

Электрический пробой твердых диэлектриков

© Г.А. Воробьев, С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия

E-mail: gemma@main.tusur.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 12 октября 2004 г.)

Изложены представления о механизме электрического пробоя твердых диэлектриков (ЭПТД), сформированные авторами в течение многолетних исследований. Показано, что при ЭПТД протекает ряд взаимообусловленных предпробивных процессов: высоковольтная поляризация, дефектообразование, ударное возбуждение и ударная ионизация электронами центров свечения и ионов основной кристаллической решетки и др. Спусковым механизмом ЭПТД являются процессы электро- и термополевой генерации дефектов в кристалле, которые ведут к образованию дефектных областей и созданию каналов облегченного переноса носителей заряда. Электронные токи (а также ускорение электронов электрическим полем до энергий, достаточных для ударной ионизации) протекают именно в этих областях кристалла с деформированной дефектами кристаллической решеткой. Поэтому известные подходы к построению теории пробоя ЩГК и других твердых кристаллических диэлектриков, базирующиеся на анализе движения и ускорения электронов в идеальной кристаллической структуре твердого тела, представляются некорректными.

1. Введение

Различают три вида пробоя твердых диэлектриков: тепловой, электрический и электрохимический. Если процессы при тепловом и электрохимическом пробоях в значительной степени поняты, то относительно электрического пробоя твердых диэлектриков (ЭПТД) этого сказать нельзя. Кратко перечислим основные этапы истории изучения механизма ЭПТД. В [1–3] рассмотрены некоторые вопросы развития учения об ЭПТД. В известной работе Сканави [2] выделены три первые хорошо обоснованные классические теории ЭПТД: теория Роговского (разрыв ионного кристалла силами электрического поля), теория Иоффе (теория ударной ионизации ионами), теория Смурова (пробой вследствие отрыва электронов от атомов). Однако эти теории давали сильно завышенные величины электрической прочности и поэтому не соответствовали действительности. Важное значение для дальнейшего развития представлений о механизме ЭПТД имела теория Иоффе, поскольку из теории ударной ионизации следует наличие электрического упрочнения, т.е. возрастание электрической прочности с уменьшением межэлектродного расстояния. Этот эффект подтверждается в случае пробоя газов. Вначале появились экспериментальные работы, из результатов которых, казалось бы, можно было сделать вывод об электрическом упрочнении тонких слоев твердых диэлектриков. Но позднее в работах Александрова и др. [4,5], где правильно измерялась толщина пробиваемого слоя, этот вывод не был подтвержден. Возможно, как указано в [5], развитие пробоя происходило в слабых местах образцов, что не позволяло обнаружить электрическое упрочнение. Механизм ЭПТД вследствие ударной ионизации электронами оставался более привлекательным, чем ударная ионизация ионами, так как при напряженности поля $10^6 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ длина свободного пробега иона должна быть более 100 постоянных ре-

шетки, что невозможно. Кроме того, появились экспериментальные результаты, подтверждающие электронную гипотезу механизма пробоя. Вальтер и Инге [6,7] обнаружили в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) каналы неполных пробоев и малую длительность пробоя (10^{-7} s), что указывало на электронный характер ЭПТД. Хиппель [8–10] получил также ряд экспериментальных данных (неустойчивость тока перед пробоем; вводимые в ЩГК ионы меди остаются на своих местах; развитие разряда с анода и др.). Франц [1] считал, что Хиппель доказал обусловленность ЭПТД ударной ионизацией электронами. Однако прямые доказательства этого отсутствовали.

2. Зависимость ЭПТД от материала катода. Электрическое упрочнение

В [11] было найдено, что электрическая прочность (E_{br}) каменной соли, эбонита при постоянном и импульсном напряжениях не зависит от материалов металлических электронов (свинца, калия, серебра), а также от наличия электронных и ионных поверхностных зарядов. Хиппель и Альгер [12] обнаружили, что E_{br} кристалла КВг с золотыми электродами на 60% ниже, чем для кристалла с электролитовыми, причем E_{br} выше при электролитовом катоде. В дальнейшем было показано, что при использовании таких материалов электродов, как металлы и графит, E_{br} получалась ниже, чем в случае электролитовых. Эти результаты оказались очень важными в развитии учения об ЭПТД, поскольку позволили в дальнейшем открыть новые его закономерности.

Опыты Александрова [4,5] навели нас на мысль, что для исследования пробоя следует брать не тонкие пленки, а слои, находящиеся внутри монокристалла. При этом в пластинках кристалла просверливаются соосные лунки механическим способом (на небольшую глубину), потом производится углубление лунок водным

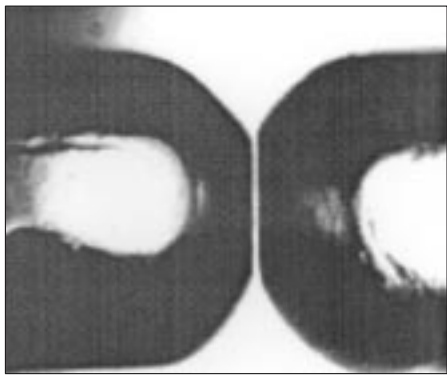


Рис. 1. Микрофотография слоя ЦГК. Между лунками в монокристалле видна тонкая прослойка диэлектрика толщиной $\sim 5 \mu\text{m}$.

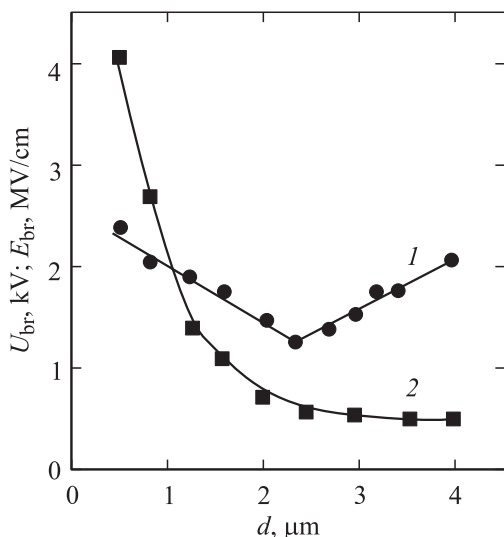


Рис. 2. Зависимости пробивного напряжения U_{br} (1) и электрической прочности E_{br} (2) от толщины слоя d кристалла NaCl.

раствором соответствующей соли до требуемой толщины диэлектрического слоя (рис. 1). В более поздних работах утончение слоя производилось на основе водных растворов этилового спирта [13], что позволило получать диэлектрические слои с более ровной поверхностью. В полученные лунки можно засыпать графит, наливать электролит или напылять металлические электроды. В работе [14] E_{br} таких образцов кристалла NaCl с электролитовыми электродами при толщине $0.3 \mu\text{m}$ (предел разрешения оптического микроскопа) составляла $\sim 10^{10} \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ при вероятности пробоя $\psi = 90\%$, что значительно превышает электрическую прочность более толстых слоев ($d \sim 0.1\text{--}0.15 \text{mm}$) (рис. 2).

Таким образом было доказано наличие электрического упрочнения при электрической форме пробоя. Кроме того, как видно из рис. 2, зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика $U_{br} = f(d)$ напоминает кривую Пашена при пробое газов.

3. Область сверхсильных электрических полей

Отметим одно из следствий эффекта электрического упрочнения диэлектриков с уменьшением их толщины. В тонких слоях диэлектрика при напряженностях электрического поля, превышающих пробивные для толстых слоев, могут наблюдаться явления, которые в более толстых слоях не удастся выявить из-за их разрушения вследствие наступающего пробоя. Дальнейшие исследования показали, что в микронных слоях ЦГК действительно удастся наблюдать новые явления: возникновение дополнительных дислокаций, токи ударной ионизации, электролюминесценцию (собственное и активаторное свечение). Эти и другие явления, которые могут быть открыты при исследовании тонких слоев твердых диэлектриков в дальнейшем, составляют новую область физики диэлектриков — область сверхсильных электрических полей. По этому важному вопросу нами недавно опубликована обзорная статья [15], и подробно на нем останавливаться не будем. Отметим только, что при исследовании активаторной электролюминесценции ЦГК установлен ударный механизм возбуждения активатора, имеющего в спектре свечения кванты с энергией, большей 6eV . С увеличением концентрации активатора интенсивность активаторного свечения сначала растет, а затем падает. Падение интенсивности свечения можно объяснить тем, что с ростом концентрации активатора частота рассеивающих столкновений электронов с ионами активатора растет. Это ведет к увеличению длины пробега электронов, на которой они набирают энергию, необходимую для ударного возбуждения активатора. Кроме того, при напылении на анодную поверхность слоя полупрозрачной металлической пленки наблюдается эмиссия горячих электронов через анод в вакуум в сверхсильных электрических полях. Эти наблюдения доказывают, что ударная ионизация и ударное возбуждение электронами ионов основной кристаллической решетки и примесей играют определяющую роль в предпробивных процессах и пробое. Однако следует отметить, что заметная эмиссия горячих электронов в вакуум имеет место только в том случае, когда в кристаллической структуре диэлектрика появляются изменения, разрастающиеся по мере подачи последующих импульсов напряжения. Подобные изменения в кристаллической структуре диэлектрика наблюдались и при возникновении электролюминесценции ЦГК. Эти экспериментальные данные свидетельствуют о наличии интенсивных деградационных процессов в указанных условиях. Очевидно, что ускорение электронов в областях с нарушенной кристаллической решеткой будет происходить иначе, чем в неповрежденном кристалле. Поэтому необходимо провести исследования дефектообразования, возникающего в предпробивных полях в ЦГК, и влияния его на электропроводность и элементарные электронно-оптические процессы.

4. Дефектообразование и перенос заряда в микронных слоях ЦГК

В [16] нами обнаружено, что в сильном (предпробном) однородном электрическом поле в микронных слоях ЦГК наблюдается генерация дислокаций еще до наступления пробоя. Дальнейшие исследования [17] показали, что увеличение числа дислокаций зависит от напряженности и времени воздействия электрического поля. Воздействие электрического поля на дислокационную структуру кристалла носит пороговый характер, причем чем меньше время воздействия, тем при большей напряженности поля начинается генерация новых дислокаций. Приложение электрического поля одной напряженности (поочередно прямой и обратной полярности) замедляет генерацию дислокаций; с понижением температуры начало интенсивной генерации дислокаций смещается в область более сильных полей. Новые дислокационные ямки травления появляются преимущественно в тех местах, где до воздействия поля уже имелись выходы дислокаций на поверхность кристалла. Таким образом, электрополевая генерация дислокаций обусловлена размножением дислокаций, имеющих в кристалле еще до воздействия поля.

В [18] показано, что место возникновения новых дислокаций в сильном электрическом поле является катодная поверхность диэлектрика. Неравномерность распределения дислокаций по толщине кристаллического слоя и отсутствие ярко выраженных полос скольжения после воздействия поля свидетельствуют о том, что большую роль в процессе генерации дислокаций играет электростатическое воздействие поля непосредственно на заряженные ступени дислокаций и на систему точечных дефектов. Последние, перераспределяясь в слое, разупрочняют прикатодную область. Несимметричность картин травления катодной и анодной поверхностей свидетельствует о том, что подавляющее большинство образующихся дислокаций представляет собой полупетли, выходящие на катодную поверхность. В качестве механизма размножения в данном случае может выступать процесс двойного поперечного скольжения винтовых участков дислокаций, приводящий к формированию новых дислокационных петель.

Оптические исследования спектров фундаментального поглощения тонких слоев ЦГК до и после воздействия электрического поля [19] показали, что воздействие сильного поля приводит к уменьшению эффективной ширины запрещенной энергетической зоны кристалла. Это выражается в смещении края фундаментального поглощения в сторону меньших энергий. Наиболее вероятной причиной дополнительного поглощения, вызываемого такой сдвиг, являются оптическая генерация экситонов и поглощение света точечными дефектами в окрестности линий дислокаций, созданных сильным электрическим полем.

5. Дефектообразование и пробой микронных слоев ЦГК

В области сверхсильных электрических полей в образцах ЦГК перед пробоем сначала происходит процесс генерации дислокаций (одна из составляющих темновой паузы), а затем возникает электролюминесценция. Как известно [20], вдоль дислокационных линий перенос зарядов облегчен. Подвижность вакансий в таких каналах значительно выше, чем в остальной части кристалла. Вследствие оттока катионных вакансий к аноду (в таких областях) локальная напряженность поля вблизи микроострия на катодной поверхности будет усиливаться и стимулировать инжекцию электронов в область каналирования.

При визуальном наблюдении дислокационных картин травления после воздействия на слой импульса электрического поля сверхсильной напряженности $E > (2.5-3) \cdot 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, при котором начинал протекать электронный ток и возникла электролюминесценция, на поверхности слоя были обнаружены области (пятна) с повышенной плотностью и большими размерами ямок травления (рис. 3). Подача еще нескольких импульсов электрического поля той же напряженности приводило к увеличению таких областей, этот процесс можно продолжать до тех пор, пока области с повышенной плотностью ямок травления не распространятся на площадь всего слоя.

Визуальные наблюдения мест свечения и картин травления показали, что в областях с повышенной после эксперимента плотностью ямок травления протекали локальные токи. Расчеты показывают [21], что локальные токи должны вызывать тепловое воздействие и механические напряжения в окрестности проводящих каналов, которые вследствие термоударного механизма

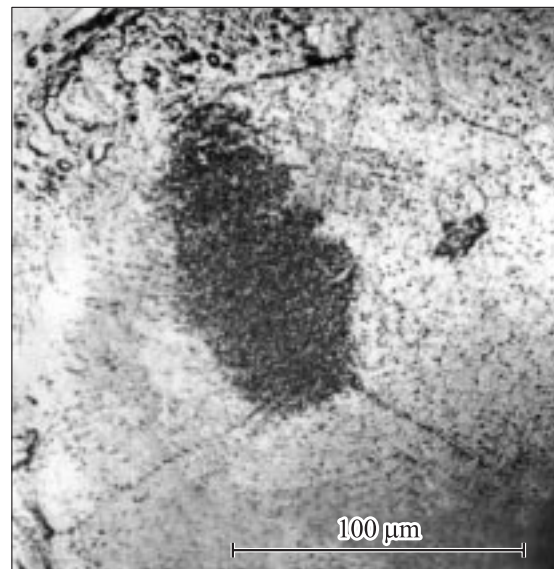


Рис. 3. Дислокационная картина поверхности слоя после возникновения свечения. Длина пятна $\sim 100 \mu\text{m}$.



Рис. 4. Микронарушения на анодной поверхности слоя кристалла NaCl в окрестности канала переноса заряда.

дефектообразования должны вести к увеличению диаметра каналов с повышенной электропроводностью.

Электронно-микроскопические исследования мест локального переноса зарядов в NaCl показали [21,22], что в них действительно реализовались термопластические явления, вызывающие не только разрыхление вещества в каналах переноса заряда, но и его вынос на поверхность (рис. 4). Сечение таких каналов с модифицированной кристаллической структурой оказывается на несколько порядков больше первоначального. Использование в экспериментах электролитовых электродов ограничивает скорость нарастания и величину сквозных токов в этих каналах диэлектрика и позволяет осуществить временное сопряжение электронного и дырочного токов [21]. В результате в областях ЩГК с модифицированной структурой возникает электролюминесценция, обусловленная ударным возбуждением центров свечения горячими электронами. Процесс электролюминесценции сопровождается ударной ионизацией и характеризуется квазистационарным распределением потенциала по толщине слоя, постоянством амплитуды тока и свечения [21]. При изменении напряжения в некоторых пределах это состояние сохраняется. При комнатной температуре на постоянном напряжении и при малых перенапряжениях электролюминесценция длится несколько десятков миллисекунд, при температуре -30°C — несколько секунд. На переменном напряжении и при низкой температуре электролюминесценция может продолжаться часами.

Следует отметить, что электролюминесценция ЩГК с металлическими электродами не наблюдается, так как стадия потери электрической прочности при развитии электрического пробоя сразу переходит в стадию разрушения диэлектрика. При электролитовых электродах может наблюдаться длительный электрический разряд, сопровождаемый электролюминесценцией. В этом случае наблюдается сходство с электрическим разрядом в газах. Высокоомные электролитовые электроды играют роль стабилизирующего фактора в развитии пробоя из-

за перераспределения напряжения в локальных участках слоя при увеличении протекающего через них тока.

6. Заключение

Установлено, что движение заряженных дефектов и дефектообразование предваряют и стимулируют все основные предпробивные процессы в микронных слоях ЩГК. Электрический пробой обусловлен ударной ионизацией электронами. Однако электронные токи, сопровождаемые ударной ионизацией, протекают в локальных участках слоя диэлектрика, в которых под действием электрического поля произошла генерация линейных и точечных дефектов. Локальное протекание электронного тока в свою очередь вызывает еще более интенсивную локальную генерацию дефектов вследствие термопластических явлений, что стимулирует дальнейшее развитие пробоя.

Таким образом, в микронных слоях ЩГК наблюдается электрический пробой, обусловленный ударной ионизацией электронами. Но электрический пробой имеет ряд особенностей.

1) Разряд развивается в каналах с рыхлой кристаллической структурой, обусловленной полевой генерацией линейных и точечных дефектов.

2) Процесс разряда для случая образцов с электролитовыми электродами может носить длительный характер (нет стадии катастрофического разрушения диэлектрика), что делает развитие электрического пробоя в ЩГК сходным с газовым разрядом.

Мы полагаем, что в толстых слоях ЩГК и других диэлектриков при использовании металлических электродов все выявленные при изучении тонких слоев ЩГК процессы протекают одновременно, стимулируя друг друга, что приводит на завершающей стадии ЭПТД к разрушению диэлектрика.

Очевидно, что энергетический спектр электронно-дырочных состояний каналов, по которым протекает электронный ток, сопровождаемый ударной ионизацией, вследствие очень большой и нарастающей с увеличением напряженности поля концентрации линейных и точечных дефектов будет существенно отличаться от энергетического спектра кристалла до воздействия электрического поля. Поэтому известные подходы к построению теории ЭПТД, базирующиеся на анализе движения и ускорения электронов в идеальной кристаллической структуре твердого тела, не могут дать удовлетворительных результатов.

Список литературы

- [1] В. Франц. Пробой диэлектриков. ИЛ, М. (1961). 207 с.
- [2] ГИ. Сканави. Физика диэлектриков (область сильных полей). ГИФМЛ, М. (1958). 907 с.

- [3] А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. Высш. шк., М. (1966). 224 с.
- [4] А.П. Александров, А.Ф. Иоффе. ЖТФ **3**, 1, 32 (1933).
- [5] А.П. Александров, А.М. Золотарева. ЖТФ **4**, 429 (1934).
- [6] А.Ф. Вальтер, Л.Д. Инге. Электричество **6**, 83 (1930).
- [7] L.D. Inge, A.F. Valter. Z. Phys. **64**, 830 (1930).
- [8] A. Hippel. Z. Phys. **67**, 707 (1931).
- [9] A. Hippel. Z. Phys. **68**, 309 (1931).
- [10] A. Hippel. Naturwissenschaft **14**, 79 (1935).
- [11] А.А. Воробьев, А.К. Красин. ЖТФ **7**, 15 (1937).
- [12] A. Hippel, R.S. Alger. Phys. Rev. **76**, 127 (1949).
- [13] Г.А. Воробьев, И.С. Пикалова. ПТЭ **1**, 198 (1967).
- [14] И.С. Пикалова. Автореф. канд. дис. ТГУ, Томск (1968).
- [15] Г.А. Воробьев, С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов. Изв. вузов. Физика **8**, 26 (2000).
- [16] Г.А. Воробьев, С.Г. Еханин, М.М. Милюшина, Н.С. Несмелов. ФТТ **15**, 2545 (1973).
- [17] Н.И. Лебедев, Н.С. Несмелов. ФТТ **14**, 1282 (1972).
- [18] С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов, Е.В. Нефедцев. Кристаллография **35**, 1, 237 (1990).
- [19] С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов, Е.В. Нефедцев. Изв. вузов. Физика **3**, 105 (1990).
- [20] А.А. Воробьев. Заряженные точечные и линейные дефекты в ионных кристаллах и их перемещения во внешних полях. Томск (1981). Т. 2. 239 с. Деп. в ВИНТИ, рег. № 1802-81.
- [21] С.Г. Еханин. Автореф. докт. дис. ГПУ, Томск (2002).
- [22] С.Г. Еханин, Н.С. Несмелов, Е.В. Нефедцев. ФТТ **32**, 2, 409 (1990).