

УДК 539.1.043+539.213+539.27

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

А. И. ГЕРАСИМОВ, Е. И. ЗОРИН, П. В. ПАВЛОВ, Д. И. ТЕТЕЛЬБАУМ

СВЯЗЬ МЕЖДУ АМОРФИЗАЦИЕЙ И ОБРАЗОВАНИЕМ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

(Представлено академиком Н. В. Беловым 21 X 1969)

Известно, что при бомбардировке германия и кремния ионами средних энергий наблюдается переход приповерхностных слоев в аморфное состояние. Это явление исследовалось с помощью электронной микроскопии и электронографии (¹⁻⁵), а также методом резерфордского рассеяния высокоэнергетических ионных пучков (^{7, 8}). На основании данных работ (³⁻⁶) можно сделать вывод, что наиболее вероятным механизмом аморфизации являются накопление радиационных дефектов. При некоторой концентрации последних кристаллическое состояние становится неустойчивым, и происходит разупорядочение структуры.

Однако имеющиеся в литературе данные не позволяют сделать определенных выводов о связи параметров, характеризующих аморфизацию (критические дозы аморфизации, толщины аморфных слоев, устойчивость аморфного состояния при отжиге), и параметров, характеризующих дефектообразование при ионной бомбардировке (относительная концентрация и распределение точечных радиационных дефектов при различных условиях облучения). Установление такой связи не только явилось бы дополнительным аргументом в пользу предложенного механизма аморфизации, но и способствовало бы объяснению ее закономерностей, а также проверке георетических расчетов по дефектообразованию (⁹). В настоящей работе приводятся результаты некоторых экспериментов, указывающих, что такая связь действительно имеет место.

1. Чтобы выяснить, какое влияние оказывает на степень ближнего порядка аморфного германия сорт ионов, методом фурье-анализа были расшифрованы структуры аморфизованных пленок Ge, облученных (при одинаковой дозе 1000 икул/см²) ионами В⁺, N⁺ и Ar⁺ *.

Степень ближнего порядка характеризуется остротой максимумов кривой радиального распределения атомной плотности. В качестве меры упорядоченности возьмем отношение высоты максимума h к ширине w при нулевой ординате. h/w для первых двух координационных сфер принимает следующие значения:

	В ⁺	N ⁺	Ar ⁺
1-я координационная сфера	14,7	12,1	7,0
2-я координационная сфера	22,0	21,2	17,9

Как видно, степень ближнего порядка уменьшается с ростом массы ионов. Это связано с тем, что при перегруппировке атомов, происходящей в аморфизованном слое в результате попадания в него ускоренных ионов, степень упорядоченности должна зависеть от концентрации разорванных связей (или, что то же самое, радиационных дефектов) в каскадах атомных смещений, развивающихся при торможении ионов. Последняя же возрастает с увеличением массы ионов (⁹).

* Данные для дозы 1000 икул/см² были приведены в работе (⁹).

2. На рис. 1 представлена зависимость доз $D_{ам}$, при которых наступает аморфизация Ge и Si при бомбардировке ионами B^+ и P^+ с различными энергиями, от концентрации точечных радиационных дефектов (вакансий) на поверхности n_0 , приходящихся на 1 ион/см². Величины n_0 рассчитывались методом Монте-Карло*.

Видно, что за единственным исключением (бомбардировка Si ионами B^+) указанная зависимость укладывается на одну кривую, причем в довольно широких пределах $D_{ам}$ обратно пропорциональна n_0 . Это свидетельствует о том, что аморфизация Ge и Si наступает после накопления определенной концентрации дефектов, в известной степени независимо от условий облучения. Замедление спада $D_{ам}$ при больших n_0 можно объяснить усиленной рекомбинацией дефектов при высоких плотностях последних в каскадах смещений. Выпадение из общей закономерности точки, соответствующей паре B^+ — Si, возможно связано с тем, что ионы бора с $E = 50$ кэВ претерпевают слабо экранированные кулоновские столкновения, при которых передачи энергии атомам мишени малы. При этом образуются близкие пары вакансии — междоузельный атом, легко рекомбинирующие между собой.

3. Методом последовательного удаления с облученной поверхности кремния тонких слоев и съемки электронограмм на отражение были измерены толщины аморфных слоев $h_{ам}$ при различных энергиях ионов фосфора

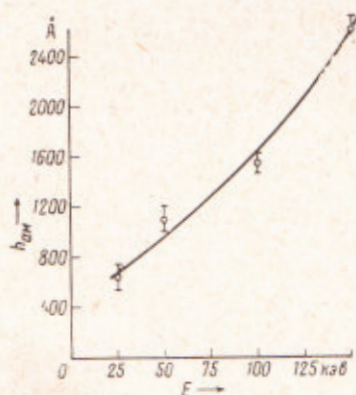


Рис. 2. Толщины аморфных слоев $h_{ам}$ в Si в зависимости от энергии E (доза 300 $\mu\text{кул}/\text{см}^2$). Кривая соответствует глубинам, где концентрация вакансий составляет 0,2 от максимальной для данной энергии

тверждают это предположение (рис. 3 см. вклейку к стр. 315).

4. Исследование отжига аморфизованных слоев Ge и Si показало, что кристаллизация Ge происходит при 400—500°, а Si — при 600—700° (вре-

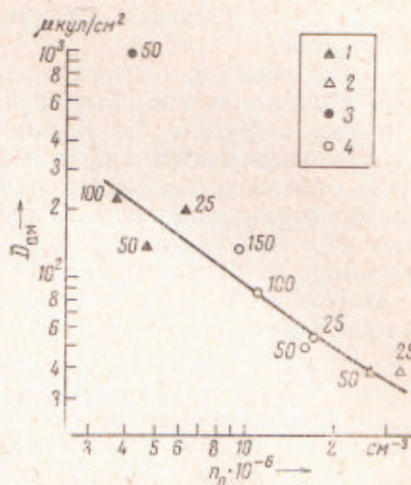


Рис. 1. Зависимость доз аморфизации $D_{ам}$ Ge и Si от концентрации n_0 вакансий на поверхности, приходящейся на 1 ион/см². 1 — B^+ — Ge; 2 — P^+ — Ge; 3 — B^+ — Si; 4 — P^+ — Si. Числа возле экспериментальных точек обозначают энергию ионов (кэВ)

мени электронограммы на отражение были измерены толщины аморфных слоев $h_{ам}$ при различных энергиях ионов фосфора (рис. 2). Слои удалялись посредством анодного окисления и последующего растворения окисных пленок в плавиковой кислоте. Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую, соответствующую расчетной глубине проникновения радиационных дефектов (9). (Наилучшее согласие получается в том случае, если в качестве глубины взята абсцисса точки, где концентрация дефектов составляет 0,2 от максимальной для данной энергии.) Аналогичный результат получен и для ионов бора.

В соответствии с колоколообразной формой распределения радиационных дефектов, полученной расчетным путем, следует ожидать, что при дозах облучения, близких к $D_{ам}$, аморфный слой залегает на некотором удалении от поверхности. Рис. 3, на котором приведены электронограммы облученной ионами бора поверхности Si после удаления слоев различной толщины, подтверждают это предположение

* При расчете порог смещения E_d был принят равным 30 эв.

мя отжига $t = 0,5$ часа). Это согласуется с приведенными в литературе данными (1, 4, 5, 8). Температура кристаллизации несколько изменяется в зависимости от сорта иона — повышается \sim на 50° для более тяжелых ионов Ag^+ по сравнению с ионами N^+ или V^+ . Последнее связано с указанной выше тенденцией к уменьшению степени упорядоченности с ростом массы иона.

Таким образом, основные закономерности аморфизации при ионной бомбардировке можно объяснить в рамках представлений об образовании точечных дефектов, без привлечения гипотезы о тепловых пиках (1). Единственным веским аргументом в пользу этой гипотезы является появление отдельных аморфных включений, предшествующее формированию сплошного аморфного слоя. Однако указанные включения могут быть связаны не с тепловыми пиками, а с коагуляцией радиационных дефектов, например, на атомах примеси.

Выражаем благодарность Т. Н. Стрижевой и Р. В. Кудрявцевой за помощь в работе.

Горьковский исследовательский
физико-технический институт
Горьковского государственного университета
им. Н. И. Лобачевского

Поступило
1 VII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. R. Paterson, *Phil. Mag.*, **12**, 1159 (1965). ² П. В. Павлов, Д. И. Тетельбаум и др., *Кристаллография*, **12**, № 1, 155 (1967). ³ П. В. Павлов, Д. И. Тетельбаум, *ДАН*, **175**, № 4, 823 (1967). ⁴ L. N. Large, R. W. Bicknell, *J. Mater. Sci.*, **2**, 589 (1967). ⁵ D. J. Mazey, R. S. Nelson, R. S. Barnes, *Phil. Mag.*, **17**, 1145 (1968). ⁶ R. S. Nelson, D. J. Mazey, *Canad. J. Phys.*, **46**, 689 (1968). ⁷ J. A. Davies, J. Denhartog et al., *ibid.*, **45**, 4073 (1967). ⁸ J. W. Mayer, L. Eriksson et al., *ibid.*, **46**, 663 (1968). ⁹ П. В. Павлов, Д. И. Тетельбаум и др., *Физ. и техн. полупроводников*, **8**, 2679 (1966).