

04;05

## О механизме стримерной стадии пробоя кристаллических диэлектриков

© В.Д. Куликов

Томский политехнический университет

Поступило в Редакцию 16 июля 1999 г.

Предложена модель начальных стадий электрического пробоя кристаллов, основанная на механизмах электронных переходов в валентной зоне диэлектрика.

Основные фазы пробоя: потеря электрической прочности диэлектрика и разрушение материала исследовались достаточно подробно (см., например, [1,2]). Однако до настоящего времени начальные стадии пробоя твердых диэлектриков: образование стримерных разрядов (каналов свечения с повышенной проводимостью), неполный пробой — остаются недостаточно изученными. Не удается, в частности, выделить свечение стримерного разряда на фоне свечения плазмы в канале пробоя [3]. Не вполне понятна кристаллографическая ориентация пробоев ионных кристаллов [4–6].

Целью данной работы являлась попытка построения модели начальных стадий пробоя.

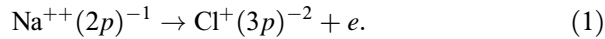
К основным закономерностям неполного пробоя щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) в импульсных и постоянных электрических полях можно отнести следующие [1–9]. 1. Пробой для рассмотренных кристаллов идет с положительно заряженного электрода (анодный пробой). 2. Для кристаллов LiF, NaCl пробой ориентирован в направлении  $\langle 110 \rangle$ , для KCl, KBr, RbCl — в направлении  $\langle 100 \rangle$ . 3. Значения средних в объеме пороговых напряженностей поля неполного пробоя уменьшаются в ряду LiF, NaCl, KCl, KBr, RbCl и составляют  $\sim 10^5 - 10^6$  V/cm. Скорость движения канала пробоя достигает значений  $\sim 10^7 - 10^8$  cm/s.

В качестве модели начальных стадий пробоя можно предложить механизм образования в кристалле канала электронных возбуждений (стримера), основанный на строении зонной структуры диэлектрика и электронных Оже-переходах. Основанием для такого подхода может слу-

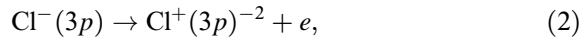
жить наблюдаемая корреляция между данными по ориентации пробоев в кристаллах LiF, NaCl (направление  $\langle 110 \rangle$ ), KCl, KBr ( $\langle 100 \rangle$ ) и строением зонной структуры этих кристаллов.

Так, для LiF, NaCl  $2p$ -уровни энергии катионов в валентной зоне кристалла лежат значительно ниже  $3p$ -уровней анионов (на  $\sim 40$  eV для LiF и  $\sim 25$  eV для NaCl). На рисунке показано положение одноэлектронных уровней энергии для кристаллов NaCl, KCl, KBr [10]. Для KCl  $3p$ -уровень катиона находится на  $\sim 10$  eV ниже  $3p$ -уровня иона  $\text{Cl}^-$  (см. рисунок, *c*). В кристалле KBr  $3p$ -уровень иона  $\text{K}^+$  расположен по энергии на  $\sim 1.5$ – $2$  eV ниже  $4p$ -уровня иона  $\text{Br}^-$  (см. рисунок, *e*).

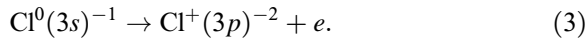
Внешнее поле создает в диэлектрике наклон зон с максимальным значением вблизи неоднородности электрода. Начало движения стримера можно рассматривать с наличия двух дырок на  $3p$ -уровне иона  $\text{Cl}^+$  (см. рисунок, *b*). Образование этих дырок возможно, например, в результате межатомного Оже-распада  $\text{Na}^{++}$   $2p$ -дырки по схеме [11,12]



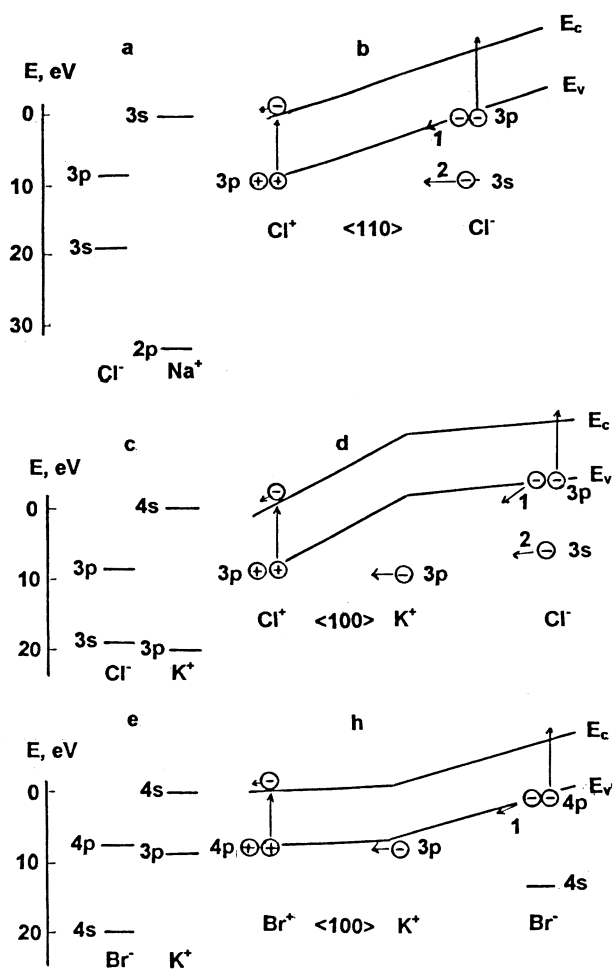
Дальнейшее движение стримера связано с релаксацией этих дырок и генерацией электронов в зону проводимости. Для случая кристаллов LiF, NaCl распад дырок не может идти с низколежащих  $2p$ -уровней катиона. Наиболее вероятно, что релаксация дырки идет с соседнего аниона  $\text{Cl}^-$ , расположенного в направлении  $\langle 110 \rangle$ , и, возможно, по двум путям: либо межатомным Оже-переходом с переносом заряда с  $3p$ -уровня  $\text{Cl}^-$  (переход 1) с последующей генерацией Оже-электрона в зону проводимости по схеме



либо резонансным переходом электрона с  $3s$ -уровня  $\text{Cl}^-$  на  $3p$ -уровень  $\text{Cl}^+$  (переход 2) и затем с внутриатомным Оже-распадом  $3s$ -дырки  $\text{Cl}^0$  по схеме



Представляет интерес оценка значения необходимой напряженности поля для реализации переходов 1, 2. Вероятность перехода 1 становится отличной от нуля при условии, что минимальный зазор энергии между  $3p$ -уровнями соседних ионов хлора (см. рисунок, *b*) составляет  $\sim 10$  eV. Эта энергия требуется для перевода Оже-электрона в зону проводимости. Для реализации резонансного перехода электрона с  $3s$ -уровня



Уровни энергии ионов в кристаллических NaCl, KCl, KBr (*a, c, e*) и зонная структура кристаллов при наличии сильного электрического поля (*b, d, h*).  $E_c, E_v$  — уровни энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно; 1, 2 — возможные переходы электронов; *a, b* — NaCl, *c, d* — KCl, *e, h* — KBr.

$\text{Cl}^-$  на  $3p$ -уровень  $\text{Cl}^+$  необходимо поднять  $3s$ -уровень на  $\sim 12 \text{ eV}$  [10]. При среднем расстоянии между соседними атомами в решетке  $\sim 3 \text{ \AA}$  (расстояние между  $\text{Cl}^-$ – $\text{Cl}^- \sim 4 \text{ \AA}$ ) внешняя напряженность поля должна составлять  $\sim 2.5 \cdot 10^8$ – $3 \cdot 10^8 \text{ V/cm}$ . Такие напряженности (превышающие на 2–3 порядка пробивные) могут реализоваться только вблизи неоднородности электрода или на конце проводящего канала. Так, в вакуумном диоде взрывная эмиссия электронов на микронеоднородностях электрода идет при средних полях  $10^6 \text{ V/cm}$ , при этом считается, что для реализации эффекта необходимы поля  $\sim 10^8 \text{ V/cm}$  [13].

Видимо, определяющим фактором увеличения напряженности поля на неоднородностях электрода является отсутствие шунтирующего действия поверхностных токов [9]. Эффект запаздывания поверхностных токов достигается при большом значении скорости нарастания поля ( $\sim 10^{12} \text{ V/cm} \cdot \text{s}$ ).

Следует также учесть, что две дырки на ионе хлора образуют эффективный заряд  $\text{Cl}^+$ . Заряд  $e^+$  на межатомном расстоянии 3–4  $\text{ \AA}$  дает напряженность поля  $\sim 3 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$ , а на 1  $\text{ \AA}$   $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ V/cm}$ , что должно создавать дополнительные электрические поля.

Отметим, что для реализации предлагаемой модели необходимы большие электрические поля  $\sim 10^8 \text{ V/cm}$ . Возможно, что в случае повышения по энергетической шкале уровней энергии заполненных  $p$ -орбиталей аниона в поле соседней дырки требуются менее высокие значения напряженности поля. Это связано, видимо, с тем, что из трех орбиталей  $p$ -оболочки в переносе заряда участвует только орбиталь, ориентированная в направлении дырки. Эффективное расстояние, на котором поле дырки действует на электрон данной орбитали, меньше межатомного, и в результате обеспечивается необходимое (10–20 eV) повышение значения энергии орбитали.

В кристаллах  $\text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$  релаксация дырки на ионах  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Br}^+$  идет, вероятно, через  $3p$ -уровни катиона. Для резонансного переноса электрона необходимо поднять  $3p$ -уровень  $\text{K}^+$  в  $\text{KCl}$  на  $\sim 12 \text{ eV}$  и в  $\text{KBr}$  на  $\sim 2$ – $3 \text{ eV}$  (см. рисунок, *e*). Последующая релаксация дырки на  $\text{K}^{++}$  в кристалле  $\text{KCl}$ , возможно, идет двумя путями (аналогично рассмотренным выше в  $\text{NaCl}$ ): либо межатомным Оже-распадом с  $3p$ -уровня  $\text{Cl}^-$  (переход 1), либо резонансным переносом заряда с  $3s$ -уровня  $\text{Cl}^-$ , и затем внутриатомным Оже-распадом  $3s$ -дырки (переход 2, см. рисунок, *d*). Для кристалла  $\text{KBr}$   $3p$ -дырка иона  $\text{K}^{++}$  релаксирует Оже-распадом с иона  $\text{Br}^-$ .

Для кристаллов KCl, KBr в этом случае направление движения стримера соответствует кристаллографической ориентации  $\langle 100 \rangle$ .

Из данной модели следует, что релаксация дырки может идти только в направлении отрицательного электрода. Это удовлетворительно подтверждает анодный характер пробоя.

В ШГК канал стримера создает на своем пути свободные электроны и дырки. Время жизни электронов мало  $\sim 10^{-10} - 10^{-11}$  с. Однако при рекомбинации электрона с дыркой образуется экситон с уровнями энергии в запрещенной зоне и временем жизни  $\sim 10^{-8}$  с. Электрон, захваченный на экситонные состояния, легко переводится в зону проводимости диэлектрика, что поддерживает высокий уровень электронной концентрации вдоль канала стримера. Однако при наличии полей  $\sim 10^6 - 10^7$  В/см основная часть носителей, видимо, сразу ускоряется до энергий межзонной ионизации. Подтверждением этому может служить факт слабой интенсивности экситонного свечения на фоне свечения плазмы разряда.

Таким образом, предложенная модель начальных стадий неполного пробоя, основанная на электронных переходах в валентной зоне кристалла, удовлетворительно объясняет имеющиеся экспериментальные факты: электродную и кристаллографическую направленность пробоев. Высокая скорость нарастания поля ( $\sim 10^{12}$  В/см  $\cdot$  с) исключает шунтирующее действие поверхностных токов, вследствие чего значение напряженности поля на проводящих неоднородностях может достигать необходимого уровня ( $\sim 10^8$  В/см).

## Список литературы

- [1] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (Область сильных полей). М.: Физматгиз, 1958.
- [2] *Воробьев А.А., Воробьев Г.А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высш. школа, 1966.
- [3] *Лисицын В.М., Олейко В.И.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 1. С. 15–18.
- [4] *Gaspari M.E.* // Phys. Rev. 1955. V. 98. N 9. P. 1679–1691.
- [5] *Чернозатонский Л.А.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 38. В. 5. С. 225–228.
- [6] *Зубрицкий В.В.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 10. С. 82–85.
- [7] *Миронов А.Л., Зубарев И.А., Шпак В.Г., Быков В.В.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 11. С. 203–206.

- [8] *Вершинин Ю.Н., Водичев А.В., Петруховский С.И.* // Докл. АН СССР. 1998. Т. 309. № 2. С. 346–350.
- [9] *Куликов В.Д., Лисицын В.М.* // Деп. в ВИНТИ 11.10.85, № 7202–В.
- [10] *Слэтер Дж.* Методы самосогласованного поля для молекул и твердых тел. М.: Мир, 1978. 347 с.
- [11] *Парилис Э.С.* Эффект Оже. Ташкент: Фан, 1969.
- [12] *Kikas A., Elango M.* // Phys. stat. sol. (b). 1985. Т. 130. N 1. P. 211.
- [13] *Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М.* Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 110 с.