

04;05;10;12

Моделирование развития разряда в объемно-заряженном диэлектрике

© М.Д. Носков,¹ А.С. Малиновский,¹ Ч.М. Кук,² К.А. Урайт,² А.Й. Шваб³

¹ Томский политехнический университет,
634034 Томск, Россия
e-mail: noskov@hvd.tpu.ru

² Массачусетский технологический институт,
MA 02139-4307 Кембридж, США
e-mail: cmcooke@mit.edu

³ Университет Карлсруэ,
76128 Карлсруэ, Германия
e-mail: schwab@ieh.etec.uni-karlsruhe.de

(Поступило в Редакцию 2 августа 2001 г.)

Представлена стохастически детерминистическая модель развития разряда, вызванного объемным зарядом в диэлектрике. Численная реализация модели использована для количественного описания пространственно-временных и токовых характеристик разряда в объемно-заряженном диэлектрике. Результаты моделирования сравниваются с данными экспериментального исследования разряда в образцах полиметилметакрилата, заряженных с помощью электронного пучка. Обсуждается взаимосвязь роста проводящих каналов, переноса заряда и энерговыделения в процессе развития разряда.

Введение

В твердых диэлектриках с низкой проводимостью можно создать объемные заряды, сохраняющиеся продолжительное время. Например, с помощью пучков электронов удается сформировать достаточно высокие плотности зарядов в локальных областях диэлектрика при умеренных дозах облучения [1–4]. В этом случае электрическое поле, создаваемое объемными зарядами, может привести к развитию разряда между областью расположения заряда и поверхностью диэлектрика. Рост разрядных каналов приводит к образованию стохастически ветвящихся и изгибающихся разрядных структур. Использование электронных пучков позволяет управлять количеством и пространственным распределением объемного заряда. Это дает возможность исследовать влияние распределения электрического заряда в диэлектрике на пространственно-временные и токовые характеристики роста разрядных структур [5,6].

Для количественного описания закономерностей развития разряда, вызванного объемным зарядом, целесообразно использовать методы математического моделирования. Наибольший прогресс в описании стохастически ветвящегося роста разрядных каналов был достигнут на основе фрактальной модели пробоя диэлектриков, предложенной в работе [7]. В этой модели рост каналов стохастически зависит от напряженности электрического поля. Вероятность образования канала принимается пропорциональной степени локальной напряженности поля. Электрическое поле рассчитывается на основе решения уравнения Лапласа, а разрядная структура считается продолжением электрода. В работе [8] модель была обобщена введением критической напряженности для

роста каналов и постоянного падения напряжения вдоль каналов. С помощью различных модификаций фрактальной модели пробоя диэлектриков были описаны формирование древовидных и кустообразных структур [8,9], влияние неоднородности проницаемости [9,10], проводимости [11] и прочности [12] на развитие разряда. Однако без рассмотрения динамики движения зарядов по разрядным каналам и учета изменения проводимости каналов невозможно правильно описать связь пространственно-временных и токовых характеристик роста разрядных структур. Для преодоления данного ограничения в работах [13,14] были предложены стохастически детерминистические модели, описывающие рост разрядных каналов и движение зарядов как взаимосвязанные процессы. В настоящей работе данный подход развивается и применяется для описания разряда, вызванного объемным зарядом. Результаты моделирования роста разрядных структур сопоставляются с экспериментальными данными, полученными при изучении разряда в органическом стекле (полиметилметакрилате).

Экспериментальная методика

Формирование объемного заряда осуществлялось посредством пучка электронов, ускоренных по энергии 3 MeV с помощью генератора Ван-де-Граафа. Пучок электронов направлялся на прямоугольный образец полиметилметакрилата толщиной 12.7 mm (рис. 1, а). При такой толщине образца электроны с энергией 3 MeV создавали заряженный слой толщиной около 2 mm в середине образца. Величина и пространственное распределение заряда регулировались интенсивностью пучка и наложением масок на поверхность образца. С помощью

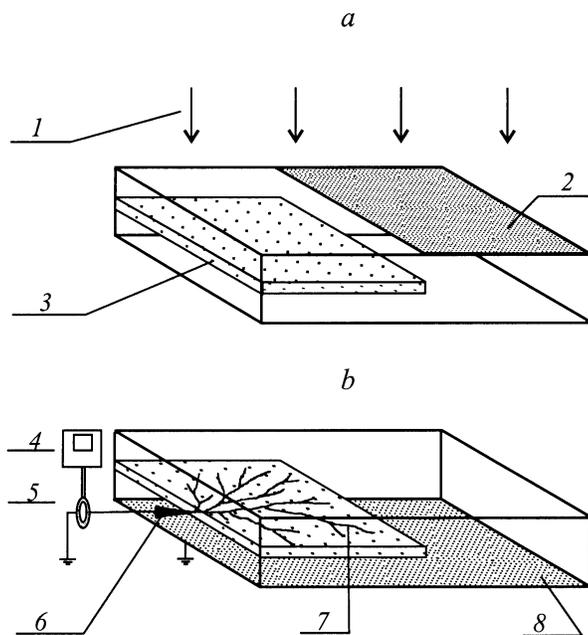


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: *a* — формирование объемного заряда в диэлектрике, *b* — инициирование разряда; 1 — пучок электронов, 2 — маска, 3 — заряженный слой, 4 — осциллограф, 5 — катушка Роговского, 6 — инициирующее разряд острие, 7 — разрядные каналы, 8 — заземленная поверхность.

пучков с током в несколько микроампер создавались объемные заряды с плотностью порядка $1 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$. Инициирование разряда осуществлялось с помощью накалывания поверхности образца заземленным острием (рис. 1, *b*). Образец при этом располагался на заземленной поверхности. Ток, проходящий через острие в процессе развития разряда, измерялся с помощью катушки Роговского и осциллографа.

Стохастически детерминистическая модель развития разряда

Модель описывает рост разрядных каналов, движение зарядов по каналам, динамику электрического поля и изменение проводимости каналов. Рост разрядных каналов происходит в результате разрушения диэлектрика и образования проводящей фазы. Количественной теории формирования проводящих каналов до сих пор не создано. Это связано как со сложным стохастическим характером роста каналов, так и с большим количеством взаимосвязанных физико-химических процессов (разогрев, растрескивание, газообразование, диссоциация, ионизация, рекомбинация и т. д.), происходящих в сильном электрическом поле и приводящих к образованию проводящей фазы в диэлектрике. Поскольку фазовый переход происходит за счет энергии электрического поля, то можно попытаться описать рост разрядной структуры,

связав вероятность формирования проводящего канала с локальной плотностью энергии электрического поля. Вид стохастической зависимости может быть установлен путем анализа физико-химических процессов в диэлектрике или на основе данных экспериментального исследования развития разряда. В настоящей модели в качестве первого приближения используется ступенчатая зависимость вероятности роста от локальной плотности энергии. Плотность вероятности ω роста разрядного канала в направлении \mathbf{n} в том или ином месте существующей разрядной структуры принимается прямо пропорциональной квадрату проекции локальной напряженности поля E_n на это направление, если величина проекции превосходит критическое значение E_c ,

$$\omega = \alpha \Theta(E_n - E_c) E_n^2, \quad (1)$$

где α — коэффициент скорости роста, E_c — критическая напряженность поля для роста разрядных каналов, $\Theta(x)$ — ступенчатая функция ($\Theta(x) = 1$ при $x > 0$ и $\Theta(x) = 0$ при $x \leq 0$).

Потенциал электрического поля рассчитывается как суперпозиция полей, создаваемых зарядами, расположенными вдоль разрядной структуры L , на поверхности S образца и в объеме V диэлектрика

$$\varphi = \int_L \frac{\lambda dl}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} + \iint_S \frac{\sigma dS}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} + \iiint_V \frac{\rho dV}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (2)$$

где ϵ и ϵ_0 — относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости; λ , σ и ρ — линейная, поверхностная и объемная плотности зарядов соответственно; r — расстояние между точкой, для которой определяется потенциал, и положением заряда.

В процессе развития разряда происходит изменение плотностей зарядов, расположенных вдоль разрядных каналов и на поверхности диэлектрика. Поверхностные заряды необходимо учитывать, поскольку при создании объемного заряда в диэлектрике ионы противоположного знака оседают на поверхности образца. Кроме того, в процессе развития разряда образец находится на заземленной поверхности. В соответствии с условиями эксперимента при моделировании начальное распределение поверхностной плотности заряда задавалось таким образом, чтобы потенциал во всех точках поверхности образца был равен нулю. Во время моделирования развития разряда изменение плотности заряда имело место только на стороне образца, соответствующей заземленной поверхности. В каждый момент времени распределение заряда на данной стороне рассчитывалось таким образом, чтобы ее потенциал был равен нулю.

Движение заряда по разрядным каналам описывается с помощью закона Ома

$$I = \gamma E_l, \quad (3)$$

где I — сила тока, γ — проводимость единицы канала (произведение удельной проводимости на площадь сечения канала), E_l — проекция напряженности поля на направление канала.

Проводимость каналов изменяется в процессе развития разряда в результате расширения каналов, ионизации, рекомбинации, прилипания электронов к стенкам каналов и молекулам газа и т.д. Эти процессы зависят от выделения энергии при прохождении по каналам электрического тока и рассеяния энергии в окружающее пространство. Поэтому в качестве первого приближения представляется разумным использовать следующее уравнение для расчета изменения проводимости во времени:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \chi\gamma E_t^2 - \xi\gamma, \quad (4)$$

где χ и ξ — параметры возрастания и убывания проводимости соответственно.

Первое слагаемое в правой части уравнения (4) связывает рост проводимости с мощностью джоулева энерговыделения в разрядном канале. Его можно рассматривать как дифференциальный аналог формулы Ромпе–Вейцеля для проводимости искрового канала [15]. Второе слагаемое описывает уменьшение проводимости каналов в результате рассеяния энергии. Проводимость вновь образовавшегося канала принимается равной γ_0 .

На основе предложенной модели был создан трехмерный численный алгоритм и программное обеспечение, позволяющее проводить компьютерное моделирование развития разряда в объемно-заряженном диэлектрике. Большинство численных моделей роста разрядных структур, например [7–13], для расчета поля и описания роста каналов используют прямоугольную решетку. При этом возможные направления роста ограничены ребрами и диагоналями решетки. В настоящей модели используется нерешеточный алгоритм, позволяющий избежать данного ограничения. Разрядная структура представляется ветвящейся цепочкой точечных зарядов, находящихся на расстоянии d друг от друга. Величина d определяет минимальный пространственный масштаб моделирования. Чем меньше величина d , тем более детально может быть описана разрядная структура. Однако уменьшение d ведет к значительному росту времени расчета. В настоящей работе моделирование проводилось при $d = 2$ мм. Электрическое поле рассчитывается с помощью зарядового метода [16], основанного на принципе суперпозиции полей, создаваемых отдельными зарядами. Для описания развития разряда в модели используются дискретные временные шаги равной величины $\Delta t = 2 \cdot 10^{-9}$ с. На каждом временном шаге последовательно выполняются следующие операции: расчет поля на основе уравнения (2) и изменение плотности поверхностных зарядов; моделирование роста разрядной структуры путем присоединения новых точек к существующей структуре или острию, с которого происходит инициирование разряда согласно распределению плотности вероятности (1); изменение распределения зарядов вдоль разрядной структуры в соответствии с законом сохранения заряда и уравнением проводимости (3); изменение проводимости каналов согласно уравнению (4). Моделиро-

вание заканчивается, когда прекращается рост разрядной структуры и проводимость каналов падает до нуля.

Таким образом, модель включает в себя пять параметров: E_c , α , χ , ξ , γ_0 , которые вместе с геометрией образца, величиной и пространственным распределением объемного заряда определяют пространственно-временные и токовые характеристики разряда. Параметры модели имеют достаточно ясный физический смысл. Критическая напряженность поля E_c связана с существованием пороговой напряженности для образования проводящего канала в диэлектрике. Увеличение E_c приводит к уменьшению ветвистости разрядной структуры. Параметр скорости роста α связывает вероятность формирования канала с локальной плотностью энергии электрического поля. Увеличение α ведет к ускорению роста разрядной структуры. Параметр возрастания проводимости χ связывает скорость нарастания проводимости с мощностью джоулева энерговыделения в канале. Параметр убывания проводимости ξ определяет скорость уменьшения проводимости (величину, обратную ξ , можно рассматривать как характерное время существования проводящего состояния в канале после прекращения энерговыделения). Увеличение χ и уменьшение ξ приводят к росту проводимости разрядных каналов и уменьшению падения напряжения вдоль каналов, которое необходимо для поддержания их в проводящем состоянии. Это сопровождается увеличением напряженности поля на концах каналов и ускорением роста разрядной структуры. Начальная проводимость γ_0 характеризует процессы, приводящие к формированию проводящего канала в диэлектрике. Уменьшение γ_0 приводит к замедлению нарастания проводимости вновь образовавшихся каналов, но практически не влияет на проводимость каналов, уже существующих достаточно длительное время. Величины параметров модели можно определить путем анализа процессов, происходящих в диэлектрике и разрядных каналах, или на основе данных экспериментального исследования развития разряда. Используемые в настоящей работе величины параметров ($\alpha = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{В}^2 \cdot \text{с}$, $E_c = 5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$, $\chi = 4 \cdot 10^{-5} \text{ С} \cdot \text{м}^2/\text{Дж}$, $\xi = 1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, $\gamma_0 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ С} \cdot \text{м}$) были определены посредством сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных при изучении разряда в полиметилметакрилате.

Результаты и обсуждение

Рост разрядной структуры начинается с образования одного или нескольких каналов с иницирующего разряд острия. Формирование каналов происходит только в заряженном слое внутри диэлектрика. Область, занимаемая разрядной структурой, соответствует по форме области объемного заряда. Если заряд был имплантирован только в половину образца, то разрядная структура растет в этой области и останавливается на ее границе (рис. 2). В случае когда заряд имплантирован в область,

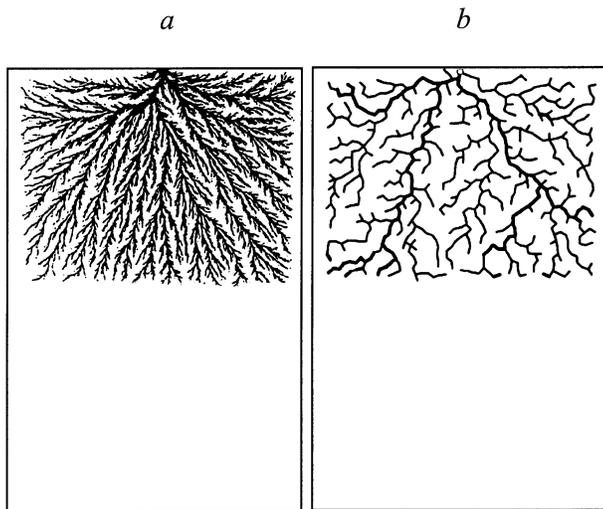


Рис. 2. Рост разрядной структуры в области объемного заряда (размер 90×135 mm, плотность заряда в верхней части образца $0.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). *a* — эксперимент, *b* — моделирование.

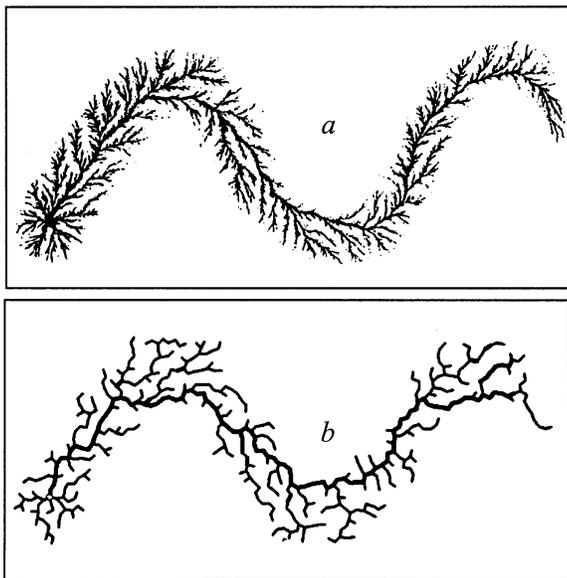


Рис. 3. Рост разрядной структуры вдоль заряженной синусоидальной полосы (размер образца 80×160 mm, плотность заряда внутри полосы $0.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). *a* — эксперимент, *b* — моделирование.

имеющую форму синусоидально изгибающейся полосы, разрядная структура растет внутри нее (рис. 3).

Скорость роста разрядной структуры и ток, проходящий через острие, зависят от величины и пространственного распределения объемного заряда в диэлектрике. Увеличение плотности заряда приводит к ускорению роста разрядной структуры и возрастанию максимальной величины тока. В случае равномерно заряженного образца сила тока убывает по мере развития разряда. На рис. 4, *a* приведены зависимости силы тока

от времени, полученные при моделировании и экспериментальном исследовании разряда в однородно заряженном образце (плотность заряда $0.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, размер 50×140 mm). Скорость роста разрядной структуры уменьшается со временем. Полученная при моделировании временная зависимость длины разрядной структуры L (расстояние от острия до максимально удаленной точки структуры) показана на рис. 4, *b* (кривая 1). Одновременно с замедлением происходит уменьшение проводимости каналов (рис. 4, *b*, кривая 2). В случае неравномерного распределения объемного заряда имеет место корреляция между характеристиками разряда и плотностью заряда в области каналов. На рис. 5, *a* приведены временные зависимости тока, полученные при изучении разряда в образце размером 50×140 mm, в котором пять поперечных полос с плотностью заряда $0.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ и размером 50×24 mm были разделены незаряженными полосами шириной 5 mm. Максимумы силы тока соответствуют прохождению каналов через заряженные полосы, а минимумы — через незаряженные. Прохождение разрядной структуры через незаряженные области сопровождается также уменьшением скорости роста и проводимости каналов (рис. 4, *b*).

Полученные результаты показывают, что рост разрядных каналов, перенос заряда по каналам и энерговыделение в каналах являются самосогласованными процессами.

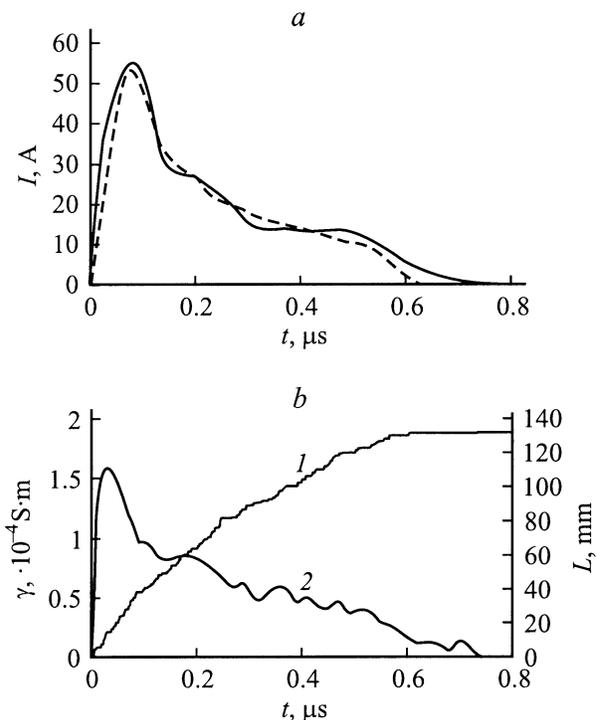


Рис. 4. Временные характеристики развития разряда в однородно заряженном образце: *a* — зависимость разрядного тока I от времени t (сплошная кривая — моделирование, штриховая — эксперимент); *b* — зависимость длины разрядной структуры (1) и максимальной проводимости каналов (2) от времени.

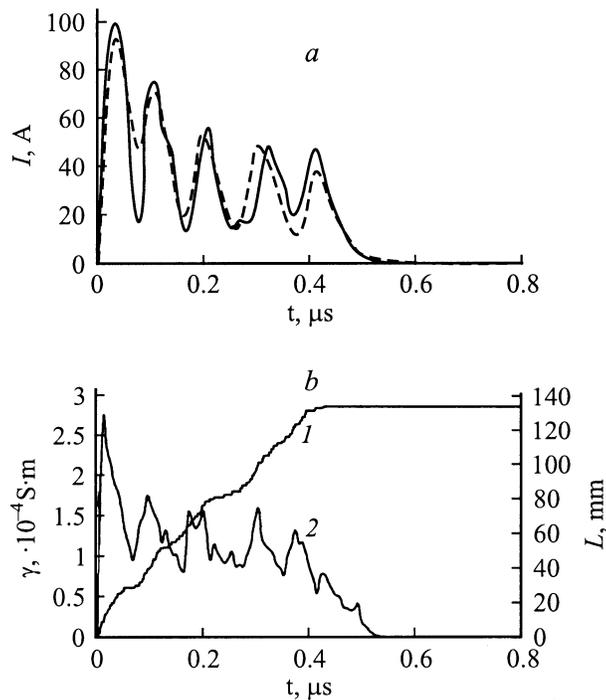


Рис. 5. То же, что на рис. 4, в неоднородно заряженном образце.

ми, приводящими к формированию разрядной структуры в объемно-заряженном диэлектрике. Условием роста каналов является достаточно высокая напряженность поля на концах каналов. Следовательно, разрядная структура должна быть хорошо проводящей, чтобы падение напряжения вдоль каналов было незначительным. Для поддержания разрядных каналов в проводящем состоянии необходимо постоянное энерговыделение в каналах. Источником энергии служит электростатическое поле, создаваемое объемным зарядом в диэлектрике. Рост разрядной структуры обеспечивает преобразование энергии поля в энергию джоулева тепловыделения. Распределение плотности энергии коррелирует с распределением плотности объемного заряда, поэтому разрядные каналы стремятся заполнить заряженную область. В случае если имеется незаряженная полоса, каналы могут ее пересечь под действием поля, создаваемого зарядами, расположенными по другую сторону полосы. Однако при этом мощность энерговыделения снижается, что приводит к уменьшению проводимости, силы тока и скорости роста каналов. Если незаряженная полоса достаточно широкая, то проводимость каналов может упасть до нуля и рост разрядной структуры прекратится. Подобный эффект наблюдался как при моделировании, так и в экспериментах.

Увеличение протяженности разрядной структуры приводит к уменьшению мощности энерговыделения, приходящейся на единицу длины канала. Поэтому рост структуры сопровождается уменьшением проводимости каналов. Это приводит к уменьшению напряженности поля на концах каналов и замедлению роста. Замедление

роста ведет к снижению мощности энерговыделения, что в свою очередь вызывает дальнейшее уменьшение проводимости каналов. В результате происходит падение проводимости до нуля и прекращение роста разрядной структуры. Плотность энергии электростатического поля возрастает с увеличением плотности объемного заряда в диэлектрике. Поэтому размер разрядной структуры должен увеличиваться с ростом плотности заряда. Данный вывод согласуется с результатами моделирования и экспериментов, полученными при изучении разряда в образцах размером $42 \times 350 \text{ mm}$ с различными величинами плотности заряда. Разрядные явления начинаются, когда плотность заряда достигает определенной критической величины ρ_0 . Последовательное увеличение плотности заряда с шагом $0.5\rho_0$ приводит к значительному увеличению размеров разрядной структуры (рис. 6). Зависимость длины структуры от плотности заряда приведена на рис. 7 (за единицу плотности заряда принято ρ_0).

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования показывает, что модель хорошо описыва-

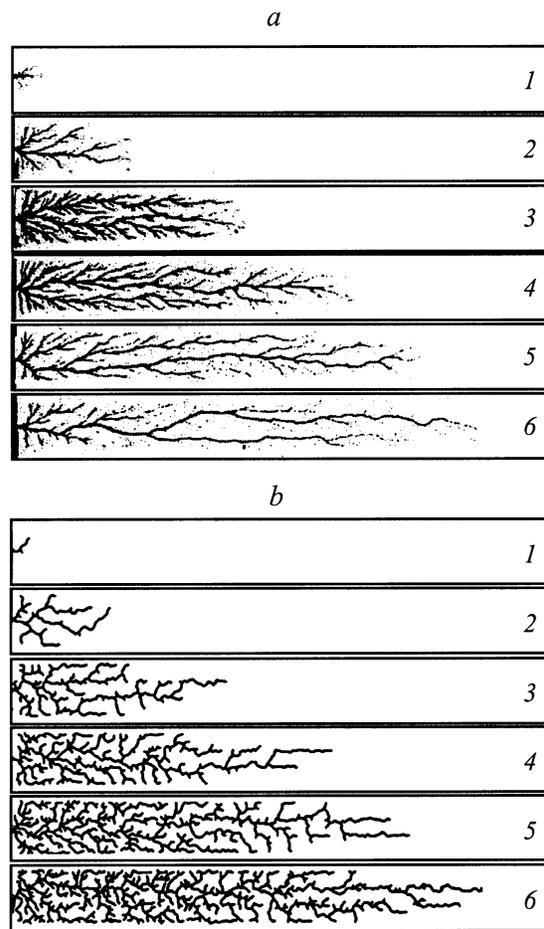


Рис. 6. Разрядные структуры в образцах с различной плотностью заряда. *a* — эксперимент; плотность заряда $\rho = n \cdot \rho_0$; *n*: 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 2.0, 4 — 2.5, 5 — 3.0, 6 — 3.5; *b* — моделирование; плотность заряда $\mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$: 1 — 0.25, 2 — 0.38, 3 — 0.51, 4 — 0.63, 5 — 0.76, 6 — 0.88.

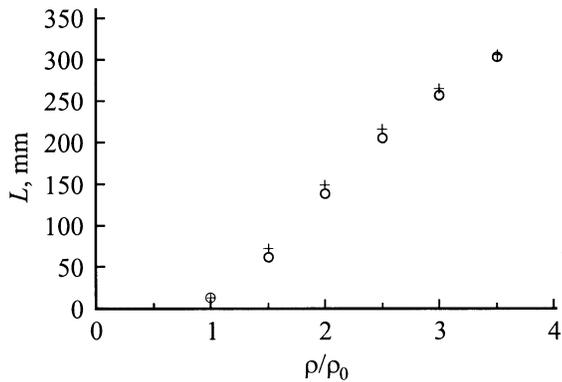


Рис. 7. Зависимость длины разрядной структуры от плотности объемного заряда (а.е.): + — эксперимент, ○ — моделирование.

ет основные особенности развития разряда, вызванного объемным зарядом в диэлектрике. Это позволяет сделать вывод, что основные положения модели отражают реальные физические процессы, определяющие развитие разряда. Предложенная модель является достаточно общей и может быть использована для описания развития при других условиях и в других материалах. Полученные результаты могут найти применение для изучения разрядных явлений в диэлектрических деталях аппаратов, подверженных воздействию пучков заряженных частиц, например ускорителей, космических аппаратов и др.

Заключение

Предложена математическая модель развития разряда, вызванного объемным зарядом в диэлектрике. Модель основана на использовании стохастического метода для описания роста разрядных каналов и детерминистических закономерностей для расчета динамики электрического поля и переноса зарядов. Трехмерная численная реализация модели позволяет проводить компьютерное исследование пространственно-временных и токовых характеристик развития разряда. Количественное соответствие результатов моделирования с данными экспериментального исследования развития разряда в образцах полиметилметакрилата, заряженных с помощью электронного пучка, говорит об адекватности модели. Полученные результаты показывают, что рост проводящих каналов, перенос заряда и энерговыделение являются самоогласованными процессами, определяющими характер развития разряда в объемно-заряженном диэлектрике.

Работа была поддержана Немецким научно-исследовательским обществом (DFG) и Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ).

Список литературы

- [1] Gross B., Wright K.A. // Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 725–733.
- [2] Lackner H., Kohlberg I., Nablo S.V. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. N 6. P. 2064–2065.
- [3] Furuta J., Hiraoka E., Okamoto. // J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. N 4. P. 1873–1878.
- [4] Gross B., Nablo S.V. // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. N 5. P. 2272–2275.
- [5] Cooke C.M., Williams E.R., Wright K.A. // IEEE Intern. Symp. on Electrical Insulation. Philadelphia (USA), 1982. P. 95–101.
- [6] Cooke C.M., Williams E.R., Wright K.A. // Proc. Intern. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xian (China), 1985. Vol. 2. P. 1–6.
- [7] Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 1033–1036.
- [8] Wiesmann H.J., Zeller H.R. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. P. 1770–1773.
- [9] Кухма В.Р., Лонатин В.В., Носков М.Д. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 63–75.
- [10] Гефле О.С., Демин А.В., Кухма В.Р. и др. // Электричество. 1994. № 7. С. 61–63.
- [11] Карпов Д.И., Лонатин В.В., Носков М.Д. // Электричество. 1995. № 7. С. 59–61.
- [12] Sweeney P.J.J., Dissado L.A., Cooper J.M. // J. Phys. D. 1992. Vol. 25. P. 113–119.
- [13] Lopatin V., Noskov M.D., Badent R. et al. // IEEE Trans. Dielect. El. 1998. Vol. 5. N 2. P. 250–255.
- [14] Носков М.Д., Малиновский А.С. // Сб. докл. VI Междунар. конф. "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей". Санкт-Петербург, 2000. С. 159–162.
- [15] Rompe R., Weizel W. // Zs. Physik. 1944. Vol. B. 122. P. 9–12.
- [16] Singer H., Steinbigler H., Weiss P. // IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. 1974. Vol. 93. P. 1660–1668.