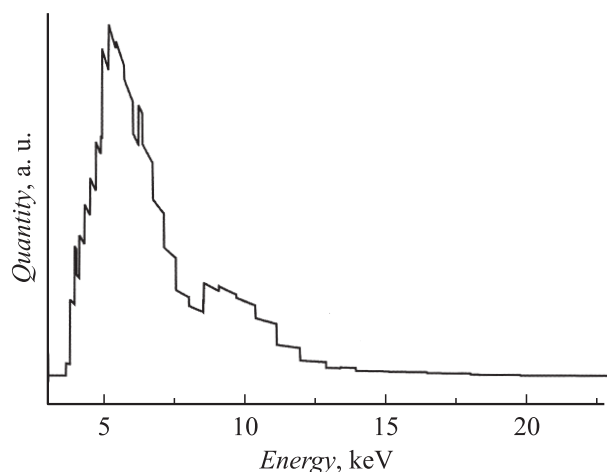


Рис. 5. Энергетическое распределение ионов водорода при пробое KCl.

В результате проведенных измерений с помощью цилиндра Фарадея было обнаружено, что сигнал для первоначального пробоя KCl оказался существенно более слабым, чем сигнал для капиллярного разряда при втором и третьем импульсах (рис. 4). Это свидетельствует о том, что поток плазмы, образуемый головной частью пробоя, существенно менее интенсивен, чем поток плазмы чисто капиллярного разряда.

Энергомассовый анализ плазмы первоначального пробоя показал наличие в ней только ионов водорода. Водород присутствует в поверхностных слоях образца в растворенном виде, а также в парах диффузионного насоса. Энергетическое распределение ионов водорода представлено на рис. 5.

Ожидаемого заметного присутствия ионов материала диэлектрика не наблюдается. Это может говорить либо об отсутствии условий для ускорения ионов K и Cl до энергий в 100–300 eV как более тяжелых по отношению к H, либо об их малом количестве. Последнее согласуется с результатами фотохронографирования истечения

Таблица 1. Состав плазмы капиллярного разряда для KCl (капилляр — канал пробоя)

№ выстрела	H, %	K ¹⁺ , %	K ²⁺ , %	K ³⁺ , %	K ⁴⁺ , %	K ⁵⁺ , %
2	41	7	8	8	13	22
3	41	6	10	13	11	19

плазмы первоначального пробоя, где высокоскоростная компонента имеет малый объем, который, скорее всего, недостаточен для регистрации спектрометром.

При последующих пробоях по уже образованному каналу состав и интенсивность потока плазмы резко изменяются. Необходимо заметить, что из-за близости массовых чисел K и Cl при используемой конфигурации спектрометра не представляется возможным разделить эти химические элементы. Апертура спектрометра была специально увеличена, для того чтобы было легче прицелиться в ось канала, имеющего микронные размеры. Вследствие этого оказалось невозможным разделить ионы K и Cl. В дальнейшем тяжелые ионы будем условно обозначать как K. Состав плазмы второго и третьего разрядов приведены в табл. 1.

В дальнейшем интенсивность потока плазмы из канала разряда уменьшалась, и чувствительности спектрометра не хватало, чтобы измерить состав плазмы. Характерные энергетические распределения для второго разряда показаны на рис. 6.

При этом основные характерные параметры потока — порядок энергий, зависимость энергии от заряда повторяют результаты, полученные для поверхностного

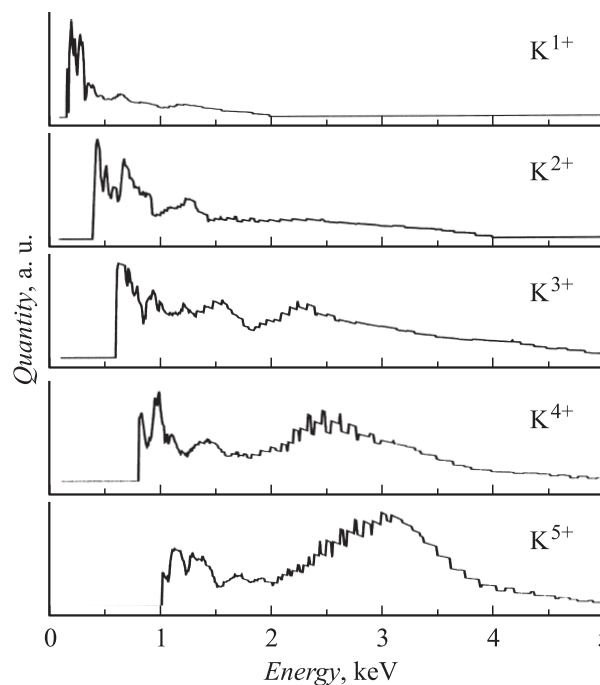


Рис. 6. Энергетические распределения ионов при втором разряде для KCl.

Таблица 2. Состав плазмы капиллярного разряда в полиэтилене (капилляр — канал пробоя)

№ выстрела	C^{1+} , %	C^{2+} , %	C^{3+} , %	C^{4+} , %
1	13	36	41	10
2	64	36		
3	50	30	16	4
4	40	23	25	12
5	27	32	25	16

разряда. Проведенные исследования позволяют предположить, что наблюдаемые высокозарядные ионы из капиллярного пробоя образованы не в голове пробоя, а во время последующей фазы разряда, характеризующейся сильным током.

Эксперименты с образцами из полиэтилена показали, что при первом пробое по капилляру в составе плазмы присутствуют ионы C^{4+} , как и при поверхностном разряде [3], но состав плазмы другой. Если при поверхностном разряде наибольшую долю составляют именно 4 зарядные ионы, то при капиллярном 4 зарядных ионов существенно меньше, чем остальных (табл. 2).

При этом в наших спектрограммах отсутствовал сигнал ионов водорода. Это может объясняться карбонизацией капилляра при первом пробое полиэтилена. Такой эффект наблюдался и при поверхностном разряде, где после нескольких сотен импульсов сигнал водорода уменьшался, а затем исчезал совсем. Состав плазмы может существенно изменяться от импульса к импульсу,

примером тому служат 1-й и 2-й импульсы. Возможно, такие различия связаны с первоначальным формированием и расширением канала. Характерные энергии ионов (рис. 7) в основном совпадают с таковыми для поверхностного разряда [3]. Здесь наблюдается общая для процесса расширения плазмы в вакуум прямая зависимость энергии иона от его заряда. В дальнейшем сигнал потока ионов уменьшается и на 6-м импульсе прекращается совсем. Скорее всего, это связано с карбонизацией и появлением проводимости в капилляре.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что поток плазмы, образуемый головной частью канала разряда в КС1 существенно менее интенсивный, чем поток плазмы капиллярного и поверхностного разрядов. Кроме того, отсутствие многозарядных ионов материала образца при первом пробое КС1 позволяет предположить, что либо отсутствуют условия для ускорения тяжелых ионов до энергий в 100–300 эВ, либо об их малом количестве. Таким образом, первоначальная гипотеза о наличии в плазме головы пробоя многозарядной неидеальной плазмы экспериментального подтверждения в нашей работе не нашла.

Сходные параметры энергий и зарядовых чисел для капиллярного и поверхностного разрядов свидетельствуют в пользу схожести процессов ионизации и расширения в вакуум плазмы этих разрядов.

Существенное снижение интенсивности потоков ионов после нескольких первых разрядов делает невозможным практическое использование капилляра, полученного в результате пробоя диэлектрика, в качестве многозарядной плазмы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 06-08-00124-а и 08-08-00801.

Список литературы

- [1] Фортон В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматгиз, 2004. 528 с.
- [2] Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С., Морозов П.А. // ЖТФ. 2000. Вып. 1. С. 85–87.
- [3] Барахвостов С.В., Музюкин К.Л., Вершинин Ю.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 9. С. 46–50.
- [4] Миронов А.Л., Зубарев А.И., Шпак В.Г. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 11. С. 203–206.
- [5] Вершинин Ю.Н., Барахвостов С.В. // Сб. докл. конф. „Электрофизика материалов и установок“. Новосибирск, 2006. С. 233.

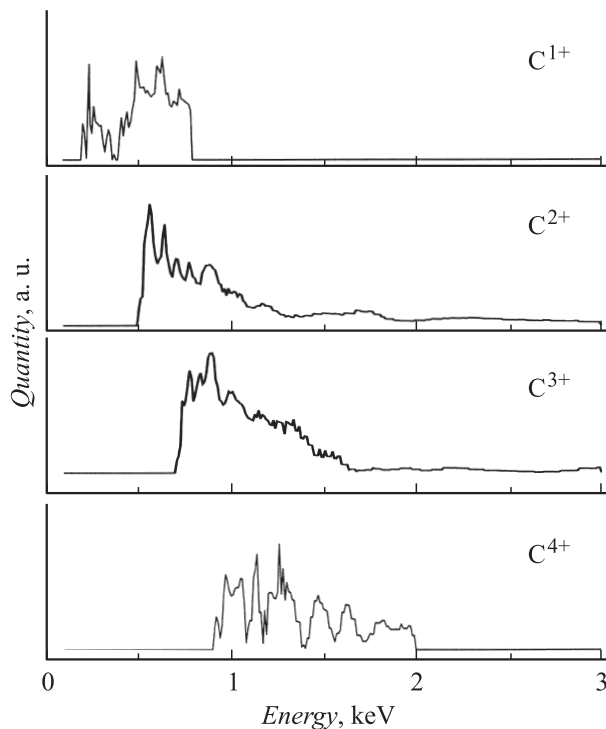


Рис. 7. Энергетические распределения ионов при первом капиллярном разряде для полиэтилена.