

Рассмотрим еще отношения составляющих тока различных частот в разобранных случаях. Из (5) и (8) следует, что

$$I(\omega=0)/I(\omega) = I(2\omega)/I(\omega) = sV_0/2, \quad \text{а} \quad I(3\omega)/I(\omega) = cV_0^2/(4+3cV_0^2).$$

Ясно, что sV_0 в (1) и cV_0^2 в (6) при отрицательных s и c не могут быть более 100%, а это значит, что $I(2\omega)/I(\omega)$ не может быть более 1/2, а $I(3\omega)/I(\omega)$ более 1/7. Однако при положительных s и c электропроводность при одном знаке деформации в принципе может на несколько порядков превышать электропроводность при другом знаке деформации (например, в случае вещества с фазовым переходом „полупроводник – сверхпроводник“, температура которого зависит от деформации). Тогда $I(2\omega)/I(\omega)$ может достигать очень больших значений, но $I(3\omega)/I(\omega)$ и в этом случае не будет превышать 1/3.

Л и т е р а т у р а

- [1] И с у п о в В.А. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 8, с. 500-504.
[2] С м о л е н с к и й Г.А., И с у п о в В.А., С м и р н о в а Е.П., Ю ш и н Н.К. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 1, с. 44-49.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
26 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ Н-ГЕКСАНА

В.П. Б о р о д и н, В.Ф. К л и м к и н

Внешнее давление является одним из факторов, повышающих электрическую прочность жидких диэлектриков. Степень влияния давления зависит от длительности воздействия напряжения [1, 2]. В работе [3] установлены интересные особенности электрического разряда в Н-гексане в квазиоднородном электрическом поле. Оказалось, что в зависимости от длительности воздействия напряжения пробой развивается либо с катода, либо с анода, или с обоих электродов одновременно. Развитие этих исследований представляет теоретический и практический интерес.

Целью настоящей работы является выяснение влияния давления на различные механизмы электрического разряда в Н-гексане в микронаносекундном диапазоне.

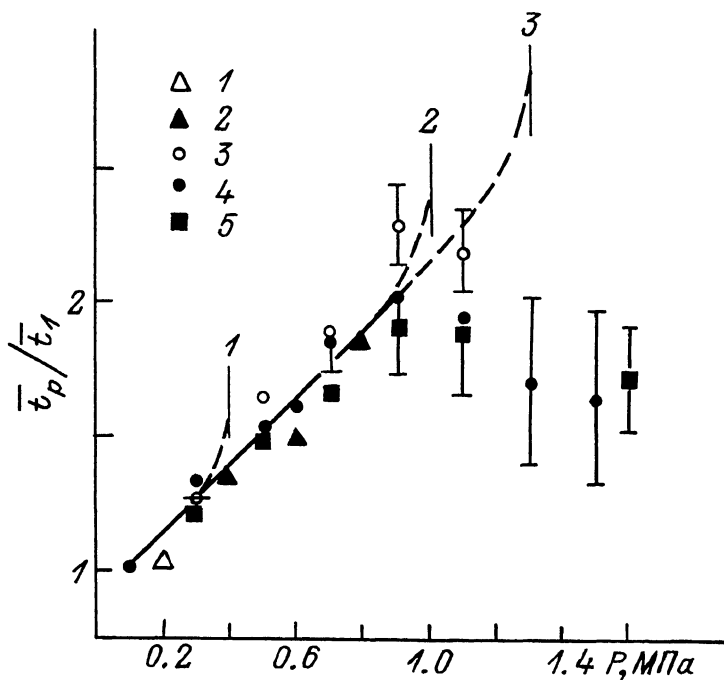


Рис. 1. Зависимость относительного времени запаздывания пробоя Н-гексана от внешнего давления. \bar{t}_1 - среднее время запаздывания пробоя при атмосферном давлении. Напряженности электрического поля: 1 - 1.3 МВ/см ($\bar{t}_1 = 750$ нс), 2 - 1.6 МВ/см ($\bar{t}_1 = 290$ нс), 3 - 1.7 МВ/см ($\bar{t}_1 = 230$ нс), 4 - 1.9 МВ/см ($\bar{t}_1 = 100$ нс), 5 - 2.1 МВ/см ($\bar{t}_1 = 50$ нс).

В опытах использовалась специальная разрядная камера с оптическими окнами, давление в которой создавалось с помощью ручного гидравлического пресса поршневого типа. Геометрия разрядного промежутка, генератор импульсных напряжений, лазерная шпирен-система аналогичны описанным в [3].

На рис. 1 представлены зависимости времени запаздывания пробоя Н-гексана от давления для различных напряженностей поля и расстоянии между электродами 100 мкм. Каждая точка получена в результате усреднения 100-150 измерений. Пунктирные линии интерполируют экспериментальные данные в область давлений, вероятности пробоя при которых $\leq 40\%$. Следует отметить, что при уменьшении межэлектродного расстояния границы различных механизмов пробоя соответствуют более высоким напряженностям поля.

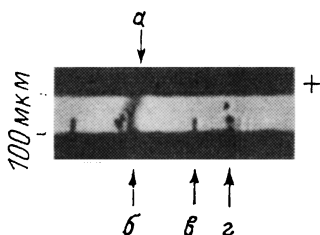


Рис. 2. Лазерная шпирен-фотография предпробивных процессов в Н-гексане при давлении 0,5 МПа. Напряженность поля $\sim 1,7$ МВ/см. Время запаздывания электрического пробоя ≈ 400 нс, а – электрический разряд с анода; б–г – предпробивные процессы с катода. Длительность экспозиции кадра ~ 5 нс.

В условиях пробоя с катода при напряженности поля $\sim 1,3$ МВ/см (рис. 1, 1) обнаружено сильное влияние давления на электрический разряд. Достаточно сравнительно небольших давлений $\sim 0,4$ МПа, чтобы пробой не формировался в течение 50 мкс – постоянной времени спада импульса напряжения.

При напряженности поля $\sim 1,6$ МВ/см сосуществуют и конкурируют примерно с равной вероятностью механизмы пробоя и с катода, и с анода. В этих условиях внешнее давление влияет прежде всего на электрический разряд с анода. Например, при давлении $\sim 0,7$ МПа пробой развивается с катода в виде единичного канала. Давление заметно не сказывается на скорости его развития, которая составляет $\sim 7 \cdot 10^4$ см/с. По мере повышения давления оно начинает влиять и на электрический разряд с катода. Как видно из рис. 1 (2), пробой перестает формироваться при давлении ~ 1 МПа.

В условиях пробоя с анода при напряженности поля $\sim 1,7$ МВ/см обнаружено изменение формы оптических неоднородностей вблизи поверхности электрода, предшествующих возникновению интенсивного кистевого разряда. В отличие от [3] они похожи на конусообразные возмущения на катоде. Критический размер оптической неоднородности несколько меньше ~ 10 мкм. Влияние давления преимущественно на электрический разряд с анода сохраняется. При повышении давления пробой успевает развиваться и с катода. В отдельных случаях наблюдались пробои с анода, отличные от описанных выше. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена высокоскоростная лазерная шпирен-фотография предпробивных процессов в Н-гексане при повышенном давлении. Она отображает момент встречи электрических разрядов с обоих электродов и получена непосредственно перед пробоем промежутка. Электрический разряд с анода (рис. 2, а) в отличие от обычной формы развивается в виде однородной зоны шириной $\sim 30-40$ мкм с размытыми границами. Скорость его распространения такая же, как и кистевого разряда $\sim 2 \cdot 10^6$ см/с. При этом не удается обнаружить вблизи поверхности электрода конусообразных возмущений, соответствующих начальной „лузырьковой“ стадии. Каналы электрического разряда с катода отличаются прямолинейностью и имеют поперечные размеры $\sim 10-15$ мкм (рис. 2, б–в). Скорость их распространения несколько увеличивается $\sim (2-4) \cdot 10^5$ см/с. На рис. 2, г обращают на себя внимание отдельные оптические неоднородности с характерным раз-

мером $\sim 10-15$ мкм и примерно таким же расстоянием между ними. По мере повышения давления пробой начинает развиваться преимущественно с катода и перестает формироваться при давлении ~ 1.3 МПа (рис. 1, 3).

Характер влияния давления на время запаздывания пробоя существенно меняется при напряженностях поля ≥ 1.9 МВ/см в наносекундном диапазоне. Из результатов оптических измерений следует, что в этих условиях конкурируют между собой два различных механизма пробоя с анода, описанные ранее. Причем внешнее давление не влияет на скорость протекания интенсивного разряда $\sim 10^6$ см/с. Из рис. 1, 4-5 видно, что в области давлений до 1 МПа время запаздывания пробоя увеличивается. Однако при дальнейшем повышении давления эта зависимость выходит примерно на участок насыщения или даже несколько падает. Сравнение с результатами оптических исследований показывает, что в этой области давлений преимущественно развивается пробой с анода, соответствующий рис. 2, а. Следует отметить, что углерод, выделяющийся в зоне разряда, и изменение структуры Н-гексана при повышенных давлениях могут приводить к некоторому уменьшению времени запаздывания пробоя.

Таким образом, при напряженностях поля $\sim 1.3-1.7$ МВ/см с помощью внешнего давления можно управлять механизмами пробоя, что свидетельствует о независимости протекания электрических разрядов с катода и с анода.

Как следует из рис. 1, зависимость времени запаздывания пробоя от давления в области до 1 МПа для электрических разрядов с катода и с анода примерно одинаковая и аппроксимируется линейной функцией. Пробивная напряженность поля увеличивается с давлением как $\sim p^{1/2}$.

Анализ большого числа шпирен-фотографий показал, что внешнее давление влияет на зарождение и развитие начальных конусообразных возмущений вблизи поверхности электродов, что подтверждает важную роль „дузырьковой“ стадии в формировании разряда. При напряженностях поля ≥ 1.9 МВ/см и повышенных давлениях > 1 МПа преобладает собственно электрический пробой (с анода), соответствующий, по-видимому, ионизационному механизму.

Авторы признательны В.С. Тесленко за помощь при выполнении работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] К а о К.С., Н и г h а m J.В. - J. Electrochem. Soc., 1961, v. 108, N 6, p. 522-528.
- [2] A r i i K., K i t a n i I. - J. Phys. D: Appl. Phys., 1981, v. 14, N 9, p. 1657-1659.
- [3] К л и м к и н В.Ф. - ЖТФ, 1986, т. 56, в. 10, с. 2041-2043.

Новосибирский государственный
университет им. Ленинского комсомола

Поступило в Редакцию
2 ноября 1987 г.