

03,04

## Исследование пробоя в алюмоиттриевом гранате при субнаносекундных временах нарастания напряжения

© И.Ф. Пунанов<sup>1</sup>, Р.В. Емлин<sup>1</sup>, А.С. Гилёв<sup>1</sup>, С.О. Чолах<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт электрофизики УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия<sup>2</sup> Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: lfd@ier.uran.ru

(Поступила в Редакцию 21 сентября 2010 г.)

В алюмоиттриевом гранате при многоимпульсном наносекундном пробое с анода при напряжениях 100–140 кВ получены кристаллографически ориентированные каналы с перетяжками в областях отражения импульсов и измерена скорость распространения фронтов фазового перехода в данном интервале напряжений.

Показано, что характер наблюдаемой картины последовательного образования отдельных звеньев полной пробойной структуры свидетельствует о том, что формообразование канала происходит только локально и непосредственно в момент прохождения фронта пробоя, поскольку именно в окрестности фронта пробоя создается максимальная напряженность поля, величина которой и определяет диаметр канала пробоя.

### 1. Введение

Явление образования в монокристаллах диэлектриков каналов пробоя, ориентация которых кристаллографически обусловлена, давно привлекает внимание исследователей [1–3]. Несмотря на большое число опубликованных работ, это явление остается одной из нерешенных проблем физики пробоя как в диэлектриках, так и в полупроводниках [4] и требует более широких исследований, поскольку до сих пор отсутствует понимание взаимосвязи между скоростью распространения фронта фазового перехода при пробое с основными параметрами электронной структуры твердого диэлектрика.

Основная часть количественных данных по кристаллографически ориентированному пробоем была получена в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) [5]. В большинстве экспериментальных работ по пробоем создаваемые условия пробоя являются лишь слегка надпороговыми [6], т. е. напряжение, приложенное к образцу, создает вблизи иницилирующего электрода электрическое поле, напряженность которого относительно немного превышает пробойную, определяемую для микросекундного интервала длительностей в режиме медленно растущего напряжения как в случае однородного, так и резко неоднородного поля. Это приводит к тому, что получаемые результаты о скоростях распространения фронта фазового перехода твердое тело–плазма пробоя относятся к нижней границе динамических и энергетических параметров, характеризующих свойства вещества в процессе пробоя. Такой подход связан главным образом с трудностями получения высоковольтных импульсов напряжения в диапазоне 100–200 кВ с достаточно короткими фронтами (0.3–1.0 ns), которые требуются из-за больших скоростей распространения каналов в монокристаллах в процессе пробоя с анода [7]. Для

достижения более полной картины характеристик этого процесса, особенно при гораздо больших плотностях энергии, вводимой в канал пробоя, представляет интерес провести подобные измерения при приложении импульсов амплитудой в диапазоне 100–200 кВ с фронтом короче 0.5 ns в веществах с относительно невысокими по сравнению с ЩГК скоростями распространения каналов пробоя.

### 2. Методика эксперимента и материалы

Ранее [8] сообщалось об измерениях скорости распространения фронта канала пробоя с острейшего анода в монокристаллах KCl в зависимости от напряжения, и при 300 К получены значения ее в диапазоне  $(0.5–1.5) \cdot 10^8$  см/с при напряжениях 80–230 кВ. Рост канала в этих условиях происходит в направлении [100]. Измеренный диаметр каналов пробоя в этих условиях лежал в диапазоне от 10 до 20 мкм. Это позволяет дать оценку плотности мощности, вводимой в канал.

В [9] при наблюдении на осциллограмме трех последовательных отражений приходящего на образец импульса напряжения в материале обнаружены три переходящие друг в друга участка канала разрушения с последовательно уменьшающимися диаметрами. Была рассчитана напряженность поля на поверхности канала, она составляет  $2 \cdot 10^6$  В/см. Но высокая хрупкость кристаллов ЩГК не позволяла до сих пор получить точного профиля канала, поэтому представлялось очень интересным исследовать более детальные картины пробоев, используя другие вещества с гораздо меньшей хрупкостью. В этом отношении большой интерес представляет исследование свойств импульсной электрической проч-

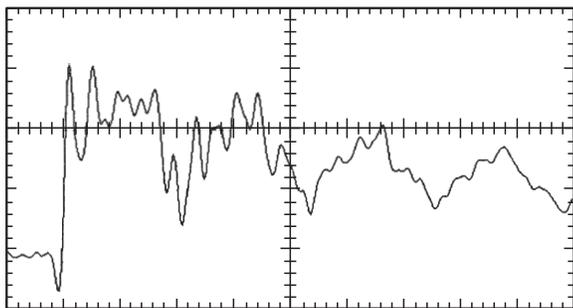


Рис. 1. Типичная осциллограмма напряжения при пробое образца несколькими импульсами.

ности кристаллов, используемых для создания лазеров с оптической накачкой, поскольку эти свойства должны коррелировать со стойкостью к оптическому пробое.

В представленной работе проводился пробой образцов монокристаллического алюмоиттриевого граната (АИГ) с положительного остря. Монокристаллы выращены методом Чохральского в направлении  $[100]$ , концентрация примесей составляет менее  $10^{-3}\%$ . Толщина пластинок, подвергавшихся пробое, порядка 7–10 мм. АИГ имеет высокую прочность и высокую ударную вязкость, что предотвращает преждевременное растрескивание образцов и способствует сохранению картины каналов пробоя.

На игольчатый анод подавалось напряжение амплитудой 140 кВ от генератора, дающего в согласованном режиме работы импульсы длительностью 8 нс. До появления полного (сквозного) пробоя диэлектрика генератор фактически нагружен на разомкнутую линию, что приводит к появлению цуга последовательных отражений с постепенно уменьшающейся амплитудой, начиная со 140 кВ. На рис. 1 представлена осциллограмма напряжения при пробое слоя трансформаторного масла толщиной 10 мм, на которой виден цуг последовательных отражений.

### 3. Экспериментальные результаты

При пробое образцов АИГ в трансформаторном масле при 300 К наблюдаются розетки из нескольких каналов неполного пробоя в направлениях, близких к  $[012]$  и им эквивалентных, а в некоторых случаях цепочки последовательных пробоев в одном из этих направлений. Есть основания полагать, что плоскости раскола, в которых лежат каналы пробоя, являются плоскостями несовершенной спайности. Как указывается в [10], явно выраженная спайность в синтетических кристаллах АИГ не обнаружена, тем не менее проявление спайности вероятно по плоскостям  $\{100\}$ . Фотография картины каналов в таком образце представлена на рис. 2. На ней имеется цепочка из пяти последовательно образовавшихся коротких прямолинейных областей разрушения

Скорости распространения каналов пробоя в АИГ и ШГК при различных напряжениях

Вещество	Скорость пробоя, $10^7$ см/с	Напряжение, кВ
$Y_3Al_5O_{12}$ *	1.30	140
$Y_3Al_5O_{12}$ **	2.30	140
	1.69	123
	1.33	105
	1.20	87
	1.20	70
	11.00	115
KBr	2.22	140
	3.00	70
KCl	4.63	84
	5.00	88
	5.63	94
	15.00	155
	22.00	230

\* Среднее значение скорости для АИГ, полученное для тонких образцов.

\*\* Значение скоростей на отдельных участках фрагментированного канала.

шириной 0.4 мм с тонким керном по оси, каждая из которых соответствует прохождению последующей волны отражения высоковольтного импульса. Используя значения длин пяти наблюдаемых последовательных фрагментов каналов пробоя, были рассчитаны скорости формирования (удлинения) этих каналов (см. таблицу). Здесь же приведены значения скорости пробоя в монокристаллах KCl, полученные при аналогичных условиях. Видно, что скорость удлинения канала пробоя в АИГ в 3–4 раза меньше, чем в хлориде калия. Для надежной идентификации полученных численных значений как скорости распространения фронта проводящего канала были проведены измерения времени полного пробоя тонких пластинок материала толщиной 1–4 мм так, чтобы проводящий канал полностью пронизывал весь

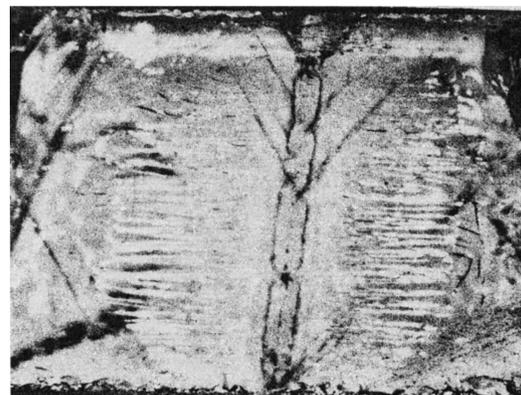


Рис. 2. Общий вид структуры фрагментированного канала пробоя в АИГ (начало канала внизу).

образец на первом импульсе. Полученная при этом для четырех образцов средняя величина скорости составляет  $1.3 \cdot 10^7$  cm/s. Некоторое отличие этого значения от получаемого при первых импульсах многоимпульсного пробоя связано с трудностью учета конечной длительности фронта импульса (порядка 1 ns) и, вероятно, несколько различающихся при этих режимах условий начала пробоя.

При микроскопическом изучении фрагментированных каналов пробоя установлено, что наблюдаемая зона разрушения имеет сечение шириной 0.4 mm и толщину порядка 100  $\mu$ m, что может быть интерпретировано как границы трещины раскрытия кристалла, которая образуется из-за механических напряжений электростатической либо газодинамической природы, причем величина раскрытия локально соответствует величине механического усилия на данном участке канала.

Скоростью распространения канала пробоя, полученная при минимальном напряжении импульса (70 kV), равна  $1.2 \cdot 10^7$  cm/s. Несмотря на то что полученное значение скорости пробоя в АИГ в несколько раз меньше, чем в ШГК, оно все еще значительно больше скорости продольного звука в АИГ, равной  $8.6 \cdot 10^5$  cm/s вдоль направления [001] [11], что соответствует критерию, сформированному Вершининым [9] для электронно-детонационного механизма анодного пробоя.

#### 4. Заключение

Экспериментально полученная детальная картина генерации последовательных звеньев со структурой типа четочной свидетельствует о том, что возникновение канала пробоя (его диаметр и продольный размер) происходит только локально и непосредственно в момент прохождения фронта пробоя. Особенно подчеркивает этот вывод наличие точек „пережатия“ канала, соответствующих моментам времени, когда из-за отражения пришедшего наносекундного импульса напряженность поля понижается непосредственно до минимально необходимой для электрического разрушения вещества. Более того, наличие слабых боковых ответвлений, начинающихся в некоторых точках „пережатия“, служит дополнительным косвенным подтверждением реального наличия мест в кристалле, в которых происходило отражение последовательных импульсов.

Также получено численное значение скорости распространения каналов пробоя при напряжении 140 kV и длительности нарастания фронта импульса 0.5 ns, равное  $1.3 \cdot 10^7$  cm/s.

#### Список литературы

- [1] J.W. Davisson. Phys. Rev. **70**, 685 (1946).
- [2] А.А. Воробьев, Е.К. Завадовская. Электрическая прочность твердых диэлектриков. ГИТТЛ, М. (1956). 312 с.

- [3] Р.В. Емлин, С.О. Чолах, В.Г. Шпак, В.А. Белоглазов, Ю.Н. Вершинин. Письма в ЖТФ **16**, 6, 49 (1990).
- [4] А.Л. Гурский, Е.В. Луценко, Г.П. Яблонский. Кристаллографическая ориентация путей электрического пробоя в диэлектриках и полупроводниках. Ин-т физики им. Б.И. Степанова, Минск (1990). 48 с.
- [5] А.А. Воробьев. Изоляционные свойства, прочность и разрушение диэлектриков. Изд-во СО АН СССР, Новосибирск (1960). 204 с.
- [6] С. Уайтхед. Пробой твердых диэлектриков. Госэнергоиздат, М.; Л. (1957). 270 с.
- [7] Р.В. Емлин, А.С. Гилев. ЖТФ **79**, 1, 140 (2009).
- [8] Р.В. Емлин, Ю.Н. Вершинин, В.А. Белоглазов. В сб.: Материалы IX симп. по сильноточной электронике. Россия (1992). С. 299.
- [9] Ю.Н. Вершинин. Электронно-тепловые и детонационные процессы в диэлектриках. УрО РАН, Екатеринбург (2000). 260 с.
- [10] Е.А. Степанцов, В.Г. Говорков, Г.В. Бережкова, Х.С. Багдасаров, Г.И. Рогов. Кристаллография **21**, 142 (1976).
- [11] А.А. Бристанов, В.С. Бондаренко, Н.В. Переломова, Ф.Н. Стрижевская, В.В. Чкалова, М.П. Шаскольская. Акустические кристаллы. Наука, М. (1982). 632 с.