

АНГСТРЕМНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТРУКТУРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРИСТАЛЛА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

С.С.Якимов, В.А.Чапанов, А.М.Афанасьев, П.А.Александров¹⁾,
Р.М.Имамов, Л.А.Ломов²⁾

Продемонстрирована возможность анализа структуры тончайших приповерхностных слоев кристалла толщиной порядка нескольких межатомных расстояний. Впервые исследована структура поверхности кристалла Ge под пленкой (~1 мк) другого материала.

Традиционные рентген-дифракционные измерения дают возможность исследовать структуру слоев кристалла, сравнимую с глубиной экстинкции, которая, как правило, составляет величину от 1 до 10 мкм. При выходе из области брэгговских углов, рентгеновские лучи проникают в кристалл на существенно большие расстояния, определяемые обычным поглощением. Глубина такого проникновения составляет величину $10 \div 100$ мкм. Вместе с тем, глубина, с которой выходит чисто дифракционное излучение при брэгговском отражении, убывает по мере удаления от угла Брэгга $\Delta\theta$. Это позволяет, при определенных условиях, получать прямую информацию о структурном совершенстве тонких приповерхностных слоев. При использовании методики трехкристалльной рентгеновской спектрометрии¹ возможно значительное удаление от угла Брэгга, что обеспечивает исследование чрезвычайно тонких слоев кристалла.

В настоящей работе в монокристаллах Ge на трехкристалльном рентгеновском спектрометре была исследована зависимость интенсивности главного пика от угла отворота $\Delta\theta$ вплоть до углов $\sim 6000''$, что почти в 10^3 раз превосходит ширину брэгговского пика. Предел измерений по $\Delta\theta$ был существенно расширен за счет применения специальной системы накопления данных на базе многоканального анализатора. Такое расширение пределов измерений дает возможность фиксировать наружные слои толщиной в несколько ангстрем.

Типичные кривые представлены на рис. 1. Как видно из этого рисунка, несмотря на большие углы отворота, превосходящие полуширину брэгговского отражения почти на три порядка, дифракционный пик сохраняет свою форму, его уширение составляет всего лишь 10% по

1) ИАЭ имени И.В.Курчатова.

2) ИКАН имени А.В.Шубникова.

отношению к ширинам соответствующих пиков при малых углах отворота. На рис. 2 отложены зависимости $I(\Delta\theta)^2$ от $\Delta\theta$, где I — интенсивность (площадь) измеряемого пика. В идеальных кристаллах, где отсутствуют нарушения приповерхностных слоев, эта зависимость должна представлять собой прямую линию, отклонение от которой дает информацию о глубине переходного слоя. Из приведенных кривых видно, что по мере увеличения угла $\Delta\theta$ происходит резкое изменение величины $I(\Delta\theta)^2$.

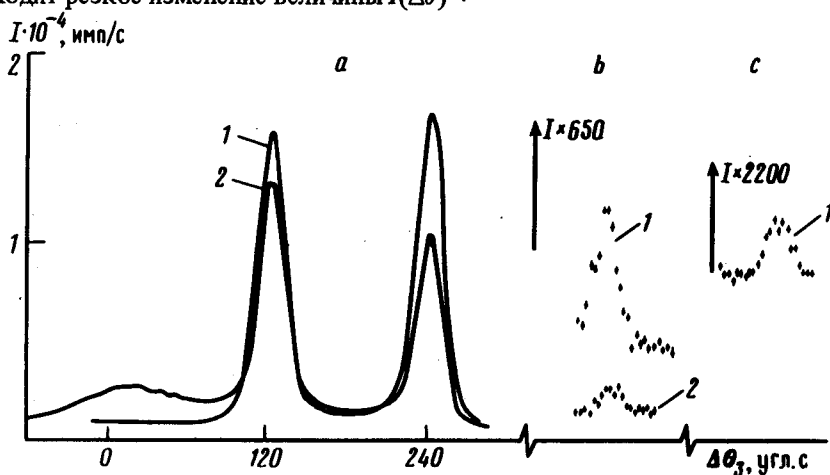


Рис. 1. Зависимость интенсивности отраженного от кристалла рентгеновского пучка от угла поворота кристалла анализатора $\Delta\theta_3$. Кривые 1 относятся к монокристаллу Ge (отражение [111]); кривые 2 к тому же образцу с напыленной пленкой Al, толщиной 1,2 мкм. Угол отворота для кривых a — $\Delta\theta = -120''$; b — $\Delta\theta = -4000''$; c — $\Delta\theta = -6000''$. Для кривых b и c приведены только главные пики

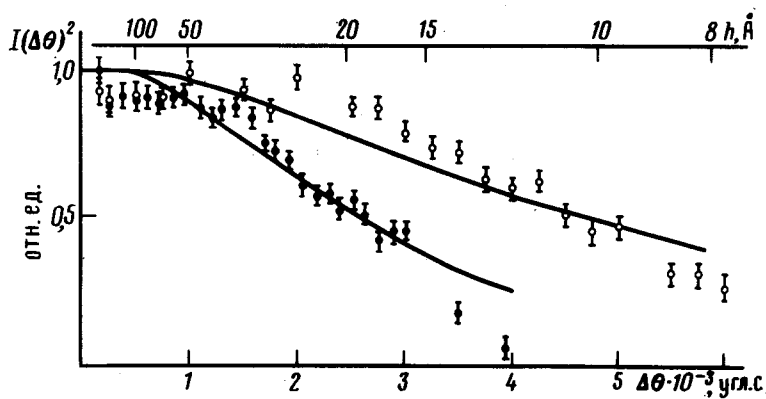


Рис. 2. Зависимость параметра $I(\Delta\theta)^2$ от угла поворота кристалла $\Delta\theta$. Верхняя шкала характеризует глубину анализируемого слоя в зависимости от $\Delta\theta$. Светлыми точками показаны экспериментальные данные для монокристалла Ge, темными — для того же образца с напыленной пленкой Al. Сплошные линии — теоретические кривые, рассчитанные по формуле (2) с наилучшими значениями параметров

Для оценки ширины переходного слоя использована следующая модель. Уменьшение рассеивающей способности кристалла определяется статическим фактором Дебая — Валлера $e^{-W(z)}$, где z — координата, отсчитываемая вглубь кристалла. Этот фактор аппроксимируется формулой

$$e^{-W(z)} = ae^{-\kappa z} + b. \quad (1)$$

При этом для функции $I(\Delta\theta)^2$ (нормированной на единицу при $\Delta\theta = 0$) имеет место следующее простое аналитическое выражение:

$$I(\Delta\theta)^2 = \frac{C(2+C)}{1 + (\kappa/\psi)^2} + 1, \quad (2)$$

где $\psi = (4 \pi \cos \theta_B \Delta \theta) / \lambda$, $\Delta \theta$ - угол поворота исследуемого кристалла, λ - длина волны рентгеновского излучения;

$$C = a/b = e^{\Delta W} - 1, \quad \Delta W = W(\infty) - W(0).$$

Параметр $l = 1/\kappa$ характеризует глубину переходного слоя. Варьированием параметров κ и C достигается наилучшее согласие экспериментальных и теоретических результатов.

Мы исследовали кристалл Ge с химико-механической полировкой и последующим глубоким полирующим травлением, а затем тот же кристалл с нанесенной на него пленкой Al толщиной $1,2 \pm 0,2$ мкм. Было установлено, что для исходного кристалла толщина переходного слоя составляет ~ 10 Å, а для кристалла с пленкой переходный слой увеличивается и составляет ~ 20 Å.

Это увеличение толщины переходного слоя можно объяснить частичным проникновением алюминия в кристалл Ge. Об ухудшении качества поверхностных слоев в этом случае свидетельствует также появление слабого диффузионного пика на кривых отражения.

Таким образом, в данном случае продемонстрирована возможность анализа структуры тончайших приповерхностных слоев кристалла вплоть до отдельных межатомных расстояний. Экспериментально реализована уникальная разрешающая способность, достигаемая в рентгеновском методе. Более того, показана возможность изучения слоев кристалла, покрытых толстыми пленками другого материала. Относительная простота эксперимента позволяет надеяться на его широкое практическое применение.

Литература

1. Eisenberger P., Alexandropoulos N.G., Platzman P.M. Phys. Rev. Lett., 1972, 28, 1519; Iida A., Kohra K. Phys. Stat. Solidi, a, 1979, 57, 533; Афанасьев А.М., Ковальчук М.В., Лобанович Э.Ф., Имамов Р.М., Александров П.А., Мелконян М.К. Кристаллография, 1981, 26, 28.

Поступила в редакцию
21 августа 1983 г.