

06;07;12

©1993

## РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*А.П.Петраков, В.А.Бушув*

Импульсное лазерное облучение позволяет целенаправленно изменять физические свойства приповерхностных слоев полупроводниковых материалов [1-3], что связано, в частности, с изменениями кристаллической структуры при лазерном воздействии. Оптические и электрофизические свойства материалов существенным образом зависят от наличия дефектов структуры. Существует большое количество работ, посвященных импульсному лазерному отжигу полупроводников (см. [1-3]), однако при лазерном облучении возможен не только отжиг, но и генерация дефектов, что ограничивает эффективность лазерной обработки.

В настоящей работе методами двух- и трехкристальной рентгеновской дифрактометрии [4] исследованы точечные дефекты в приповерхностной области монокристаллов кремния, являющихся исходным материалом для изготовления полупроводников. Данный тип дефектов генерируется лазерным излучением с плотностью энергии  $W$  ниже порога плавления поверхности  $W_n$  [5]. Изменения структуры приповерхностных слоев совершенных и ионно-имплантированных кристаллов кремния при облучении с  $W > W_n$  анализировались ранее в работах [6-9].

Исследования проводились на совершенных монокристаллах кремния толщиной 500 мкм. Поверхность (111) облучалась рубиновым лазером, работающим в режиме свободной генерации с длительностью импульса  $\tau = 0.5$  мс. Принимались специальные меры для обеспечения равномерного распределения лазерной энергии (подробнее см. в [9]). Измерения проводились на двух- и трехкристальном рентгеновских дифрактометрах в симметричной бездисперсионной геометрии на  $\text{CuK}_{\alpha_1}$ -излучении. В качестве монохроматора и анализатора использовались совершенные монокристаллы кремния, отражение (111).

Из рис. 1 видно, что лазерное облучение с плотностью энергии ниже порога плавления  $W_n = 18$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к

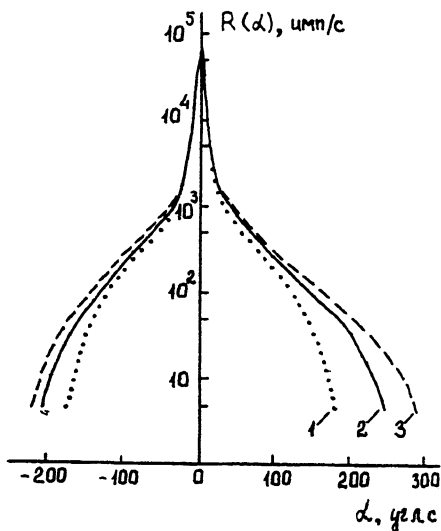


Рис. 1. Зависимость формы КДО от плотности энергии лазерного импульса. 1 — КДО совершенного кристалла кремния; КДО облученных кристаллов с плотностью энергии  $W$  (Дж/см<sup>2</sup>): 2 — 1, 3 — 10.

изменению кривых дифракционного отражения (КДО)  $R(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол поворота образца. Пиковая интенсивность уменьшается, а “хвосты” КДО с обеих сторон возрастают. Максимумы КДО 1–3 равны 68, 63 и 61% соответственно. Более высокой плотности энергии  $W = 10$  Дж/см<sup>2</sup> соответствует больший спад пиковой интенсивности и рост “хвостов” по сравнению с  $W = 1$  Дж/см<sup>2</sup>.

На спектрах мрехкристалльной рентгеновской дифрактометрии (ТРД) в дополнение к главному пику и псевдопику вблизи угла поворота анализатора  $\vartheta = 0$  появляется диффузный пик, интенсивность которого растет с увеличением энергии  $W$ . Интенсивность главного пика при этом уменьшается. Это изменение, следуя [10], оценивалось величиной  $g = 1 - \gamma$ , где  $\gamma(\alpha)$  — отношение интенсивностей главного пика облученного кристалла к совершенному. При угловой отстройке  $|\alpha| \gg \Delta\alpha_B$  главный пик формируется в приповерхностном слое толщиной  $z \approx \lambda/2\pi\alpha$  [4], где  $\Delta\alpha_B$  — полуширина брэгговского отражения,  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения. Поэтому, меняя угол  $\alpha$  и измеряя отношение  $\gamma$ , можно проследить за изменением степени дефектности по глубине кристалла.

При облучении с  $W = 1$  Дж/см<sup>2</sup> величина  $g \approx 0.6$  не меняется до глубины 0.03 мкм, затем спадает до 0.3 в интер-

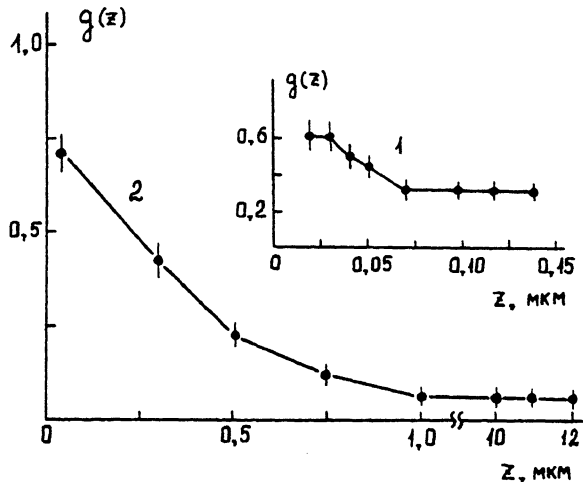


Рис. 2. Зависимость параметра дефектности кристаллической структуры от толщины приповерхностного слоя кристаллов кремния, обученных лазерным импульсом с плотностью  $W$  (Дж/см<sup>2</sup>): 1 — 1, 2 — 10.

вале 0.03–0.07 мкм и снова становится постоянной вплоть до 0.14 мкм (рис. 2, кривая 1). Дальнейшее увеличение исследуемой толщины затруднено ухудшением разрешения между главным и псевдопиками при малых  $\alpha$ . Толщина слоя, в котором наблюдается уменьшение функции  $g(z)$  до постоянной величины, растет с энергией  $W$ . При плотности  $W = 10$  Дж/см<sup>2</sup> она много больше глубины формирования главного пика. По этой причине для регистрации толщиной зависимости  $g(z)$  применялось послойное травление в смеси растворов плавиковой и азотной кислот с шагом 0.25 мкм. Величина  $g$  непосредственно вблизи поверхности составляет  $\approx 0.7$  (рис. 3, кривая 2). По мере травления кривая  $g(z)$  уменьшается, приближаясь к достаточно малому значению  $g \approx 0.66$  на глубине 1 мкм. Это значение не меняется до максимально исследуемой глубины травления 12 мкм.

Уменьшение пиковой интенсивности КДО и появление “хвостов” свидетельствуют об изменении структуры в приповерхностной области облученных кристаллов. Лазерные импульсы с  $W < W_p$  вызывают деформацию решетки [8] и генерацию точечных дефектов [5]. Дефектообразование обусловлено нагревом [1–3,5], фотостимулированием [5,11] и рассеянием ударной волны на атомах примеси и точечных дефектах типа вакансий и междоузельных атомов матрицы [12]. Дефектная структура может быть дополнена также дис-

локациями [13], однако анализ угловой зависимости интенсивности диффузного пика показывает, что этот тип дефектов преобладает при облучении с  $W > W_n$  [7-9].

Наличие диффузного пика на спектрах ТРД означает присутствие точечных дефектов, коагулированных под влиянием лазерного воздействия в кластеры. Единичные точечные дефекты не могут вызвать четко выраженный диффузный пик, так как угловой интервал диффузного рассеяния обратно пропорционален размерам дефектов.

По ширине  $\Delta\alpha \approx 150''$  "хвостов" КДО и скорости спада интенсивности диффузного пика с ростом  $\alpha$  можно оценить, что при  $W = 10 \text{ Дж/см}^2$  размер кластеров составляет  $R \approx \lambda/2\Delta\alpha \approx 0.1 \text{ мкм}$ . Величина  $g$  характеризует относительный объем, занимаемый дефектами. Действительно, в силу кинематического характера дифракции при больших углах  $\alpha$  интенсивность главного пика пропорциональна квадрату статического фактора Дебая-Валлера  $f^2 = \exp(-2M)$ , откуда  $\gamma = f^2$ . Для сферических аморфных кластеров  $M = cv$ , где  $v = 4\pi R^3/3$ ,  $R$  — радиус кластеров,  $c$  — их концентрация. В случае достаточно совершенного слоя величина  $M \ll 1$  и параметр  $g = 2cv$  действительно определяет относительный объем, занимаемый кластерами. Максимальная концентрация кластеров вблизи поверхности, которая получается из значения  $g \approx 0.7$  (рис. 2, кривая 2), составляет  $c \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . На глубине  $z > 1 \text{ мкм}$  показатель дефектности  $M$  спадает более чем в 20 раз.

Кристаллы, облученные импульсами с  $W = 1 \text{ Дж/см}^2$ , характеризуются значительно меньшей интенсивностью и большей угловой шириной диффузного пика, что не позволяет с достаточной уверенностью оценить размер и концентрацию дефектов в этом случае. Тем не менее, данные, приведенные на рис. 2 (кривая 1), также свидетельствуют об уменьшении степени дефектности с увеличением глубины.

Наличие участков с уменьшением дефектности и последующей неизменной ее величиной на рис. 2 указывает на наличие двух механизмов генерации дефектов. Вблизи поверхности преобладающим механизмом является фотостимулирование. Интенсивность лазерного излучения уменьшается с глубиной из-за поглощения, вследствие чего уменьшается и число генерируемых дефектов. Глубина  $z_c = 1 \text{ мкм}$ , на которой при  $W = 10 \text{ Дж/см}^2$  происходит падение параметра дефектности  $g$  до постоянного значения, хорошо согласуется с величиной коэффициента поглощения  $8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$  [3] кремнием излучения рубинового лазера при  $W < W_n$ . Длинный участок с постоянной степенью

дефектности обусловлен генерацией дефектов ударной волной. Существенно отметить при этом, что глубина  $z_c$  много меньше длины тепловой диффузии  $z_T \approx \sqrt{\kappa t} = 200$  мкм, где  $\kappa = 0.75$  см<sup>2</sup>/с [14].

Таким образом, лазерное облучение с энергией ниже порога плавления генерирует преимущественно кластеры точечных дефектов, размер и концентрация которых вблизи поверхности составляют 0.1 мкм и  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> соответственно. С продвижением в глубь кристалла степень дефектности уменьшается, приближаясь к постоянному значению.

### Список литературы

- [1] *Деуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С.* Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
- [2] *Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С.* Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988. 191 с.
- [3] *Хайбуллин И.Б., Смирнов Л.С.* // ФТП. 1985. Т. 19. В. 4. С. 569–591.
- [4] *Афанасьев А.М., Александров П.А., Иمامов Р.М.* Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. М.: Наука, 1989. 152 с.
- [5] *Емельянов В.И., Кашкаров П.К.* // Поверхность. 1990. В. 2. С. 77–85.
- [6] *Петраков А.П., Пунегов В.И., Тихонов Н.А.* // Поверхность. 1991. В. 11. С. 46–51.
- [7] *Бушуев В.А., Петраков А.П.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 8. С. 77–81.
- [8] *Бушуев В.А., Петраков А.П.* // Поверхность. 1992. В. 9. С. 64–70.
- [9] *Бушуев В.А., Петраков А.П.* // ФТТ. 1993. Т. 35. В. 2. С. 355–364.
- [10] *Ida A.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1979. V. 54. N 2. P. 701–706.
- [11] *Винецкий В.Л., Манойло М.А., Матвейчук А.С. и др.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 22. С. 2017–2021.
- [12] *Никифоров Ю.П., Янушкевич В.А.* // ФТП. 1980. Т. 14. В. 3. С. 534–538.
- [13] *Демчук А.В., Пристрем А.М., Данилович Н.И., Лабумов В.А.* // Поверхность. 1987. В. 12. С. 89–96.
- [14] *Foti G., Rimini E., Bertolotti M., Vitali G.* // Phys. Lett. 1978. V. 65A. N 5–6. P. 430–432.

Московский государственный  
университет им. М.В.Ломоносова

Поступило в Редакцию  
13 августа 1993 г.