

05.1: 12

© 1992

ИОННО-РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ  
ОКСИДА МАГНИЯЮ.М. Анненков, В.Ф. Пичугин,  
А.И. Рябчиков, Т.С. Франгулян

Известно [1, 2], что ионное облучение эффективно используется для модификации свойств поверхности и приповерхностных слоев различных материалов.

Изменение характеристик поверхности при облучении ионами может быть обусловлено как генерацией дефектов вследствие столкновительных процессов, так и физико-химическим взаимодействием имплантированных частиц с компонентами облучаемого материала. Варьируя режимы ионной обработки, представляется возможным достаточно тонко и в широких пределах управлять состоянием поверхности и приповерхностных слоев, а тем самым и их прочностными свойствами.

Если в литературе [1-4] имеются достаточно надежные данные об эффектах упрочнения металлов и сплавов, вызванных ионной обработкой, то применительно к материалам с неметаллическим характером связи этот вопрос пока остается практически открытым. Вместе с тем в связи со все более возрастающим интересом к использованию в качестве обрабатывающего инструмента минералокерамики, которая на сегодня имеет низкую вязкость разрушения, этот вопрос приобретает особую актуальность.

В настоящей работе приводятся данные, показывающие действие ионного облучения на прочностные характеристики ионных кристаллов, типичным представителем которых является окись магния. Исследуемые образцы имели технический уровень частоты. Кристаллы, приготовленные в виде пластинок, были облучены ионами  $Si^+$ ,  $Fe^+$ ,  $C^+$  дозой  $10^{16} - 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> при комнатной температуре в вакууме.

Проектные пробеги этих ионов ( $\bar{R}_p$ ) и страгглинг ( $\Delta \bar{R}_p$ ) в  $MgO$ , рассчитанные по теории Линдхарда [5], приведены в табл. 1.

Исследовались следующие характеристики: плотность дислокаций, микротвердость, трещиностойкость. Дислокационная структура выявлялась методом химического травления в ортофосфорной кислоте. При химическом травлении происходит растворение приповерхностных слоев кристалла. Согласно нашим оценкам, выдерживание кристаллов в травителе в течение 24 часов (время, необходимое для выявления дислокаций) вызывает удаление слоя образца, равного 45 мкм. Эта величина намного превышает величины проективных пробегов ионов. Поэтому регистрируемая в экспериментах плотность дислокаций по существу дает информацию о структурных перестройках в слоях кристалла, лежащих далеко за пределами зоны имплантации.

Т а б л и ц а 1

Расчетные значения  $\bar{R}_p$  и  $\Delta\bar{R}_p$  ускоренных ионов в  $MgO$ 

Вид иона	Начальная энергия ионов E, кэВ	$\bar{R}_p$ , мкм	$\Delta\bar{R}_p$ , мкм
$Si^+$	150	0.121	0.053
$C^+$	40	0.087	0.037
$Fe^+$	70	0.033	0.013

Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке на индентор равный  $P=100$  мг. Для оценки трещиностойкости применен метод индентирования [6], основанный на измерении длины трещин, возникающих у отпечатка при вдавливании острых наконечников. В этих экспериментах нагрузка на индентор составляла  $P=200$  мг. Коэффициент трещиностойкости  $K_{1c}$  оценивался по формуле:

$$K_{1c} = 0.0726 \frac{P}{l^{3/2}},$$

где  $P$  - нагрузка на индентор,  $l$  - длина трещины. Полученные результаты сводятся к следующему,

1. Исследование дислокационной структуры показало, что даже после снятия в ходе травления поверхностного слоя размером 45 мкм, плотность дислокаций в облученном образце была, как правило, в 2-3 раза больше, чем в необлученном. Из этого следует, что эффекты воздействия ионного пучка на кристаллы распространяются на глубины, лежащие далеко за пределами экстраполированных пробегов ускоренных ионов, определяющих толщину облучаемого слоя.

Изменение дислокационной структуры кристаллов при облучении ионами, естественно, связать с возникновением в приповерхностных слоях механических напряжений и связанной с ними пластической деформации, обладающих дальнедействующим характером.

2. Установлено упрочняющее действие ионной обработки на кристаллы  $MgO$ . Из данных, представленных в табл. 2, видно, что микротвердость (Н) после ионного облучения возрастает на 20-30%.

При измерении микротвердости глубина внедрения индентора в кристалл при  $P=100$  мг составляет около 2.5 мкм, более чем порядок превышая пробег ускоренных ионов. Поэтому наблюдаемые изменения величины Н также подтверждают тот факт, что модифицированию подвергается не только облучаемая часть образца, но и более глубокие его слои.

3. К числу наиболее ярких выявленных эффектов воздействия ионного пучка на оксид магния, следует отнести рост такого важного в практическом отношении параметра, как трещиностойкость.

Т а б л и ц а 2

Влияние ионного облучения на прочностные свойства  $MgO$ 

Тип ионов	Энергия ускоренных ионов $E$ , кэВ	Доза облучения $D$ , ион/см <sup>2</sup>	Относительное изменение микротвердости $\Delta H/H$ , %	Число трещин у отпечатка $N$	Длина трещин $l$ , мкм	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
-	-	Без облучения	-	4	31.89	0.79
$Si^{+}$	150	$10^{16}$	Без изменений	4	26.76	1.03
$C^{+}$	40	$10^{17}$	20	2-3	18.2	1.83
$Fe^{+}$	70	$10^{17}$	31	2-3	22.08	1.4

Вдавливание пирамиды Виккерса в кристалл  $MgO$  при нагрузке  $P=200$  мг на индентор вызывает образование трещин, исходящих из отпечатка. Стойкость материала к образованию трещин определяется по двум характеристикам: по числу трещин у отпечатка и по коэффициенту трещиностойкости  $K_{IC}$ . Полученные результаты приведены в табл. 2.

У необлученного образца со 100% вероятностью при индентировании образуется по 4 трещины у каждого отпечатка. Ионная обработка уменьшает вероятность их появления. При этом уменьшается длина трещин и растет связанный с этой величиной коэффициент

Максимальный эффект достигается при дозе облучения  $D=10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Зарегистрированное существенное повышение вязкости разрушения кристаллов  $MgO$  может быть обусловлено возникновением при ионной имплантации сжимающих напряжений в поверхностном слое, тормозящих образование и распространение трещин.

Полученные результаты могут служить основой для разработки методов ионно-лучевой модификации поверхности конструкционной керамики с целью повышения ее вязкости разрушения и износостойкости.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными электронными пучками / Под ред. Дж.М. Поута и др. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
- [2] Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 184 с.

- [3] Комиссаров А.П., Махлин Н.А., Поляков В.А. // Физика и химия обработки материалов. 1991. В. 3. С. 5-13.
- [4] Дидык А.Ю., Регель В.Р., Скуратов Б.А., Михайлова Н.Ю. // ЖТФ. 1989. - Т. 59. В. 2. С. 107-111.
- [5] Линдхард Й. // УФН. 1969. Т. 99. В. 2. С. 249-296
- [6] Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 216 с.

Поступило в Редакцию  
13 февраля 1992 г.