

УДК 539.224

© 1993

ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ, ОБЛУЧАЕМЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ПУЧКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ

В. С. Ковивчак, И. С. Столетов

Рассмотрена инициация процесса разрушения ионных кристаллов, облучаемых сильноточными пучками электронов наносекундной длительности. Впервые установлено, что многократное облучение ионных кристаллов с высокой наведенной радиационной проводимостью электронными пучками с плотностью ниже порога механического разрушения приводит к появлению на поверхности кристаллов вблизи кромки коллимирующего отверстия матовой области, представляющей собой совокупность сферических частиц, кратеров и отверстий различной формы, которые могут являться очагами образования микро- и макротрещин. Предположено, что основным механизмом, ответственным за наблюдаемое повреждение ионных кристаллов, является их тепловой пробой, определяющую роль в инициации и развитии которого играет СЭП.

Несмотря на длительное изучение разрушения высокоомных диэлектриков при облучении сильноточными электронными пучками (СЭП), нет однозначного понимания роли электрических процессов в иницировании этого явления. Так, авторы работ [1-4] считают электрический пробой за счет ударной ионизации основной причиной разрушения ионных кристаллов. В то же время, по мнению авторов работы [5], высокая наведенная радиационная проводимость большинства ионных кристаллов, облучаемых СЭП, делает пренебрежимо малой вероятность электрического пробоя в области пробега электронного пучка при плотностях потока электронов, вызывающих раскол ионных кристаллов, из-за небольшой ($\sim 10^4$ В/см) напряженности электрического поля в этой области, и поэтому электрический пробой не может играть определяющую роль в этом явлении.

Целью настоящей работы является исследование иницирования процессов разрушения ионных кристаллов, облучаемых СЭП в геометрии, традиционно используемой для выяснения механизмов разрушения.

Источником электронов служил импульсный ускоритель со следующими параметрами: максимальная энергия электронов 0.3 МэВ, длительность импульса облучения 5—20 нс, плотность тока 0.01—1.2 кА/см², максимальная частота следования импульсов 0.1 Гц.

Эксперименты выполнены на кристаллах NaCl, KCl, KBr, NaF, LiF размером 10 × 10 мм, толщину которых варьировали от 0.6 до 4 мм. Облучение образцов проводилось через заземленный коллиматор с отверстием диаметром 3 мм. Исследование образцов после облучения проводили с использованием методов оптической и электронной микроскопии.

Впервые установлено, что многократное облучение исследуемых материалов СЭП с плотностью ниже порога крупного разрушения приводит к появлению на поверхности кристалла вблизи кромки коллимирующего отверстия матовой кольцеобразной области (рис. 1, а), хорошо наблюдаемой на металлизированной поверхности кристалла. Нанесение на поверхность кристалла тонкой алюминиевой фольги (или пленки) с последующим ее заземлением приводит к исчезновению кольцеобразной структуры, остаются отдельные рассеивающие свет небольшие скопления, располагающиеся вблизи различных поверхностных дефектов. Ука-

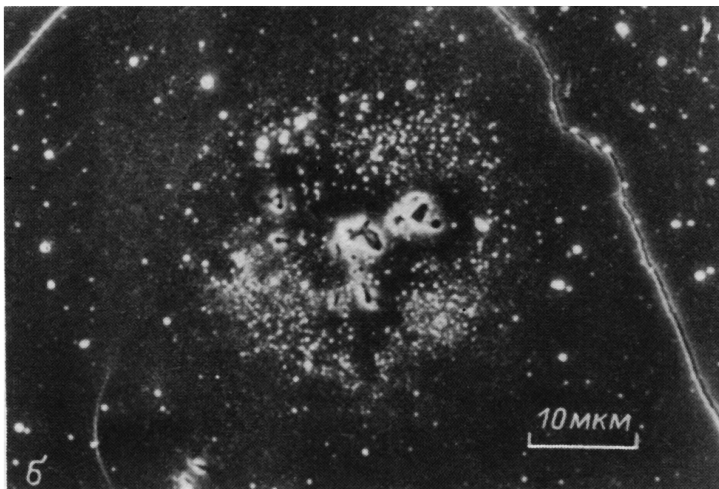
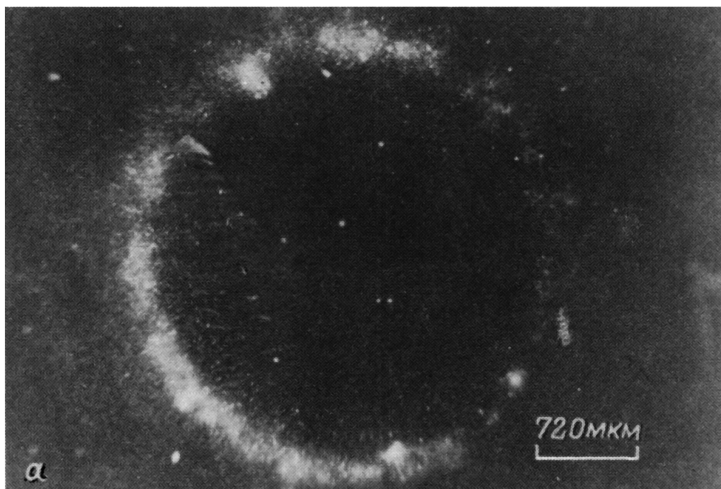


Рис. 1. Вид поверхности кристалла KCl после воздействия СЭП (90 импульсов) в оптическом (а) и электронном (б) микроскопе.

занная структура наблюдается на образцах исследованных кристаллов, выколотых в различных кристаллографических направлениях.

Исследования кристаллов, проведенные с помощью оптической и электронной микроскопии, показали следующее.

1. Обнаруженная структура представляет собой совокупность скоплений (рис. 1, б) отдельных почти сферической формы частиц, расположенных по границам области облучения, в центральной части которых находятся кратеры и отверстия различной формы (рис. 2, а), глубина которых в исследованных условиях составляет, как правило, несколько мкм.

2. Отверстия и кратеры могут являться очагами образования микро- и макротрещин (рис. 2, б).

3. Увеличение числа импульсов облучения при остальных неизменных параметрах пучка приводит к увеличению числа и размеров кратеров, частиц, трещин.

4. Увеличение (уменьшение) плотности потока электронов приводит к уменьшению (увеличению) числа импульсов облучения, необходимых для появления

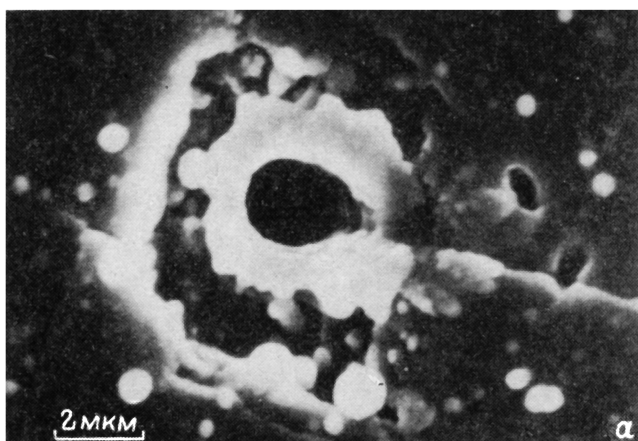


Рис. 2. Типичные повреждения, вызванные воздействием СЭП в кристалле KCl (а) (б — образование из них микротрещин) и в низкоомном германии (в).

кратеров и каналов. Описанные повреждения обнаружены также при однократном воздействии СЭП с плотностью $\sim 8 \cdot 10^{13}$ см⁻², при которой происходит множественное разрушение образца в области облучения.

5. Вблизи кромки коллимирующего отверстия в объеме исследованных кристаллов не обнаружено остаточных каналов, характерных для электрического пробоя за счет ударной ионизации.

6. В аналогичных условиях в области облучения LiF (как на поверхности, так и в объеме) видны каналы электрического пробоя. При дальнейшем увеличении числа импульсов облучения на поверхности LiF вблизи кромки коллимирующего отверстия также появляется аналогичная кольцеобразная область, содержащая меньшее, чем на других кристаллах, число кратеров и отверстий.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при облучении ионных кристаллов происходит значительная концентрация энергии в небольших областях кристалла вблизи кромки коллимирующего отверстия, приводящая к нагреву, плавлению и частичному испарению материала в этих областях с последующим выбросом и кристаллизацией жидкой фазы, о чем говорит сферическая форма частиц. Наличие больших градиентов температур вблизи области формирования отверстий и кратеров, а также высокие давления испаренного материала могут приводить к возникновению микротрещин в этих областях. Авторы работ [1-4] считают, что единственным механизмом, ответственным за концентрацию энергии в локальных областях диэлектрика, облучаемого СЭП, является электрический пробой за счет ударной ионизации материала, связанной с генерацией сильных электрических полей.

Однако заметим, что существует ряд фактов:

1) отсутствие в исследованных материалах вблизи кромки коллимирующего отверстия остаточных каналов, характерных для электрического пробоя за счет ударной ионизации;

2) отсутствие преимущественной локализации каналов электрического пробоя вблизи кромки коллимирующего отверстия в LiF (в области облучения которого реализуется пробой за счет ударной ионизации), несмотря на создаваемое там неоднородное электрическое поле;

3) более раннее (т. е. при меньшем числе импульсов облучения) появление каналов электрического пробоя в области облучения LiF, чем образуется кольцеобразная структура повреждений, несмотря на имеющуюся неоднородность поля вблизи кромки коллимирующего отверстия;

4) отсутствие кристаллографической ориентации наблюдаемых повреждений;

5) увеличение числа кратеров на поверхности при увеличении числа импульсов облучения (в то время как при электрическом пробое за счет ударной ионизации [3] число выходов каналов пробоя на облучаемую поверхность не увеличивается);

б) приповерхностный характер концентрации энергии в локальных областях материала вблизи кромки коллимирующего отверстия (в отличие от объемного, происходящего на глубине 70—180 мкм при развитии стримерных разрядов [4]).

Их нельзя корректно объяснить с точки зрения существующих представлений об электрическом пробое диэлектрика, облучаемого СЭП.

В [5] было установлено, что в ионных кристаллах, обладающих высокой наведенной радиационной проводимостью, примерно 90—99% инжектированного в образец заряда стекает за время импульса облучения. Можно предположить, что, поскольку практически весь инжектированный в образец заряд стекает на кромку коллиматора, по локальным участкам небольшой кольцеобразной области материала (шириной ≤ 100 мкм) вблизи кромки коллимирующего отверстия протекает ток, плотность которого значительно превышает плотность тока электронного пучка. Высокая объемная плотность выделяющейся при этом энергии

приводит к сильному разогреву участков этой области кристалла, имеющих более низкое сопротивление. Повышение температуры ведет к снижению их сопротивления за счет тепловой генерации носителей заряда, перераспределению тока в этой кольцеобразной области, дальнейшему росту тока и температуры этих участков и в конечном итоге к плавлению, испарению и, возможно, ионизации испаренного материала. Описанный выше процесс, представляющий собой по сути тепловой пробой, инициируемый СЭП, происходит за время, сравнимое с длительностью электронного облучения.

Для проверки предложенного механизма разрушения проводилось исследование материалов, в которых из-за высокой проводимости невозможно реализовать электрический пробой за счет ударной ионизации. В качестве таких материалов выбраны германий *p*-типа и кремний *n*-типа с удельной проводимостью 0.06—0.3 Ом⁻¹·см⁻¹, что сравнимо с полученной в работе [5] удельной импульсной проводимостью КВг, облучаемого СЭП. При обеспечении условий стекания заряда, таких же как для ионных кристаллов, на поверхности германия и кремния была получена аналогичная кольцеобразная структура повреждений. Особенностью повреждения этих материалов (рис. 2, в) являются значительно меньший размер и число кратеров, отверстий, что, возможно, связано с шнурованием тока, обусловленным сильной зависимостью проводимости полупроводников от температуры.

Таким образом, из полученных данных можно сделать вывод о том, что наиболее вероятным механизмом, ответственным за наблюдаемое повреждение ионных кристаллов с высокой наведенной радиационной проводимостью, а также низкоомных полупроводников, является тепловой пробой, определяющую роль в инициации и развитии которого играет СЭП. Специфика электронного воздействия приводит к тому, что такой пробой в отличие от классического происходит за время порядка длительности импульса облучения (т. е. за десятки наносекунд). Данное явление необходимо учитывать при анализе поведения различных материалов, облучаемых сильноточными пучками заряженных частиц, и выявлении механизмов их разрушения.

Список литературы

- [1] Олешко В. И., Штанько В. Ф. // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 6. С. 1235—1236.
- [2] Олешко В. И., Штанько В. Ф. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 320—324.
- [3] Олешко В. И., Штанько В. Ф. // ЖТФ. 1987. Т. 57. № 9. С. 1816—1818.
- [4] Штанько В. Ф., Олешко В. И. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 3. С. 99—105.
- [5] Высокоэнергетическая электроника твердого тела / Под ред. Д. И. Вайсбурда. Новосибирск: Наука, 1982. 227 с.

Томский государственный университет

Поступило в Редакцию
8 апреля 1991 г.
В окончательной редакции
28 июля 1992 г.