Известия НАН Армении, Физика, т.35, №2, с.100-105 (2000)

УДК 537.531

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СЛОЕВ МОНОКРИСТАЛЛОВ

А.О. АБОЯН, А.С. ТУМАСЯН

Государственный инженерный университет Армении

(Поступила в редакцию 18 февраля 1999 г.)

Исследована дифракция рентгеновских лучей в толстых совершенных монокристаллах с приповерхностными деформированными слоями. Предложен метод получения рентгенотопографических изображений этих слоев и определения их толщины.

1. Введение

В производственных (технологических) процессах при шлифовке, насаждении тонких пленок, имплантации и диффузии на поверхностях монокристаллов образуются тонкие деформированные слои, исследование (изучение структурного состояния и определение толщины) которых зачастую имеет важное научное и производственное значение.

Известен рентгенографический метод определения толщины приповерхностных деформированных слоев [1], заключающийся в том, что изучая распределение интенсивности падающего и отраженного пучков, оценивают толщину приповерхностного слоя, участвующего в отражении. Этот метод непрямой, трудоемкий и неточный.

Авторы работы [2] предложили способ определения профиля структурных искажений в поверхностном слое монокристалла, заключающийся в регистрации кривой дифракционного отражения монохроматического рентгеновского излучения от исследуемой поверхности монокристалла. При этом моделируется профиль распределения структурных нарушений в поверхностном слое кристалла, и с помощью ЭВМ по соответствующему моделированному профилю восстанавливается кривая с зарегистрированной кривой и производится коррекция моделированного профиля до совпадения указанных кривых. Дополнительно регистрируется кривая выхода электронов внешней фо-

тоэмиссии в зависимости от угла падения рентгеновского излучения и по моделированному профилю восстанавливается соответствующая кривая выхода электронов внешней фотоэмиссии. Коррекцию моделированного профиля осуществляют до одновременного совпадения восстановленных кривых дифракционного отражения и выхода электронов внешней фотоэмиссии с зарегистрированными кривыми.

Этот метод, основанный на одновременной регистрации пространственного распределения интенсивности электронов внешней фотоэмиссии, является очень сложным, трудоемким (вакуумная техника, послойная травка для повышения точности анализа фотоэмиссии, ЭВМ и пр.) и непрямым – он не дает дифракционного изображения дефектов и возможности прямого измерения толщины приповерхностных слоев, что усложняет или даже делает неприемлемым его применение при контроле технологических процессов, которому подвергаются кристаллы при производстве полупроводниковой техники.

Целью настоящей работы является разработка новой методики для изучения природы и определения толщины приповерхностных деформированных слоев совершенных толстых монокристаллов.

2. Методика эксперимента

Суть разработанного нами метода заключается в следующем. На исследуемую поверхность монокристалла кремния направляется монохроматический расходящийся пучок, полученный отражением от асимметричного кристалла-монохроматора, и регистрируется отраженный пучок, как показано на рис.1.

Согласно динамической теории рассеяния рентгеновских лучей в приближении сферической волны Като [3], интенсивность на поперечном сечении дифрагированной от совершенного кристалла волны в зависимости от μt (μ – коэффициент поглощения, t – толщина кристалла) дается кривыми, показанными на рис.2. Однако в случае толстых кристаллов с приповерхностными деформированными слоями интенсивность на поперечном сечении дифрагированной волны имеет пики на краях, отделенные пространственно от основной части (рис.1). В деформированных приповерхностных слоях происходит кинематическое рассеяние, а интенсивные боковые линии от этих слоев получаются в случае расходящегося падающего пучка [4].

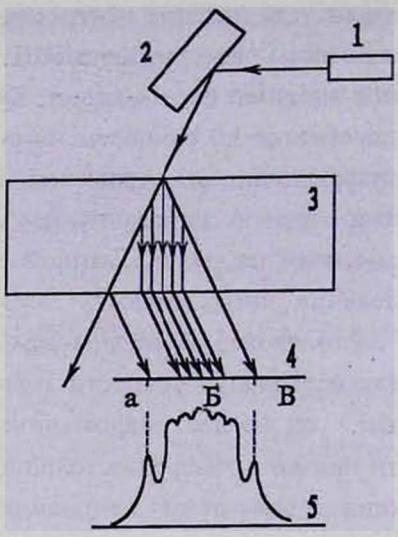


Рис.1. Схема экспериментальной установки для рентгенотопографических исследований деформированных приповерхностных слоев. 1 – рентгеновская трубка; 2 – кристалл-монохроматор; 3 – образец; 4 – фотопленка; 5 – распределение интенсивности рентгеновского излучения на фотопленке; а и в – тонкие линии на топограмме, обусловленные кинематическим рассеянием на приповерхностных нарушенных слоях; б – основной рефлекс, результат динамической дифракции в объеме кристалла [4].

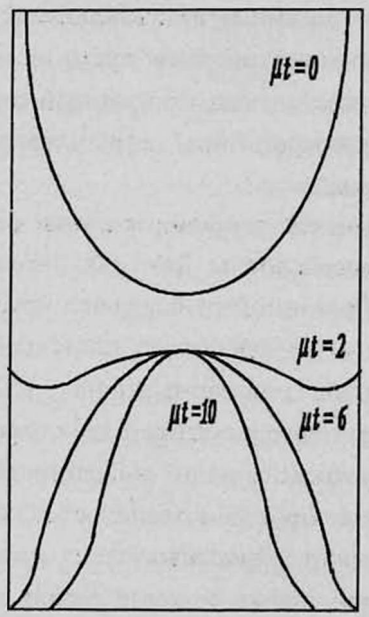
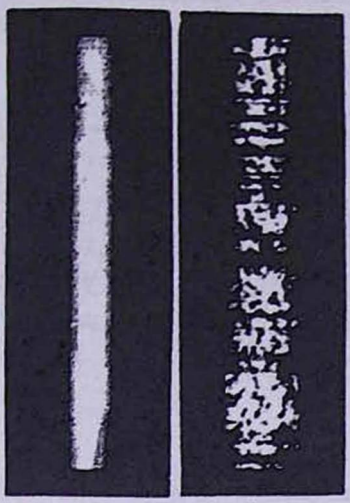


Рис.2. Распределение интенсивности по сечению отраженного пучка по Като для различных μt.

Для доказательства того, что тонкие линии на топограмме вызываются нарушениями приповерхностных слоев, сначала были сняты топограммы от совершенного монокристалла кремния, когда обе поверхности были протравлены (рис.3а), а затем – от того же кристалла после диффузии фосфора (рис.3б). Аналогичные опыты проведены для кристаллов кремния, подвергнутых диффузии бора и алюминия.



а б

Рис.3. Секционные топограммы, полученные от монокристалла кремния: a – обе поверхности протравлены; b – обе поверхности подвергнуты диффузии фосфором.

Секционные топограммы снимались для 220 отражения излучения MoK_α в симметричном случае Лауэ в топографической камере КРС.

3. Расчет толщины приповерхностного деформированного слоя

Для определения зависимости толщины тонкой боковой линии от толщины нарушенного слоя, рассмотрим ход лучей в образце (рис.4). Для ясности изображен лишь пучок "В" рис.1, дифрагировавший на нарушенном слое у входной поверхности кристалла.

При малой толщине нарушенного слоя (по сравнению с расстоянием от кристалла до фотопленки) пренебрегаем уширением в нем пучка, дающего на фотопленке изображение тонкой линии. В этом приближении ширина пучка на границе "нарушенный слой – совершенная часть", как видно из рис.4, определяется равенством

$$b = a + 2\delta \mathrm{tg}\theta, \qquad (1)$$

где a – ширина освещенной части поверхности, θ – угол Брэгга, δ – толщина нарушенного слоя.

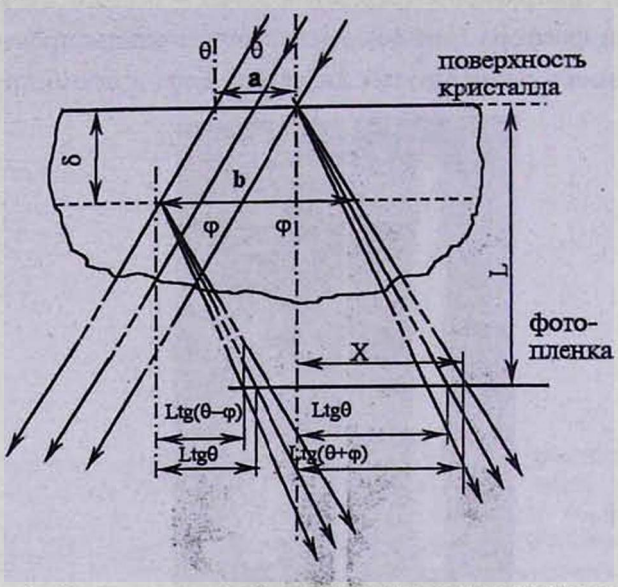


Рис.4. Схема для расчета толщины приповерхностного деформированного слоя.

В дальнейшем, в кристалле, пучок идущий от нарушенного слоя, не участвует в отражении. Из-за некоторого разброса мозаик нарушенного слоя и расходимости падающего излучения, этот пучок будет расходящимся, а его ширина на поверхности фотопленки, установленной параллельно поверхности кристалла на расстоянии L от него, будет

$$X = b + L[\delta \mathrm{g}(\theta + \varphi) - \mathrm{tg}\theta] + L[\mathrm{tg}\theta - \mathrm{tg}(\theta - \varphi)], \qquad (2)$$

где 2φ – расходимость пучка, X – ширина боковой линии на топограмме.

После несложных преобразований из (2) получаем:

$$X = a + 2\,\delta \mathrm{g}\theta + L \sin 2\varphi / \cos^2 \theta. \qquad (3)$$

Для определения толщины нарушенного слоя кристалла используется эталонный образец – кристалл из того же материала, поверхность которого подвергнута аналогичной обработке (диффузии, шлифовке, ионной имплантации и пр.), причем толщина нарушенного слоя его определяется каким-либо другим, в частности, нарушающим

целостность кристалла методом. Во всем остальном геометрия измерения остается неизменной. Тогда для эталонного образца имеем:

$$X_0 = a + 2\delta_0 \operatorname{tg}\theta + L \sin 2\varphi / \cos^2 \theta, \qquad (4)$$

где X_0 – ширина боковой линии на фотопленке, δ_0 – толщина нарушенного слоя эталонного образца.

Из (3) и (4) получаем:

$$\delta = (X - X_0)/2\operatorname{tg}\theta + \delta_0 . \qquad (5)$$

Как видно из формулы (5), мы можем найти толщины приповерхностных деформированных слоев, измерив ширины тонких боковых линий.

Таким образом, преимущество предлагаемого метода сводится к тому, что рентгенографические изображения деформированного состояния поверхностей получаются четко и раздельно от основного секционного изображения, что дает возможность исследовать и определить толщины приповерхностных деформированных слоев прямо, однозначно и с высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Y.Sakisaka, I.Sumato.** Proc. Math. Phys. Soc. Jap., **13**, 221 (1931).
2. **А.М.Афанасьев, Л.Д.Буйко, Р.М.Имамов, М.В.Ковальчук, В.Г.Кон, Э.Ф.Лобанович.** Способ определения профиля распределения структурных искажений в поверхностном слое монокристалла. А. с. СССР, №830206, 1981.
3. **N.Kato.** Acta geologica (Bratislava), **14**, 43 (1968).
4. **P.A.Bezirganyan, A.O.Aboyan, A.S.Tumasyan.** Cryst. Res. Technol., **23**, 893 (1990).

ՍԻՆՔՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ՄԵՐՋՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԴԵՖՈՐՄԱՑՎԱԾ ՇԵՐՏԵՐԻ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ՌԵՆՏԳԵՆԱԳՐԱԿԱՆ ԵՂԱՆԱԿ

Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ, Ա.Ս. ԹՈՒՄԱՍՅԱՆ

Հետազոտվել է մերձմակերևույթային դեֆորմացված շերտերով հաստ կատարյալ միաբյուրեղներում ռենտգենյան ճառագայթների դիֆրակցիան: Առաջարկված է այդ շերտերի ռենտգենատեղագրական պատկերները ստանալու և նրանց հաստությունը որոշելու եղանակ:

X-RAY GRAPHIC METHOD FOR DETERMINATION OF THICKNESS OF SUBSURFACE DEFORMED LAYERS IN SINGLE CRYSTALS

A.O. ABOYAN, A.S. TUMASYAN

The diffraction of X-rays in thick perfect single crystals with deformed subsurface layers is investigated. A method to obtain the X-ray topograms and to determine the thickness of these layers is proposed.