

05;06;12

Эффекты ориентации в условиях фрелиховского пробоя кристаллов карбида кремния

© В.А. Карачинов

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

Поступило в Редакцию 24 мая 1999 г.

Описаны результаты экспериментального исследования процессов хрупкого разрушения кристаллов SiC при электрическом пробое.

1. Для ряда технических применений карбида кремния необходимы монокристаллы, обладающие определенной формой, заданной степенью легирования и имеющие низкую плотность протяженных дефектов [1,2]. Из известных методов размерного профилирования SiC этим требованиям в значительной степени соответствует электроэрозия в жидких диэлектриках, сопровождающаяся различными физическими эффектами, в том числе и электрическим пробоем SiC [3–5].

Две формы пробоя — поверхностный и объемный — способствуют разрушению кристалла SiC через образование специфических дефектов (фигур пробоя), которые могут наследоваться. Кроме того, воздействие импульсных электрических разрядов на SiC, обладающий при температурах ниже 600–500°C значительной хрупкостью, в ряде случаев приводит к образованию трещин [6]. Известно, что растрескивание многих органических кристаллов вызывает так называемый фрелиховский пробой, отличающийся быстрым развитием и произвольной ориентацией направлений пробоя [7].

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального изучения процессов хрупкого разрушения SiC в условиях электрического пробоя.

2. Электрический пробой SiC изучался на лабораторной установке, состоящей из генератора одиночных импульсов и системы электродов игла–плоскость. Энергию импульсов можно было изменять в интервале $E_{puls} = 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ J} \div 0.9 \text{ J}$, напряжение $U = 0 \div 300 \text{ V}$.

Монокристаллы	Энергия импульса, J (без касания игольчатого электрода и грани)			
	(0001)C	(0001)Si	(11 $\bar{2}$ 0)	(10 $\bar{1}$ 0)
Грань				
Пластинчатые (Метод Лели)	0.7	0.7	0.4	0.08–0.09
Объемные (Метод ЛЭТИ, аргон, $T_p = 2400$ K)	0.6	0.6	0.3	0.08

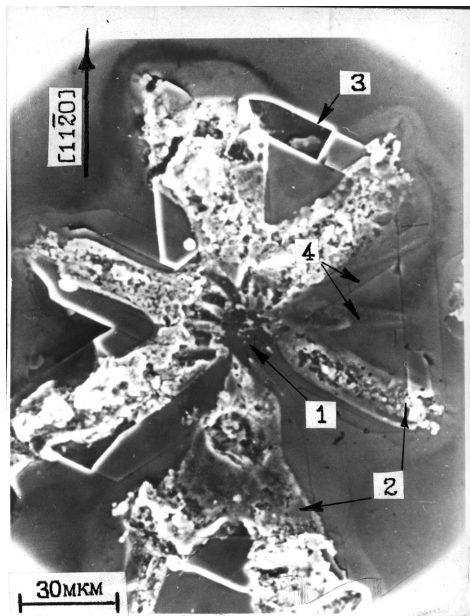
В экспериментах использовались электроды, изготовленные из стали. В качестве среды применялось трансформаторное масло, находящееся при комнатной температуре.

Исходными материалами для исследований служили: пластинчатые и объемные монокристаллы SiC политипа 6H как с естественными гранями, так и с поверхностями, подвергавшимися полировке и травлению в расплаве KOH. Толщина образцов составляла 450–4000 μm , концентрация нескомпенсированных доноров $N_d - N_a \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, плотность дислокаций $N_d = 1 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$.

Морфологические особенности фигур пробоя в SiC изучались оптическими и химическими методами (металлографический микроскоп, травление в расплаве KOH), а также методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) (BS-340).

Согласно данным, полученным с помощью РЭМ, зона разрушения, формируемая частичным пробоем SiC, по ряду параметров подобна отпечатку от острого механического индентера [8]. Ее структура содержала базовую лунку, систему радиальных и кольцевых трещин. Кроме того, обнаруживались вторичные трещины, ориентированные параллельно поверхности кристалла и вызывающие выколы материала. Разрушение происходило преимущественно по плоскостям спайности, а также наблюдались разрывы по плоскостям скольжения [9].

Оптические исследования зоны разрушения как в обычном, так и в поляризованном свете выявили напряженные области и области отслаивания SiC, границы которых видны за счет интерференции света [10]. Два сильнодействующих фактора — ориентация грани и дислокационная структура SiC — определяли эволюцию зоны разрушения. В таблице приведены экспериментально полученные пороговые значения энергии



Фигура пробоя в режиме касания игольчатого электрода с поверхностью пластинчатого кристалла (фото, РЭМ, грань (0001)Si, $E_{puls} = 0.36 \text{ J}$, $\tau = 120 \mu\text{s}$): 1 — область касания электрода; 2 — лучевые эрозионные лунки; 3 — кайма с выколом материала; 4 — каналы пробоя.

электрического импульса, вызывающие хрупкое разрушение 6H-SiC. Влияние дислокационной структуры сказывалось на образовании ручьевых узоров и проявлении отдельности (плоскость (0001)).

3. В экспериментах с игольчатым электродом, который касался поверхности грани (0001)Si, образовывались фигуры пробоя (ФП) типа "снежинка" (см. рисунок), внешне похожие на дислокационные розетки. Однако при травлении кристаллов с такими ФП в расплаве КОН не было выявлено следов скольжения. Картина травления содержала отдельные группы гексагональных ямок травления, по всей видимости, связанных с ростовыми дислокациями, и канавки травления вдоль трещин.

Как видно из рисунка, структура ФП содержит строго ориентированные по кристаллографическим направлениям лучевые эрозионные лунки, каналы пробоя и трещины. Лунки заполнены продуктами деструк-

ции SiC и пересекаются в месте касания электрода. Вершины лунок фрагментарно замыкаются каймой, образованной кольцевой трещиной. В пределах каймы наблюдались выколы материала с гладкой поверхностью. Сопоставляя кристаллографические индексы следов разрушения, образующих "снежинку" (лунки, трещины, выколы), с известными элементами хрупкого разрушения 6H-SiC (типа вюрцита), можно выделить две основные системы разрушения: по плоскостям спайности $\{10\bar{1}0\}$ и отдельности (0001).

Эксперименты показали, что лучевые эрозионные лунки образованы каналами частичного пробоя SiC. Их формирование связано с ориентированными лавинами электронов, которые в направлении $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ обладают наибольшей энергией [11]. Термодеструкция SiC, происходящая по всей длине канала, разрушает поверхность грани, образуя лучевую лунку. Электронные лавины в направлениях $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ не только обладают меньшей энергией, но и относительно поверхности их траектория направлена в глубь кристалла под большим углом, не вызывая разрывов. Эффекты ориентации электрического пробоя и, как следствие, образование соответствующих ударных волн являются наиболее существенными механизмами создания системы трещин и выколов в "снежинке" [12].

4. В заключение приведем основные результаты работы:

а) частичный пробой SiC может сопровождаться хрупким разрушением кристалла через образование ФП, морфология и структура которых зависят от ориентации грани и особенностей дислокационной структуры;

б) определены пороговые значения энергии электрического импульса, вызывающие хрупкое разрушение граней SiC;

в) эффект ориентации электрического пробоя в режиме касания игольчатого электрода с поверхностью кристалла формируют ФП типа "снежинка".

Список литературы

- [1] Водаков Ю.Л., Ломакина Г.А., Мохов Е.Н. // Легирование полупроводников. М.: Наука, 1982. С. 230–233.
- [2] Карачинов В.А. // Труды III Междунар. конф. "Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение". Александров, 20–24 октября, 1997. Т. 2. С. 154–164.

- [3] Левин В.Н., Таиров Ю.М., Траваджян М.Г., Цветков В.Ф. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1978. Т. 14. № 6. С. 1062–1066.
- [4] Баженов О.Г., Карачинов В.А. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 21. С. 26–29.
- [5] Лисенков Г.Б., Снегирев В.П., Тагер А.С. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 4. С. 215–219.
- [6] Карачинов В.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В 7. С. 133–135.
- [7] Берке Дж., Шульман Дж. Прогресс в области диэлектриков. М.: ГЭИ, 1962. 308 с.
- [8] Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Кац М.С. Физика процессов микроиндентирования. Кишинев: Штиинца, 1986. 294 с.
- [9] Предводителев А.А. // Кристаллография. 1962. Т. 7. В. 6. С. 938–942.
- [10] Фохт М.М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. М.: Гостехиздат, 1948. 432 с.
- [11] Водаков Ю.А., Константинов А.О., Литвин Д.П., Санкин В.И. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 12. С. 705–708.
- [12] Толстых А.Б. // Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев: Наук. думка, 1977. С. 157–160.