

07; 11; 12

© 1992

## РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА

В.А. Буш у е в, А.П. П е т р а к о в

При изготовлении полупроводниковых материалов широко используются имплантированные монокристаллы. Для восстановления нарушенных ионной бомбардировкой слоев необходим последующий термический или, что более предпочтительно, импульсный лазерный отжиг [1], в процессе которого междоузельные атомы примеси занимают электрически активные положения в узлах решетки. В результате имплантации и импульсного облучения вблизи поверхности формируется нарушенный слой с отличным от объема параметром решетки и образуются дефекты структуры, вызывающие диффузное рассеяние рентгеновских лучей. Это приводит к возникновению дополнительных особенностей на кривых дифракционного отражения (КДО) [2]. Метод трехкристальной рентгеновской дифрактометрии (ТРД) [2] позволяет раздельно измерять когерентную и диффузную составляющие интенсивности рассеяния и исследовать структурное совершенство тонких нарушенных слоев.

Методами КДО [3-9] и ТРД [7-9] изучалось влияние импульсного облучения на структуру поверхности, однако отсутствуют работы по исследованию лазерной обработки предварительно термически отожженных имплантированных кристаллов. Данная обработка позволяет в широких пределах изменять структуру и электрофизические свойства материалов. Целью настоящей работы является рентгенодифракционное исследование структурных изменений приповерхностных слоев термически отожженных имплантированных бором монокристаллов кремния под действием миллисекундного лазерного облучения.

Поверхность (111) кристаллов кремния КДБ-10, имплантированного ионами В<sup>+</sup> с энергией 25 КэВ дозой  $D=6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и затем отожженных при  $T=700 \text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфере азота в течение 10 мин, облучалась рубиновым лазером ГОР-100М, работающим в режиме свободной генерации с длительностью импульса 0.5 мс. Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 50 см. Перед образцом устанавливалась маска с отверстием 5 x 5 мм. Для получения более равномерного распределения энергии образцы помещались на расстоянии 55 см от линзы, а перед ними ставилось матовое стекло. Плотность энергии  $W$  измерялась прибором ИМО-2 и в зависимости от напряжения накачки менялась в диапазоне 1-36 Дж/см<sup>2</sup>. Измерения проводились на двух- и трех-

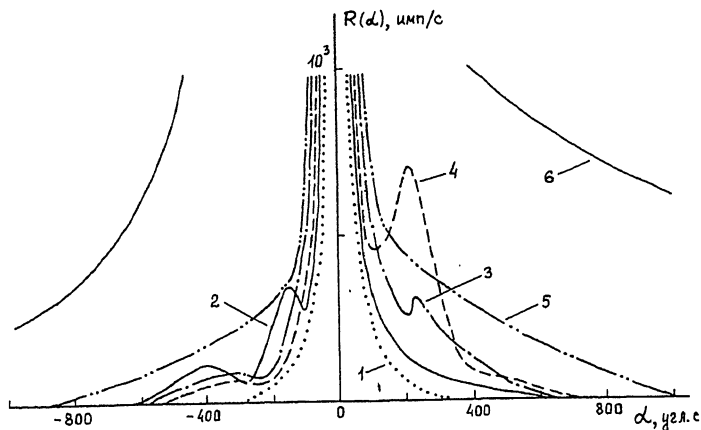


Рис. 1. Зависимость формы КДО (111) от плотности энергии лазерного облучения. 1 - КДО совершенного кристалла, 2 - имплантированного; облученного с плотностью энергии  $W$  (Дж/см<sup>2</sup>): 3 - 10, 4 - 20, 5 - 27, 6 - 36.

кристалльном дифрактометрах в симметричной бездисперсионной геометрии. В качестве монохроматора и анализатора использовались совершенные монокристаллы кремния, отражение (111),  $\text{Cu K}\alpha_1$  - излучение. Интенсивность падающего на образец пучка составляла  $10^5$  имп/с.

На рис. 1 приведена зависимость формы КДО  $R(\alpha)$  от плотности энергии лазерного облучения, где  $\alpha = \nu - \delta_B$  - угол поворота образца. После имплантации и термического отжига со стороны меньших углов  $\alpha$  от основного пика отражения, от подложки появляются два дополнительных пика, а со стороны больших углов - незначительное уширение "хвоста" (кривая 2) по сравнению с КДО неимплантированного кристалла (кривая 1). Облучение с плотностью энергии  $W = 1$  Дж/см<sup>2</sup> не влияет на структуру поверхности, так как форма КДО не меняется. С повышением  $W$  до 10 и 20 Дж/см<sup>2</sup> в области  $\alpha < 0$  остается слабый размытый максимум, а с противоположной стороны появляется более интенсивный пик, величина которого увеличивается с ростом  $W$  (кривые 3, 4). При дальнейшем увеличении  $W$ , начиная с 27 Дж/см, вместо дополнительных пиков возникают протяженные асимметричные "хвосты", причем их интенсивность со стороны больших углов выше (кривые 5, 6). Особенно интенсивные "хвосты" появляются при  $W = 36$  Дж/см<sup>2</sup>. Поверхность образца в этом случае покрывается сеткой микротрещин вдоль всевозможных плоскостей типа (110), что хорошо видно в электронном микроскопе МСМ-5.

На рис. 2 представлены кривые приведенной интенсивности  $P(\alpha) = I_{\text{ГЛ}} \alpha^2$  главного пика на спектрах ТРД. Для неимплантированного

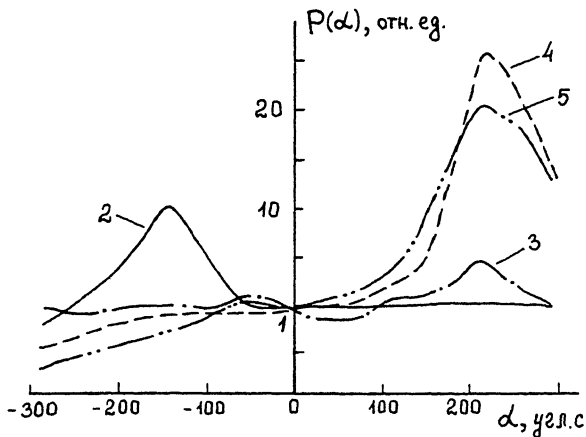


Рис. 2. Угловая зависимость приведенной интенсивности главного пика на спектрах ТРД. Значения  $W$  для кривых 2-5 те же, что и на рис. 1.

кристалла  $P(\alpha) = 1$ . Имплантация с термическим отжигом вызывает появление пика функции  $P(\alpha)$  со стороны меньших углов (кривая 2), а лазерное облучение - с противоположной стороны (кривые 3-5). Интенсивность пика растет с повышением  $W$  до  $20 \text{ Дж/см}^2$ , а затем падает при  $W = 27 \text{ Дж/см}^2$  (кривая 5). Зависимость  $P(\alpha)$  при облучении с  $W = 36 \text{ Дж/см}^2$  не приведена, так как поверхность настолько сильно разрушена, что главный пик не проявляется на фоне диффузного.

Из представленных экспериментальных результатов видно, что имплантация с последующим термическим отжигом формирует вблизи поверхности слой с параметром решетки, превосходящим параметр  $d$  в объеме кристалла. Это связано с тем, что при данном режиме отжига значительная часть атомов бора и выбитых ионами атомов кремния находится в междоузлиях. Средняя деформация  $\varepsilon = \Delta d/d = -\alpha_0 \text{ctg} \vartheta_B$ , где  $\alpha_0$  - положение наиболее интенсивного дополнительного пика на кривой 2 рис. 1, составляет  $\varepsilon \approx 2.7 \cdot 10^{-3}$ . То, что данный пик отвечает когерентному рассеянию, подтверждается наличием пика на функции  $P(\alpha)$  при том же угле  $\alpha_0$  (кривая 2, рис. 2). Второй дополнительный пик на кривой 2 рис. 1 имеет интерференционную природу. Эффективная толщина  $t$  имплантированного слоя определялась методом интегральных характеристик [2], по расстоянию  $\lambda/2 t \cos \vartheta_B$  между дополнительными пиками и по величинам максимумов  $R(\alpha_0) = (f t / \Lambda)^2$  и  $P(\alpha_0)$ , где  $\Lambda = 1.48 \text{ мкм}$  глубина экстинкции,  $f$  - фактор аморфизации. Все четыре метода дают близкие значения  $t \approx 0.06 \text{ мкм}$ . Максимальная глубина залегания атомов бора составляет  $\approx 0.5 \text{ мкм}$ , о чем свидетельствует исчезновение дополнительных пиков при травлении соответствующего слоя.

Облучение с  $W \approx 10$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к частичному лазерному отжигу. При этом знак  $\Delta d$  изменяется, поскольку бор, имеющий меньший, чем кремний, тетраэдрический радиус, занимает места в узлах решетки. Деформация сжатия, определенная по положению пиков на КДО и  $P(\alpha)$  в области  $\alpha > 0$ , составляет  $\varepsilon = -4 \cdot 10^{-3}$ . Из анализа кривых 4 и 5 следует, что толщина слоя возрастает до  $t \approx 0.1$  мкм. Деформация  $\varepsilon = 1.44 \beta c$ , где  $c$  – средняя концентрация примеси замещения,  $\beta = -5 \cdot 10^{-24}$  см<sup>3</sup> [3, 10]. Отсюда следует, что для обеспечения измеренного значения  $\varepsilon$  необходима концентрация бора  $c = 5.6 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Сравнение с полной концентрацией  $c_0 = D/t$  показывает, что в случае  $W = 20$  Дж/см<sup>2</sup>, при котором наблюдается минимальное диффузное рассеяние, величина  $c_0 = 6.3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, т. е. почти 95% атомов бора переходит в узлы кристаллической решетки.

Уменьшение функции  $P(\alpha)$  в области  $\alpha < 0$  (кривые 4, 5, рис. 2) указывает на частичную аморфизацию поверхности, причем в случае  $W = 27$  Дж/см<sup>2</sup> фактор  $f$  меньше, чем при 20 Дж/см<sup>2</sup>. Этим объясняется уменьшение максимума на кривой 5 по сравнению с кривой 4 на рис. 2. Слабый пик на КДО в области  $\alpha < 0$  имеет в основном диффузную природу, поскольку диффузный максимум на спектрах ТРД также смещен в отрицательную сторону, а пик на зависимости  $P(\alpha)$  при этих значениях  $\alpha$  отсутствует. Диффузное рассеяние вызвано, по-видимому, образованием кластеров дефектов междоузельного типа. Повышение  $W$  до 27 Дж/см<sup>2</sup> приводит к исчезновению дополнительного пика на КДО, хотя кристаллический слой с определенным выше значением  $\varepsilon$  имеется, что подтверждается наличием пика на кривой 5 рис. 2. Отсутствие его на КДО объясняется значительным диффузным рассеянием, которое на спектрах ТРД увеличивается в  $10^2$  раз, а при 36 Дж/см<sup>2</sup> – в  $10^3$  раз.

Таким образом, впервые методами КДО и ТРД показано, что увеличение параметра решетки при имплантации кремния ионами бора и последующем термическом отжиге сменяется его уменьшением ( $\Delta d < 0$ ) в результате миллисекундного лазерного отжига. Минимальная дефектность перекристаллизованного слоя толщиной 0.1 мкм наблюдается при плотности энергии лазерного облучения 20 Дж/см<sup>2</sup>.

Авторы признательны А.А. Ломову за полезные обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д в у р е ч е н с к и й А.В., К а ч у р и н Г.А., Н и д а е в Е.В., С м и р н о в Л.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
- [2] А ф а н а с ь е в А.М., А л е к с а н д р о в П.А., И м а м о в Р.М. Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. М.: Наука, 1989. 152 с.
- [3] L a r s o n В.С., E a r h o r s t J.F. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 6. P. 3181–3185.

- [4] S e r v i d o r i M., M o n t a C.D., Z a n i Q.  
// Phys. stat. sol. (a). 1983. V. 80. N 1. P. 277-285.
- [5] Л а б у н о в В.А., К о н д р а ш к и н а Е.А., П о л о -  
н и н А.К., П р о х о р е н к о Н.Л. // Поверхность. 1989.  
№ 4. С. 90-95.
- [6] Р у н е г о в V.I., Р е т р а к о в А.Р., Т и к -  
н о н о в N.A. // Phys. stat. sol. (a). 1990. V. 122.  
N 2. P. 449-458.
- [7] З а в ь я л о в а А.А., И м а м о в Р.М., К о в а л ь -  
ч у к М.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 11.  
С. 653-657.
- [8] Z a u m s e i l P., W i n t e r U., G a l l e r R.  
// Crystal Res. and Technol. 1984. V. 19. N 5.  
P. 633-641.
- [9] Б у ш у е в В.А., П е т р а к о в А.П. // Поверхность. 1992.  
№ 4. С. 60-66.
- [10] F u k u h a r a A., T a k a n o Y. // Acta Cryst.  
1977. V. A33. N 1. P. 137-142.

Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
14 марта 1992 г.