

06

Электронный механизм распространения канала наносекундного пробоя в жидких органических диэлектриках

© Р.В. Емлин,¹ И.Ф. Пунанов,¹ В.Д. Куликов²

¹ Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия

² Томский сельскохозяйственный институт,
634009 Томск, Россия
e-mail: ivan.punanov@gmail.com

Поступило в Редакцию 11 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 24 мая 2022 г.

Принято к публикации 28 мая 2022 г.

Предложен механизм анодного пробоя жидких органических диэлектриков с длинными молекулярными цепочками, учитывающий электронную структуру протяженных органических молекул. Основанием для представления механизма стали экспериментальные данные о высоких скоростях распространения фронта наносекундного пробоя в кремнийорганических и фторорганических жидкостях ($\sim 10^7$ cm/s), сравнимых с полученными ранее значениями для кристаллов в таких же условиях. Высокие скорости движения канала пробоя при его развитии с анода удовлетворительно интерпретируются в рамках модели каскадных ожерехов, развитой ранее для кристаллических веществ. В соответствии с данной моделью скорость распространения канала пробоя пропорциональна напряженности электрического поля, а задержка начала образования канала относительно фронта импульса напряжения в пределах погрешности измерения не превышает $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ s.

Ключевые слова: электрический пробой жидкости, наносекундный пробой, механизм пробоя.

DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53248.93-22

Введение

Современные тенденции развития импульсной техники связаны с разработкой мощных установок [1–3], напряжения в которых достигают нескольких мегавольт. В таких установках изоляционные материалы подвергаются воздействию сильных импульсных электрических полей $\sim 10^8$ V/cm в диапазоне времен $\sim 10^{-7}$ – 10^{-9} s. За счет компрессии электромагнитной энергии интенсивность воздействия на материалы может достигать значений 10^{23} W/cm² [4]. При создании подобных установок одной из важнейших задач является повышение надежности изоляции, в частности, предотвращение пробоя диэлектрических узлов и сред в условиях экстремального воздействия на них электрического поля. С другой стороны, существуют устройства, где пробой является основой их функционирования, например, твердотельные разрядники [5]. Как задачи по предотвращению пробоя, так и задачи по координации изоляции и управлению процессом пробоя требуют глубокого понимания фундаментальных физических механизмов процесса пробоя в различных конденсированных средах — кристаллических, керамических, жидких.

В изучении механизмов электрического пробоя кристаллических тел достигнут значительный прогресс благодаря хорошо развитой теории твердого тела. Понимание же механизмов пробоя жидких диэлектриков сопряжено с трудностями, среди которых недостаточно развитая теория вещества в жидкой фазе, отсут-

ствие дальнего порядка, неизбежное наличие примесей и т.д. [6]. Несмотря на перечисленные трудности, исследователями разработано значительное число теорий инициирования пробоя в жидких диэлектриках. Однако при всем разнообразии работ, к настоящему времени рассматривается всего лишь два принципиально разных физических механизма развития электрического пробоя: так называемые „пузырьковый“ и „ионизационный“ механизмы [7–10].

Ионизационный механизм предполагает рождение проводящего канала в результате ионизации молекул жидкости за счет автоионизации (анодное инициирование) или ударной ионизации электронами (катодное инициирование). Пузырьковый механизм представляет собой процесс быстрого локального разогрева жидкости токами инжекции в приэлектродных областях, вскипание жидкости, ионизацию парогазовых полостей, начало формирования плазменного канала. Ионизационный механизм пробоя проявляется в виде распространения „быстрых“ проводящих каналов с анода, пузырьковый — в виде развития более „медленных“ каналов с катода.

В литературе отмечается существенное отличие этих двух процессов. В частности, в жидких диэлектриках скорость движения фронта анодного пробоя (v_a) гораздо выше скорости катодного (v_c). Скорость v_a увеличивается при росте приложенного напряжения, а также в процессе распространения вершины канала пробоя к отрицательному электроду. К примеру, значения v_a и v_c в н-гептане при напряжении ~ 30 kV и длине электрод-

ного промежутка ~ 10 mm по данным фотохронометрического метода составляют соответственно $3.4 \cdot 10^5$ и $2.2 \cdot 10^4$ cm/s [11]. В близких условиях эксперимента при напряжении ~ 40 kV и длине промежутка ~ 5 mm методом фотоэлектронной развертки свечения каналов для трансформаторного масла получены значения скоростей v_a и v_c , равные $2.5 \cdot 10^5$ и $8 \cdot 10^4$ cm/s [12]. Для надежного инициирования только „быстрых“ анодных каналов используется конфигурация электродов „острие–плоскость“ с положительным острием, обеспечивающая резко неоднородное сильное поле вокруг анода.

Ранее было показано, что закономерности пробоя с анода в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) [13,14], кварце [15], сульфиде кадмия [16], полиэтилене [17], а именно — высокая скорость движения фронта канала $\sim 10^7$ – 10^8 m/s, плотность тока пробоя $\sim 10^4$ A/cm², кристаллографическая направленность каналов пробоя — удовлетворительно описываются механизмом на базе каскадных оже-переходов в валентной зоне диэлектрика. Наблюдающееся сходство динамики формирования каналов анодного пробоя в ионно-ковалентных кристаллах, полимерных диэлектриках [18–20] и в диэлектрических жидкостях [7,8] позволяет заключить, что они могут быть обусловлены одними и теми же фундаментальными физическими процессами. Этот вывод дает возможность получить теоретические оценки измеряемых параметров процесса пробоя диэлектрических жидкостей, используя подход, развитый ранее для диэлектрических кристаллов [13–15].

Для реализации данной теоретической модели необходимо, чтобы диэлектрик локально подвергался воздействию сильного электрического поля ($\sim 10^8$ V/cm). Такая напряженность может достигаться на микроостриях анода, а также на вершине канала пробоя в процессе его роста. Однако высокая напряженность поля на микроостриях играет роль только в том случае, если сведено к минимуму шунтирующее действие поверхностных токов. Для этого необходимо, чтобы скорость нарастания поля была порядка 10^{12} V/s. Данное условие выполняется при использовании в схемах генерации импульсов газовых разрядников-обострителей высокого давления, обеспечивающих субнаносекундные фронты нарастания напряжения [21].

В настоящей работе экспериментальные результаты по скорости движения фронта анодного пробоя в жидких диэлектриках (фторорганических и кремнийорганических жидкостях, трансформаторном масле, этиловом спирте) при наносекундном воздействии импульсов длительностью $\sim 10^{-8}$ s напряжения амплитудой ~ 140 kV [22–24] обсуждаются и интерпретируются в рамках механизма генерации свободных электронов посредством межатомных оже-переходов.

1. Объекты исследования

В качестве образцов использовались фторорганические и кремнийорганические жидкости (перфторэкозан, феноловый эфир перфторвалериановой кислоты, полиметилсилоксан–200), а также хорошо изученные жидкие диэлектрики, такие как трансформаторное масло и этиловый спирт. Фторорганические жидкости синтезированы в Институте органического синтеза УрО РАН.

Электронная структура молекул органических диэлектриков обусловлена наличием ковалентных связей с участием sp^3 -гибридных орбиталей атома углерода [25]. К типичным диэлектрикам такого класса относятся алканы, перфторэкозан и др.

Перфторэкозан является фторзамещенным алканом с относительно длинной цепочкой из 20 атомов углерода. В перфторэкозани (рис. 1, а) каждый атом углерода создает четыре σ -связи с соседними атомами, при этом σ -связь образуется перекрытием sp^3 -гибридизованных орбиталей, две с атомами углерода и еще две с атомами фтора. Ковалентная связь F–C возникает за счет $2p$ -орбиталей фтора и sp^3 -орбиталей углерода. Спектр энергетических состояний σ -электронов состоит из заполненных и незаполненных электронами уровней. Энергетические уровни в органических материалах также называют молекулярными орбиталями. Высшая заполненная молекулярная орбиталь (ВЗМО) и низшая свободная (НСМО) разделены запрещенной зоной [25].

Длинные молекулы полиметилсилоксана–200 (до 200 мономеров) представляют собой кремний-кислородную цепь с метильными группами, присоединенными к атомам кремния (рис. 1, б) [26]. Ковалентная связь Si–O образуется за счет sp^3 -орбитальных состояний кремния и $2p$ -состояний кислорода. Ковалентная связь дает связывающие и разрыхляющие орбитали молекулы. Кроме того, в создании химической связи кремния могут принимать участие свободные $3d$ -атомные орбитали кремния. Возникает донорно-акцепторное d – p -взаимодействие, которое повышает кратность связи и уменьшает межатомное расстояние Si–O.

Применение понятия зонной структуры подразумевает наличие дальнего и ближнего порядка кристаллической решетки. Именно дальний порядок обеспечивает

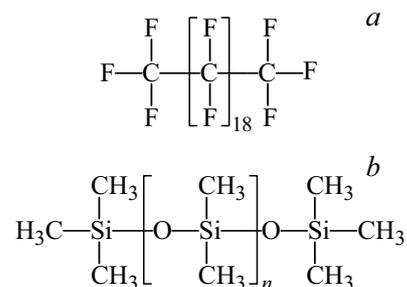


Рис. 1. Одинарные связи ионов углерода, кремния и кислорода в структуре молекул перфторэкозана (а) и полиметилсилоксана–200 (б).

зонный характер движения носителей в кристалле в отличие от прыжкового в аморфных веществах. Основную роль в определении энергетического спектра играет ближний порядок [27]. В качестве примера влияния ближнего порядка на свойства переноса заряда можно указать данные работы [11], в которой показано, что уменьшение ближнего порядка жидкости в случае смешения *n*-гексана и бифенила уменьшает дрейфовую подвижность электронов, инжектированных из катода, с $\sim 4.2 \cdot 10^{-3}$ до $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при $E = 5 \text{ kV/cm}$. Противоположный процесс, т.е. увеличение степени ближнего порядка, может привести к ситуации, когда в аморфном диэлектрике возникает квазикристаллическая структура. Например, упорядочивание длинных молекул, если они расположены более или менее параллельно друг другу [25]. При этом уровнями энергии ВЗМО ставятся в соответствие верхний край валентной зоны W_v , а НСМО — нижний край зоны проводимости W_c .

Молекулярная модель нафтенового минерального масла [28] включает в процентном отношении разные типы алканов: моноциклические $\text{C}_{14}\text{H}_{28}$ (32%), трициклические $\text{C}_{16}\text{H}_{28}$ (26%), бициклические $\text{C}_{13}\text{H}_{24}$ (18%), ациклические $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ (13%) и тетрациклические $\text{C}_{16}\text{H}_{26}$ (11%), что дает плотность $\sim 0.95 \text{ g/cm}^3$. Расчеты электронной структуры минерального масла из первых принципов представлены в работе [28]. Валентная зона и зона проводимости минерального масла сформированы уровнями энергии состояний ВЗМО и НСМО молекул алканов соответственно. Ширина запрещенной зоны $\sim 6 \text{ eV}$.

2. Методика эксперимента

Экспериментальная установка включает генератор высоковольтных наносекундных импульсов, пробойную ячейку и осциллограф Tektronix TDS 644B. Генератор представляет собой трансформатор Тесла, встроенный в коаксиальную формирующую линию с обостряющим водородным разрядником. Напряжение срабатывания разрядника составляет $\sim 140 \text{ kV}$. Длительность импульса при работе генератора на согласованную нагрузку $Z = 50 \Omega$ составляет 8 ns с фронтами менее 0.5 ns . В измерительной ячейке используется конфигурация электродов острие (анод) — плоскость (катод). Импульс напряжения подается на анод. Расстояние между электродами d регулировалось с помощью винта. Образец диэлектрика в данной электрической схеме является несогласованной нагрузкой для высоковольтного генератора, поэтому за первым импульсом напряжения наблюдаются несколько отраженных импульсов с затухающей амплитудой до момента полного пробоя диэлектрика (рис. 2). Интервал между отраженными импульсами составляет $\sim 2.8 \text{ ns}$, что определяется длиной пути между разрядником и анодом. Регистрация импульса напряжения и сигнала тока разряда через образец проводилась по двум каналам осциллографа одновременно.

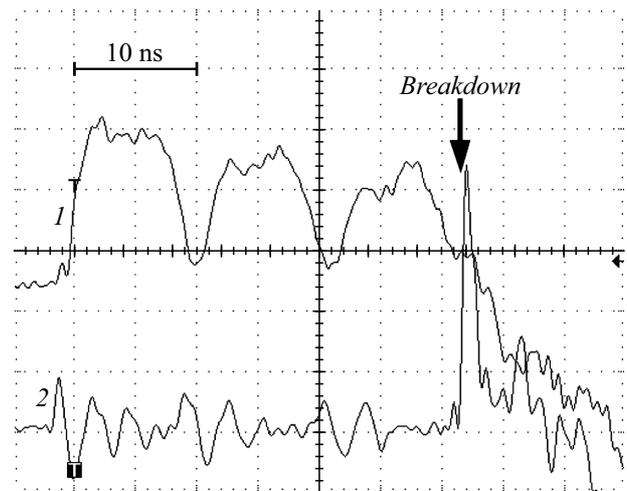


Рис. 2. Типичная осциллограмма импульсов напряжения на остром электроде (1) и тока через образец (2).

Временем пробоя τ полагают промежуток между моментом подачи напряжения на образец и моментом резкого возрастания тока после замыкания каналом пробоя межэлектродного промежутка. Результирующее время пробоя τ определялось как среднее по 8–10 разрядам. Скорость продвижения канала пробоя вычислялась как $v_a = d/\tau$. Конструкция импульсного генератора и методика измерения скорости распространения канала пробоя в жидких и твердых диэлектриках более подробно описаны в работах [22,24,29].

3. Результаты и обсуждение

Измерение времени пробоя τ для образцов жидкости с различной длиной межэлектродного промежутка при использовании импульса напряжения с фронтами менее 0.5 ns позволяет оценить скорость формирования канала пробоя и зависимость v_a от напряженности электрического поля в образце.

Изменение времени пробоя τ и скорости v_a от толщины промежутка d при действии импульса напряжения для исследовавшихся веществ представлено на рис. 3. Время пробоя увеличивается сверхлинейно с ростом расстояния между электродами. Экстраполяция $\tau(d)$ (в пределах погрешности измерений) проходит через начало координат, что указывает на отсутствие при высоких напряжениях задержки начала пробоя с временами выше $1\text{--}2 \text{ ns}$.

Наибольшие скорости v_a соответствуют образцам перфторэпикозана и полиметилсилоксана–200 ($3 \cdot 10^7$ и $2 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$), значительно меньшие — этиловому спирту и трансформаторному маслу ($6 \cdot 10^6$ и $3 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$). Скорость пробоя уменьшается с увеличением d (рис. 3). Зависимость скорости пробоя v_a от напряженности электрического поля в образце можно оценить с учетом сопоставления хода данных функций $v_a(d)$ и $E(d)$ от

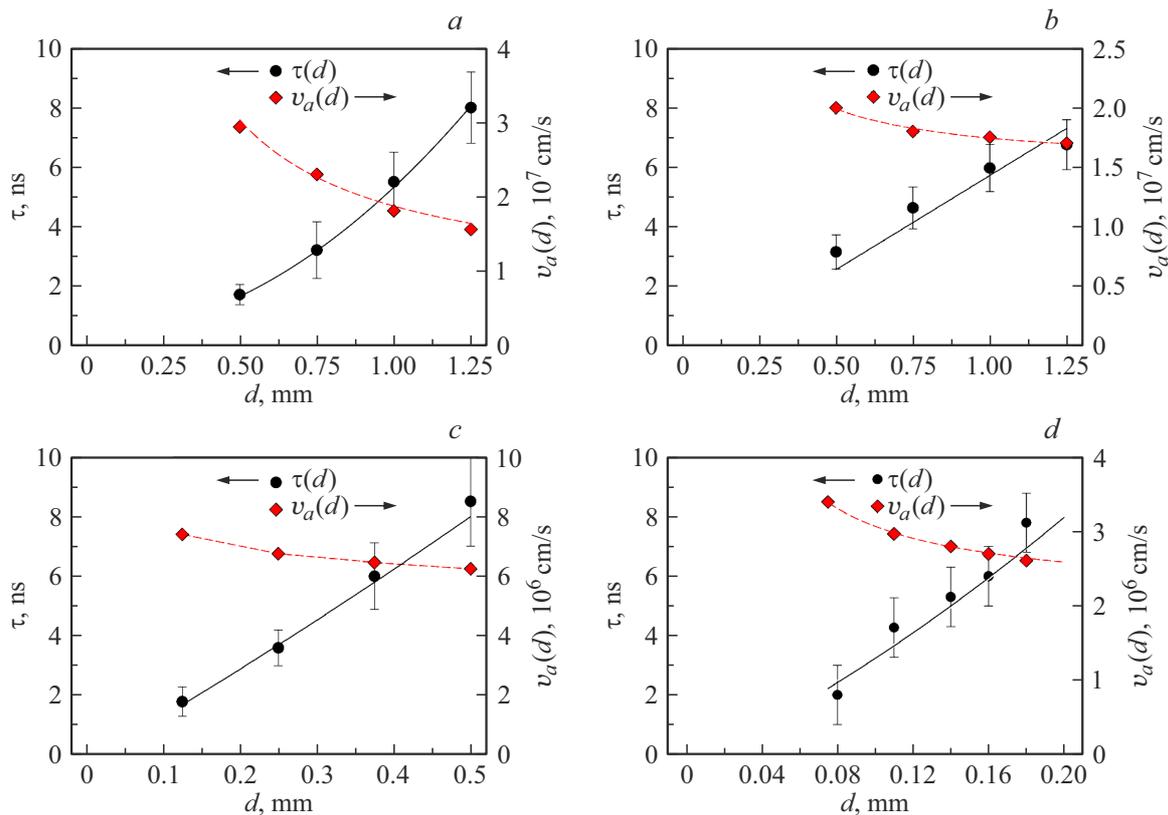


Рис. 3. Зависимость времени формирования τ и скорости роста канала анодного пробоя v_a от длины межэлектродного промежутка d для образцов жидкостей: *a* — перфторэйкозан; *b* — полиметилсилоксан–200; *c* — этиловый спирт; *d* — трансформаторное масло.

межэлектродного расстояния d . Максимальная напряженность поля вблизи острия E_m в структуре электродов „гиперболоид вращения–плоскость“ равна [30]:

$$E_m = \frac{2U}{r \ln \frac{4d}{r}}, \quad (1)$$

где r — радиус кривизны электрода. При $r = 10 \mu\text{m}$, $U = 140 \text{ kV}$ расчетные оценки при $d = 0.5 \text{ mm}$ составляют $E_m = 5 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$. В принятой в литературе терминологии [31] средняя напряженность поля в образце $E_{\text{mid}} = U/d = 2.8 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$, коэффициент усиления поля на аноде $\beta = E_m/E_{\text{mid}} \approx 20$. Изменение напряженности электрического поля E_x от координаты x в зазоре $0-d$ диэлектрика может быть определено из выражения [30]:

$$E_x = \frac{r}{r+x} E_m. \quad (2)$$

Распределение E_x неоднородно и подчиняется гиперболическому закону. В неоднородном поле в интервале $(0-d)$ существует точка x_{mid} , где $E_x(x_{\text{mid}}) = E_{\text{mid}}$. Это означает, что в области от острейшего электрода до положения x_{mid} напряженность выше, чем E_{mid} , а в области от x_{mid} до плоского электрода ниже. Значение $x_{\text{mid}} \approx (0.2-0.3)d$. Характер изменения скорости развития канала пробоя $v_a(d)$ в зависимости от длины

межэлектродного промежутка для перфторэйкозана и трансформаторного масла удовлетворительно согласуется с гиперболической зависимостью $E_{\text{mid}} \sim 1/d$. Для полиметилсилоксана–200 и этилового спирта кривые данной зависимости имеют более пологий ход. Можно сделать вывод, что скорость пробоя с приемлемой точностью пропорциональна напряженности электрического поля.

Измерение времени пробоя жидкостей для более длинных межэлектродных промежутков с участием трех импульсов напряжения из цуга отраженных на примере фенолового эфира перфторвалериановой кислоты представлено на рис. 4. Видно, что экспериментальные точки в диапазоне до 30 ns удовлетворительно аппроксимируются отрезками линий степенных функций, отстоящих друг от друга по оси ординат на $\sim 3-4$ ns. Можно предположить, что время пробоя τ в области, превышающем 8 ns, включает паузу между импульсами 2.8 ns. Такое возможно при условии, что за время паузы в отсутствие приложенного напряжения, канал сохраняет повышенную проводимость. Как и в твердых диэлектриках [32], канал прорастает вглубь образца с каждым последовательно приходящим отраженным импульсом.

Полученные в эксперименте значения скорости роста канала пробоя в перфторэйкозане и полиметилсилокса-

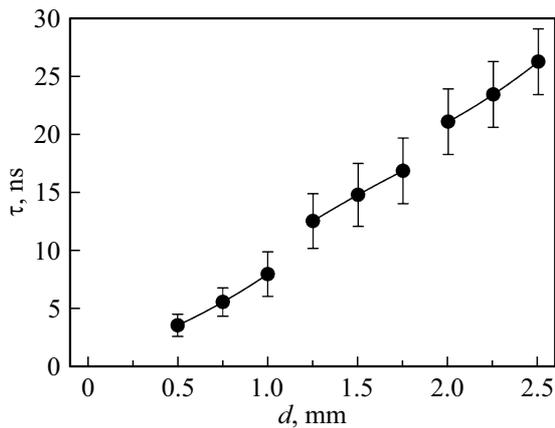


Рис. 4. Зависимость времени пробоя τ от длины межэлектродного промежутка d для значений $\tau < 30$ ns для фенолового эфира перфторвалериановой кислоты.

не–200 сопоставимы с таковыми в монокристаллических образцах KBr и KCl, которые в идентичных условиях эксперимента составляют $5 \cdot 10^7$ и $4.5 \cdot 10^7$ cm/s [29]. Вероятно, фактором, определяющим высокую скорость развития канала пробоя в этих жидкостях, является структура их протяженных и упорядоченных молекул. Данная квазикристаллическая особенность жидкости позволяет использовать теоретические представления о механизме инициирования и распространения канала пробоя в твердых диэлектриках по отношению к исследованным жидкостям.

4. Модель движения канала пробоя в перфторэпикозане

Схема энергетических зон в области контакта металла электрода и перфторэпикозана в сильном электрическом поле приведена на рис. 5.

Согласно работам [13,14], начало формирования канала пробоя определяют процессы на границе „металл–диэлектрик“. При средней напряженности поля в образце $\sim 10^6$ V/cm реальная напряженность вблизи микроострий электрода может быть более $\sim 10^8$ V/cm [33]. В приэлектродной области диэлектрика за счет туннельного перехода электронов в металл идет образование ионов F^{2+} с двумя дырками на $2p$ -орбиталях. Для этого необходимо такое напряжение U , чтобы край валентной зоны диэлектрика поднялся до уровня Ферми металла. Наиболее вероятно, что в процессе рекомбинации дырки участвует соседний атом углерода путем межатомного оже-перехода электрона с sp^3 -орбитали атома C^0 на F^{2+} и последующей генерацией оже-электрона в зону проводимости (рис. 5, a). Рекомбинация дырки на C^{2+} (рис. 5, b) связана с межатомным оже-переходом электрона с атома C^0 в цепочке атомов углерода молекулы перфторэпикозана. Переход оже-электрона в зону проводимости происходит при

условии, что минимальный энергетический зазор между $2p$ -орбиталями F^{2+} и sp^3 -орбиталями атома C^0 и sp^3 -орбиталями атомов C^{2+} и C^0 в электрическом поле не меньше ширины запрещенной зоны диэлектрика.

Вопросы, связанные с оценкой напряженности электрического поля на поверхности фронта канала пробоя, рассмотрены в работах [13,14]. В ШГК необходимые изгибы зон для оже-переходов дает электрическое поле объемного заряда (ОЗ), который включает в себя слой двукратно и слой однократно заряженных ионов галоида [13,14]. Фронт канала пробоя совпадает с границей объемного заряда x_1 [14]. Зависимость напряженности электрического поля ОЗ от времени t в области $x \geq x_1$ со значением проводимости $\sigma_0 = 0$ получена в работе [14]:

$$E_s(t) = \left(\frac{Ex_1}{x_2 - x_1} - \frac{G\Delta x^2}{(x_2 - x_1)\sigma_0} \right) \left(1 - \exp - \frac{t}{\tau_m} \right), \quad (3)$$

где σ_0 — проводимость канала пробоя, x_2 — длина образца, $\tau_m = \epsilon\epsilon_0/\sigma_0$ — максвелловское время релаксации, ϵ — диэлектрическая проницаемость образца, ϵ_0 — электрическая постоянная, G — объемная скорость генерации заряда оже-электронов в пространстве от $x_1 - \Delta x$ до x_1 , $\Delta x \sim 4 \text{ \AA}$ — толщина атомного слоя в кристалле, значение $E = U/x_2$.

Единичный цикл движения фронта ОЗ можно разделить на два последовательных этапа. На первом этапе

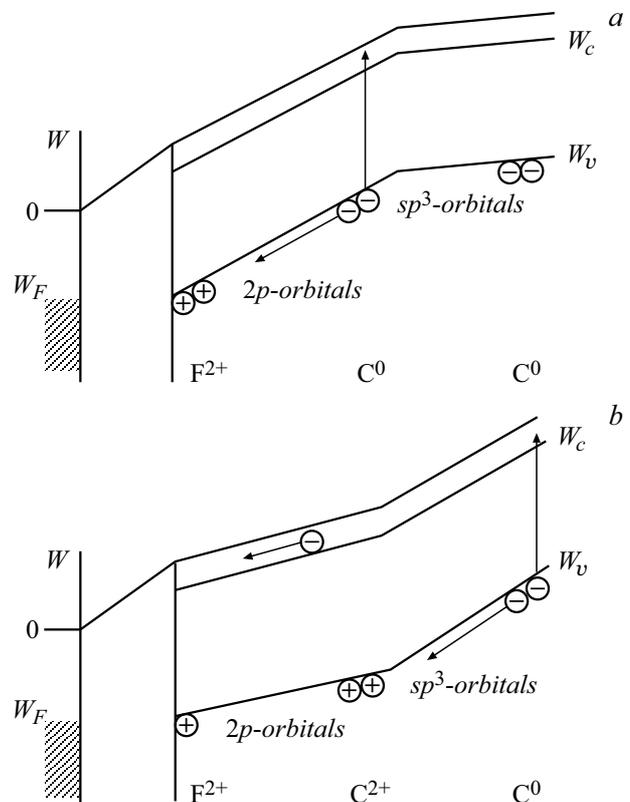


Рис. 5. Схема движения каскадных оже-переходов в образце перфторэпикозана: a — вблизи границы металл–диэлектрик; b — в объеме образца.

при достижении критической напряженности локального электрического поля $\sim 10^8$ V/cm за счет межатомного оже-перехода электрона с соседнего атома галоида происходит распад дырки и генерируется оже-электрон в зону проводимости диэлектрика. Канал продвигается на одно межатомное расстояние. На втором этапе электроны вытягиваются внешним электрическим полем из области ОЗ, и достигается критическая напряженность поля для осуществления следующего цикла. Время цикла Δt можно представить в виде

$$\Delta t = \tau_A + \tau_1, \quad (4)$$

где $\tau_A \sim 10^{-16}$ s — время оже-перехода, τ_1 — время достижения критической напряженности поля. Время установления критической напряженности поля может быть определено как $\tau_1 = E_G/v_1$, где

$$E_G = (G\Delta x^2/(x_2-x_1)\sigma_0)(1 - \exp(-\tau_A/\tau_m))$$

— составляющая напряженности поля оже-электронов в уравнении (3). Величина

$$v_1 = \partial E_s/\partial t = (E_0 x_1/(x_2-x_1)\tau_m) \exp(-t_0/\tau_m)$$

— скорость релаксации поля в отсутствие генерации. Время $t_0 \approx (1-2)\tau_m$. Длительность единичного цикла движения разряда равна

$$\Delta t = \tau_A + \frac{G\Delta x^2 \tau_m}{E x_1 \sigma_0} \exp\left(\frac{t_0}{\tau_m}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{\tau_A}{\tau_m}\right)\right). \quad (5)$$

Согласно (5), при высоких уровнях проводимости и напряженности электрического поля E значительно выше электрической прочности диэлектрика E_b составляющая τ_1 может стать сравнимой или меньше τ_A . В этом случае скорость движения границы ОЗ $v(x_1) \approx \Delta x/\Delta t$ определяется временем τ_A и, вероятно, относительно стабильна при небольшом изменении E . По данным работы [34] значение v_a в монокристаллах KCl при напряжении 230 kV составляет $\sim 2 \cdot 10^8$ cm/s и не меняется от толщины образцов в диапазоне $d \sim 0.6-1.4$ mm. В области напряженностей $E \geq E_b$ параметры движения канала пробоя в большей степени определяются временем τ_1 . Скорость увеличивается пропорционально E и σ_0 , что подтверждается в экспериментах [18,19,29]. Наличие координаты x_1 в знаменателе (5) означает увеличение скорости движения фронта ОЗ в разрядном промежутке $0-x_2$, что наблюдается на опыте по данным фотохронограмм [19].

Вероятно, канал пробоя в перфторэпикозане формируется подобно тому, как описано выше. На это указывает анодный характер пробоя и высокое значение скорости распространения канала $\sim 3 \cdot 10^7$ cm/s. В соответствии с вышеизложенной моделью, продвижение фронта канала пробоя в перфторэпикозане связано с переносом положительного заряда последовательно по ближайшим

атомам углерода и генерацией оже-электронов в зону проводимости диэлектрика (рис. 5). Часть электронов рекомбинирует с дырками с выделением тепла. Выделенная энергия идет на разрыв химических связей и образование свободных фрагментов макромолекул, при этом тепловое давление образует полый канал с газовой фазой. Макромолекулы распадаются на ионы под действием тепловых соударений [29].

Структура канала пробоя формируется совокупностью единичных каналов оже-переходов (рис. 5), проходящих в одном направлении, и включает положительный объемный заряд и проводящий канал сложного фазового состава с электронно-дырочной плазмой. Фронт канала движется от положительного электрода вглубь образца. Диаметр канала, вероятно, определяется размером площадки, в пределах которой формируется слой ионов F^{2+} в приповерхностной области диэлектрика, и его размер пропорционален внешнему напряжению. Такая закономерность наблюдалась ранее для кристаллов KCl, KBr, в которых диаметр канала пробоя увеличивался линейно с напряжением в диапазоне 100–300 kV [19]. Время образования поверхностного слоя ионов F^{2+} по данным эксперимента не превышает 10^{-9} s.

Согласно модели каскадных оже-переходов, условием начала пробоя в диэлектрике является достижение напряженности поля, при которой возможно образование приэлектродного слоя положительно заряженных ионов (в частности, для перфторэпикозана — ионов F^{2+}) посредством туннельного перехода электронов из диэлектрика в металл. Для этого необходимо „поднять“ электрическим полем верхний край валентной зоны хотя бы до уровня Ферми металла W_F (рис. 5). Это достигается при условии, что напряженность электрического поля вблизи электрода E_1 на межатомном расстоянии порядка $\Delta x \approx 1-2$ Å обеспечивает равенство

$$E_1 \Delta x e = W_F - \varphi, \quad (6)$$

где e — заряд электрона, φ — работа выхода электрона из диэлектрика.

Электрическая прочность диэлектрика в конфигурации электродов „острие–плоскость“ может быть представлена в виде

$$E_b = E_1/\beta = (W_F - \varphi)/\Delta x e \beta.$$

По данным работы [24] электрическая прочность перфторэпикозана, измеренная в квазиоднородном поле в режиме медленного повышения напряжения, составляет $E_b = 1.2 \cdot 10^5$ V/cm. Полагая $W_F - \varphi \approx 2$ eV, $\beta \approx 20$, получаем требуемую напряженность поля $E_1 \approx 10^8$ V/cm, при которой $E_b \approx 5 \cdot 10^6$ V/cm, что реально для наносекундного режима пробоя диэлектрика.

Заключение

В работе показано, что наибольшие скорости распространения канала пробоя соответствуют образцам жидкостей с длинными молекулярными цепями (перфторэйкозан, полиметилсилоксан–200), а наименьшие — жидкостям с небольшими молекулами (трансформаторное масло, этанол). Вероятно, уровень квазикристалличности жидкости является фактором, определяющим скорость пробоя жидких диэлектриков. Представленная качественная модель формирования канала пробоя в перфторэйкозане включает механизм генерации свободных электронов посредством каскадных оже-переходов в валентной зоне диэлектрика, выделение тепла при рекомбинации электронно-дырочных пар, образование газо-плазменной фазы. Модель удовлетворительно интерпретирует характер пробоя с положительного электрода и высокую скорость движения фронта распространения канала пробоя $\sim 10^7$ cm/s.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.E. Savage, K.N. Austin, B.T. Hutsel, R.J. Kamm. *Proc. IEEE 21st Int. Conf. Pulsed Power* (UK, Brighton, 2017) DOI: 10.1109/PPC.2017.8291252
- [2] S. Tkachenko, E.V. Grabovskii, A.V. Branitskii, I. Frolov, A. Gribov, A. Gritsuk, K. Mitrofanov, Y. Laukhin, G.M. Oleinik, A. Shishlov. *Proc. IEEE 21st Int. Conf. Pulsed Power* (UK, Brighton, 2017). DOI: 10.1109/PPC.2017.8291097
- [3] J. Deng, W. Xie, S. Feng, M. Wang, H. Li, S. Song, M. Xia, J. Ce, A. He, Q. Tian, Y. Gu, Y. Guan, B. Wei, X. Huang, X. Ren, J. Dan, J. Li, S. Zhou, H. Cai, S. Zhang, K. Wang, Q. Xu, Y. Wang, Z. Zhang, G. Wang, S. Guo, Y. He, Y. Zhou, Z. Zhang, L. Yang, W. Zou. *Matter Radiat. Extremes*, **1**, 48 (2016). DOI: 10.1016/j.mre.2016.01.004
- [4] *Способ формирования импульса тока в нагрузке индуктивного накопителя электромагнитной энергии*: пат. 2746052 РФ. Базанов А.А.; № 2020126760; заявл. 10.08.2020; опубл. 06.04.2021, Бюл. № 10.
- [5] Г.А. Месяц, И.В. Пегель. *Введение в наносекундную импульсную энергетику и электронику* (ФИАН, М., 2009), 192 с.
- [6] Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов. *Физика диэлектриков (область сильных полей), учебное пособие* (Изда-во ТПУ, Томск, 2003), 244 с.
- [7] U. Mohan Rao, I. Fofana, A. Beroual, P. Rozga, M. Pompili, L. Calcara, K.J. Rapp. *IEEE Tr. Dielectr. Electr. Insul.*, **27** (5), 1546 (2020). DOI: 10.1109/TDEI.2020.008765
- [8] В.Я. Ушаков, В.Ф. Клишкин, С.М. Коробейников, В.В. Лопатин. *Пробой жидкостей при импульсном напряжении* (Изд-во науч.-тех. лит-ры, Томск, 2005), 488 с.
- [9] В.Я. Ушаков. *Изв. Томск. политех. ун-та*, **307** (2), 80 (2004).
- [10] В.Ф. Клишкин. *ЖТФ*, **72** (9), 39 (2002). [V.F. Klimkin. *Tech. Phys.*, **47** (9), 1106 (2002). DOI: 10.1134/1.1508185]
- [11] S. Sakamoto, H. Yamada. *IEEE Tr. Electr. Insul.*, **EI-15** (3), 171 (1980). DOI: 10.1109/TEI.1980.298310
- [12] H. Yamashita, H. Amano. *IEEE Tr. Electr. Insul.*, **EI-20** (2), 247 (1985). DOI: 10.1109/TEI.1985.348827
- [13] В.Д. Куликов. *ЖТФ*, **79** (1), 60 (2009). [V.D. Kulikov. *Tech. Phys.*, **54** (1), 56 (2009). DOI: 10.1134/S1063784209010083]
- [14] В.Д. Куликов. *ЖТФ*, **82** (2), 35 (2012). [V.D. Kulikov. *Tech. Phys.*, **57** (2), 192 (2012). DOI: 10.1134/S1063784212020144]
- [15] Р.В. Емлин, С.В. Барахвостов, В.Д. Куликов. *ЖТФ*, **79** (7), 150 (2009). [R.V. Emlin, S.V. Barakhvostov, V.D. Kulikov. *Tech. Phys.*, **54** (7), 1076 (2009). DOI: 10.1134/S1063784209070275]
- [16] V. Kulikov, V. Yakovlev, L. Bobkova. *NJDIS*, **44** (1), 21 (2020).
- [17] V. Kulikov. *NJDIS*, **62** (1), 51 (2021). DOI:10.24412/3453-9875-2021-62-1-51-54
- [18] А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. *Электрический пробой и разрушение твердых тел* (Высшая школа, М., 1966), 224 с.
- [19] Ю.Н. Вершинин. *Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков* (УрО РАН, Екатеринбург, 2000), 260 с.
- [20] H. Yamada, S. Kimura, T. Sato. *Proc. 3rd Int. Conf. Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics* (Trondheim, Norway, 1989), p. 87, DOI: 10.1109/ICSD.1989.69167
- [21] Г.А. Месяц. *Импульсная энергетика и электроника* (Наука, М., 2004), 704 с. [G.A. Mesyats. *Pulsed Power* (Kluwer Academic/Plenum Publishers, NY., 2004)]
- [22] И.Ф. Пуланов, Р.В. Емлин, П.А. Морозов, С.О. Чолах. *Изв. вузов. Физика*, **55** (2), 57 (2012). [I.F. Puananov, R.V. Emlin, P.A. Morozov, S.O. Cholakh. *Russ. Phys. J.*, **55** (2), 191 (2012). DOI: 10.1007/s11182-012-9794-5]
- [23] I.F. Puananov, R.V. Emlin, P.A. Morozov, S.O. Cholakh. *Proc. IEEE 21st Int. Conf. Pulsed Power* (Brighton, UK, 2017), DOI: 10.1109/PPC.2017.8291194
- [24] И.Ф. Пуланов. *Пространственно-временные и энергетические характеристики высоковольтного наносекундного пробоя конденсированных диэлектриков* (Дис. канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, УрФУ, 2017)
- [25] Дж. Спайс. *Химическое строение и структура* (Мир, М., 1966), 432 с. [J.E. Spice. *Chemical Binding and Structure* (Pergamon Press, NY., 1964)]
- [26] *Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение*, под ред. М.В. Соболевского (Химия, М., 1985), 264 с.
- [27] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (Наука, М., 1977), 672 с.
- [28] C. Bin, D. Ji-Wei, Ch. Ming-He. *Crystals*, **11** (2), 123 (2021). DOI: 10.3390/cryst11020123
- [29] И.Ф. Пуланов, Р.В. Емлин, В. Д. Куликов, С.О. Чолах. *ЖТФ*, **84** (4), 35 (2014). [I.F. Puananov, R.V. Emlin, V.D. Kulikov, S.O. Cholakh. *Tech. Phys.*, **59** (4), 503 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214040197]
- [30] J.M. Meek, J.D. Craggs. *Electrical Breakdown of Gases* (Clarendon Press, Oxford, 1953), 507 p.
- [31] Г.А. Месяц. *Письма в ЖЭТФ*, **85** (2), 119 (2007). [G.A. Mesyats. *JETP Lett.*, **85** (3), 109 (2007). DOI: 10.1134/S0021364007020038]

- [32] Р.В. Емлин, И.Ф. Пунанов. ФТТ, **59**(8), 1542 (2017). [R.V. Emlin, I.F. Punanov. Phys. Solid State, **59**(8), 1565 (2017). DOI: 10.1134/S1063783417080108]
- [33] Г.А. Месяц. ДАН, **399**(6), 757 (2004). [G.A. Mesyats. Dokl. Phys., **49**(12), 727 (2004). DOI: 10.1134/1.1848625]
- [34] Р.В. Емлин, Ю.Н. Вершинин, В.А. Белоглазов. *Тр. IX Симпозиума по сильноточной электронике. Николаев 21–30 июля 1992.* (Науч.-тех. редакция „Гиперокс“, М., 1992), с. 299.