

07; 12

© 1992 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНЫХ СЪЕМОК В ПЛОСКОВОЛНОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОПОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

А.Э.Волошин, И.Л.Смольский, В.Н.Рожанский

Экспериментально показано повышение чувствительности метода плосковолновой рентгеновской топографии при съемке микродефектов в кристаллах кремния с использованием асимметричных отражений в геометрии Лауэ и Брэгга. Исследованы возможности метода в зависимости от степени асимметричности отражений. Обсуждаются причины, которые могут приводить к повышению чувствительности метода, главными из которых являются уменьшение длины экстинкции и релаксация полей деформации, создаваемых микродефектами, на поверхности образца.

Введение

В бездислокационных и малодислокационных кристаллах кремния в процессе роста формируются микродефекты, имеющие часто сложную внутреннюю структуру. Наличие микродефектов может определять возможность использования кристаллов для создания полупроводниковых приборов на их основе.

Сложности идентификации микродефектов в монокристаллах кремния обусловлены тем, что ни один из существующих экспериментальных методов не дает о них всесторонней информации [1,2]. В настоящее время для исследования относительно крупных микродефектов, размеры которых превышают 1 мкм, наряду с избирательным травлением и электронной микроскопией целесообразно применение плосковолновой рентгеновской топографии, которая позволяет визуализировать дефекты кристаллической решетки, создающие слабые поля деформаций.

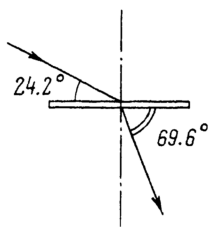
Перспективы применения плосковолновой топографии в изучении микродефектов в монокристаллах кремния были показаны экспериментально [3-9] и теоретически [10-14].

Степень асимметрии используемого при рентгенотопографической съемке отражения является одним из параметров, позволяющих получить дополнительную информацию об искажениях в кристаллах, однако ее влияние на условия формирования изображений дефектов, в частности микродефектов, до сих пор систематически не изучалось.

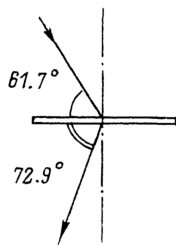
В настоящей работе проводилось исследование закономерностей формирования изображений микродефектов в условиях асимметричной съемки.

Методика исследования

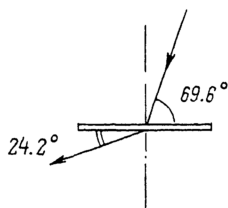
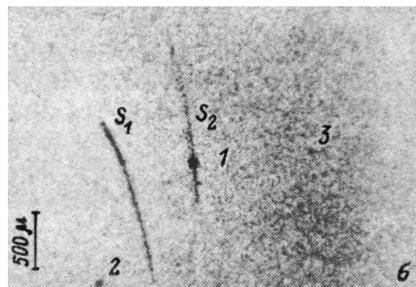
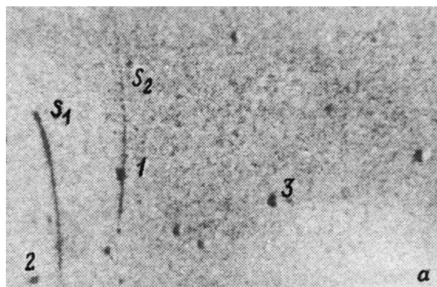
Объектом исследования были монокристаллы Si, выращенные методом Чохральского, из которых параллельно (вдоль плоскостей 112) и перпендикулярно



$\bar{1}53 \leftarrow g$



$\bar{3}5\bar{1} \leftarrow g$



$\bar{5}1\bar{3} \leftarrow g$

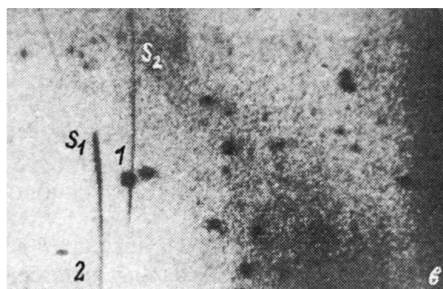


Рис. 1. Сравнение чувствительности метода плосковолновой рентгеновской топографии при выявлении микродефектов в геометрии Лауэ в симметричном случае и при использовании сильно асимметричных отражений.

Mo $K\alpha_1$ -излучение, съемки на уровне 10% от амплитуды максимума на левом склоне кривой отражения, поверхность образца параллельна (111). а - почти симметричный случай $g - [-351]$, $b \sim 1.09$; б - $g - [-153]$, $b \sim 2.29$; в - $g - [-51-3]$, $b \sim 0.44$.

(вдоль плоскостей 111) оси роста вырезали образцы толщиной 300 мкм. Съемки проводили в геометрии Лауэ и Брэгга в излучении Mo $K\alpha_1$ или Cu $K\alpha_1$ для серии отражений $\{531\}$ и $\{444\}$ со значениями коэффициента асимметрии $b = \gamma_h/\gamma_0$ (γ_0 и γ_h - косинусы углов падения и отражения соответственно). Для получения плоской волны использовали кремниевые монохроматоры с

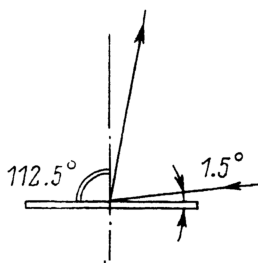
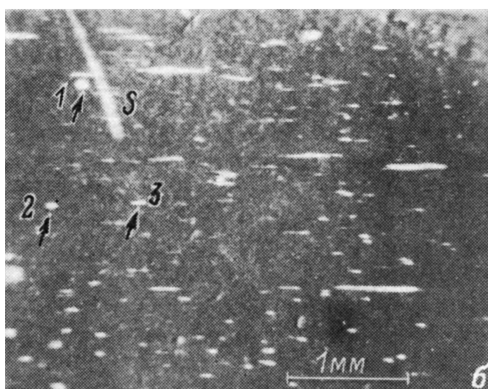
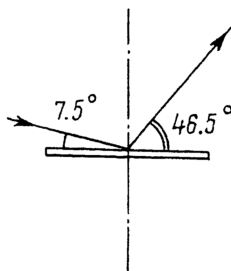
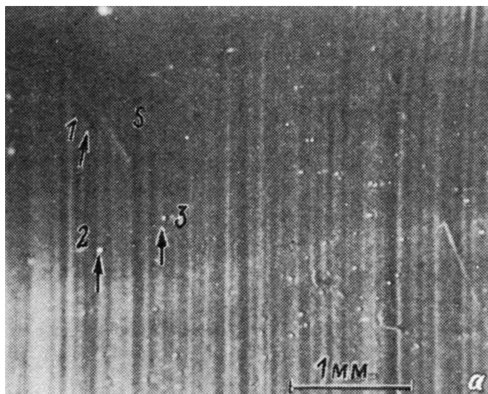


Рис. 2. Плоскостные изображения микродефектов, полученные в геометрии Брэгга при различной величине асимметрии.

a – $\text{Mo K}\alpha_1$ -излучение, g – [444], $b = 0.69$, угол скольжения $\Psi = 7.5^\circ$; *b* – $\text{Cu K}\alpha_1$ -излучение, g – [-315], $b = 0.38$, $\Psi = 1.5^\circ$. Топограммы сняты на уровне 50% от амплитуды максимума на левом склоне кривой отражения, поверхность образца параллельная (112).

$b \sim 50$. Разрешающая способность в вертикальном и горизонтальном направлениях составляла ~ 10 мкм.

Исследования проводили на прецизионном двухкристальном рентгеновском спектрометре, сконструированном и изготовленном в ИКАН СССР. Прибор оборудован электронной системой стабилизации углового положения образца для компенсации самопроизвольной разъюстировки в процессе съемки топограмм, происходящей главным образом из-за термических нестабильностей в рабочем помещении и вибраций здания. Точность поддержания рабочей точки на склоне кривой отражения (качания) составляет $\sim 1\%$ от интенсивности в максимуме.

Приведенные в этой работе экспериментальные топограммы представляют собой наиболее наглядные иллюстрации выводов, полученных в результате большого количества различных съемок.

Результаты

При съемке топограмм количество наблюдаемых микродефектов увеличивается при любом отклонении b от 1. На рис. 1 показаны три плоскостные топограммы одного и того же места кристалла, снятые напросвет (схема Лауэ). Топо-

грамма рис. 1, а получена в почти симметричной геометрии ($b = 1.09$). На ней видны царапины S_1 и S_2 , которые служат реперами, и изображения микродефектов 1–3. При съемке с асимметрией $b = 2.29$ (рис. 1, б) и 0.44 (рис. 1, в) размеры изображений большинства наблюдаемых микродефектов, как правило, увеличиваются и, кроме того, наблюдается значительное количество микродефектов, которые не были видны ранее. Отсюда можно заключить, что с ростом асимметрии чувствительность метода возрастает.

Можно убедиться на рис. 1, что при съемке с $b > 1$ и $b < 1$ выявляются разные микродефекты, за исключением наиболее крупных (1, 2), которые можно наблюдать при любой асимметрии. При этом, как правило, существенно изменяются и сами изображения микродефектов.

На рис. 2, а, б показаны две топограммы, полученные от одного и того же участка образца при отражении по Брэггу с различной асимметрией $b = 0.69$ (а) и 0.38 (б). Буквой S на топограммах обозначено изображение царапины, цифрами 1–3 — изображения некоторых из микродефектов, наблюдаемых на обеих топограммах одновременно. В этой геометрии также с ростом асимметрии съемки значительно увеличивается количество наблюдаемых микродефектов, расположенных в основном вблизи поверхности кристалла, значительно изменяются размеры и контраст их изображений.

На основе многочисленных наблюдений можно заключить также, что для $b < 1$ количество и размеры изображений наблюдаемых микродефектов (следовательно, и чувствительность) несколько выше, чем в случае $b > 1$ при одной и той же степени асимметрии (ср. б и в на рис. 1).

Обсуждение результатов и выводы

1. По-видимому, в наиболее значительной мере повышение чувствительности в случае асимметричной геометрии обусловлено релаксацией напряжений, создаваемых микродефектом, на свободной поверхности кристалла. Вклад релаксации напряжений у поверхности существен и в случае симметричной геометрии Брэгга [14], когда вектор g направлен вдоль нормали к поверхности образца. Слабее всего поверхностная релаксация напряжений сказывается в симметричной геометрии Лауэ, в этом случае вектор отражения g параллелен поверхности кристалла. При асимметричной съемке угол между поверхностью образца и вектором g лежит в интервале $0-90^\circ$, чем этот угол больше, тем выше чувствительность к деформациям решетки у поверхности кристалла.

2. Помимо поверхностной релаксации напряжений существует еще ряд факторов, приводящих к увеличению количества наблюдаемых изображений микродефектов в случае асимметричной съемки.

а) Уменьшение полуширины кривой отражения при $b < 1$ приводит к повышению чувствительности плосковолновой топографии, так как крутизна склонов кривой отражения возрастает.

б) С увеличением асимметрии пропорционально $\sqrt{(\gamma_0\gamma_h)}$ уменьшается длина экстинкции. Это обстоятельство определяет повышение чувствительности метода как в случае Лауэ, так и в случае Брэгга и позволяет выявлять более мелкие дефекты.

в) При $b > 1$ с возрастанием асимметрии пропорционально \sqrt{b} увеличивается длина когерентности, что также способствует повышению чувствительности метода.

3. Применение асимметричных съемок позволяет более детально, чем это было ранее возможно, анализировать изображения микродефектов и открывает возможности разрабатывать более точные их модели.

Для корректного определения параметров конкретных микродефектов требуется сопоставление экспериментальных топограмм с расчетными изображениями

этих микродефектов, синтезированными для тех же дифракционных условий.

4. Увеличение чувствительности схемы при асимметричных съемках, очевидно, целесообразно использовать при исследовании любых дефектов, возникающих вблизи поверхности кристаллов при росте или в процессе каких-либо воздействий.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В. Л. Инденбому и В. М. Каганеру за плодотворные обсуждения работы.

Список литературы

- [1] *Bernewitz L.J., Kolbesen B.O., Mayer K.R., Schuh G.E.* // *Appl. Phys. Lett.* 1974. Vol. 25. N 2. P. 277–279.
- [2] *Рейви К.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 472 с.
- [3] *Chikawa J., Asaeda Y., Fudjimoto I.* // *J. Appl. Phys.* 1970. Vol. 41. N 5. P. 1922–1925.
- [4] *Renninger M.* // *J. Appl. Cryst.* 1976. Vol. 9. N 2. P. 178–180.
- [5] *Renninger M.* // *J. Appl. Cryst.* 1981. Vol. 14. N 1. P. 59.
- [6] *Kohler R., Mohling W., Pasemann M.* // *Phys. Stat. Sol. (A).* 1979. N 2. P. 509–517.
- [7] *Kohler R., Mohling W.* // *Phys. Stat. Sol. (A).* 1983. Vol. 78. N 2. P. 489–496.
- [8] *Крылова Н.О., Ковьев Э.К., Шульпина И.Л.* // *ЖТФ.* 1983. Т. 53. Вып. 9. С. 1750–1753.
- [9] *Крылова Н.О., Мелинг В., Шульпина И.Л., Шейхет Э.Г.* // *ФТТ.* 1986. Т. 28. Вып. 3. С. 440–446.
- [10] *Indenbom V.L., Kaganer V.M.* // *Phys. Stat. Sol. (A).* 1985. Vol. 87. N 1. P. 253–265.
- [11] *Инденбом В.Л., Каганер В.М.* // *ДАН СССР.* 1985. Т. 282. N 3. С. 508–611.
- [12] *Крылова Н.О., Петрашень П.В., Шульпина И.Л.* // Тез. докл. III Всесоюз. совещания по когерентному взаимодействию излучения с веществом. М.: ВНИИФТРИ, 1985. С. 60.
- [13] *Каганер В.М., Крылова Н.О., Инденбом В.Л., Шульпина И.Л.* // *ФТТ.* 1986. Т. 28. Вып. 8. С. 2343–2351.
- [14] *Каганер В.М., Инденбом В.Л.* // *Кристаллография.* 1987. Т. 32. N 2. С. 297–304.

Институт кристаллографии

Москва

Поступило в Редакцию

12 марта 1991 г.

В окончательной редакции

11 августа 1991 г.