

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
 2. Хейкер Д. М. Рентгеновская дифракто-

метрия монокристаллов. Л.: Машиностроение, 1973, 256 с.
 3. Okazaki A., Ohama N. — J. Appl. Cryst., 1979, v. 15, p. 450—454.

Поступила 2.08.1984 г.

УДК 531.717.1:539.26

Е. Н. КИСЛОВСКИЙ, В. П. КЛАДЬКО, А. В. ФОМИН, В. И. ХРУПА

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ НАРУШЕННЫХ СЛОЕВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РЕЗКЕ И ШЛИФОВКЕ НЕСОВЕРШЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Институт полупроводников АН УССР, Киев

Рентгеновские дифрактометрические методы определения толщины t_H нарушенного поверхностного слоя, основанные на эффекте Бормана [1—3], не применимы для контроля сильно искаженных (содержащих высокие концентрации объемных дефектов структуры) монокристаллов, так как эффект Бормана в кристаллической матрице подавлен. При контроле t_H этими методами даже в относительно совершенных образцах интенсивности дифракции не превышают уровень фона в случае больших (более 10 % толщины кристалла) t_H [1], возникающих, например, при резке кристаллов. Комбинация указанных рентгенодифракционных методов с послойным удалением нарушенной поверхности [4] требует больших затрат времени и подбора специальных медленных травителей для каждого материала.

В настоящей работе показана возможность преодоления недостатков указанных методов при дифракции рентгеновских лучей в условиях слабого поглощения ($\mu t \sim 1$, μ — нормальный коэффициент поглощения; t — толщина образца в направлении просвечивания). Рассмотрена методика расчета t_H из экспериментальных величин параметров дифракции, пригодная для определения толщин нарушенного слоя в несовершенных кристаллах в широком интервале изменения t_H .

Интенсивность Лауэ-дифрагированных пучков для кристалла с нарушенным поверхност-

ным слоем I_H может быть представлена в следующем виде [5]:

$$I_H = I_0 Q t_H \exp(-\mu t) + I_0 \exp(-\mu t_H), \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность падающего излучения, участвующего в дифракции; Q — средняя кинематическая рассеивающая способность единицы объема нарушенного слоя; I_0 — интенсивность дифрагированных пучков, отвечающая кристаллу без нарушенного слоя толщиной $(t - t_H)$. Очевидно, что при $\mu t \sim 1$ наличие в кристалле общей толщиной t нарушенного слоя толщиной t_H приведет к возрастанию интенсивности дифрагированных пучков на величину ΔI :

$$\Delta I = I_0 Q t_H \exp(-\mu t). \quad (2)$$

Используя соотношение (2), легко рассчитать значение t_H , если известны величины ΔI , Q , I_0 . Основная трудность при этом заключается в получении информации о величине Q , которая зависит от структуры нарушенного слоя. В первом приближении величину Q можно рассчитать, аппроксимируя структуру нарушенного слоя идеально-мозаичным кристаллом:

$$Q = c \pi^2 |\chi_{rh}|^2 (\lambda \sin 2\theta)^{-1}, \quad (3)$$

где c — фактор поляризации; χ_{rh} — действительная часть коэффициента Фурье восприимчивости кристалла; λ — длина волны рентгеновских лучей; θ — угол Брэгга.

Проведенные исследования показали, что указанный выше подход является обоснованным только для некоторых относительно хрупких материалов (Si, Cd, Sb), в которых наблюдается удовлетворительная корреляция значений t_H , рассчитанных с помощью соотношений (2, 3) и данных независимых измерений (табл. 1). В то же время для ряда более пластичных материалов (InSb, CdTe, $Cd_xHg_{1-x}Te$) такой корреляции не наблюдается.

Рассмотрим подход, позволяющий рассчитать значение t_H из экспериментальных величин интенсивностей дифрагированных пучков без знания величины Q , который может быть применен для исследования реальных кристаллов, содержащих произвольные концентрации объемных дефектов структуры и в случае относительно больших толщин нарушенного слоя. Для исключения неизвестной величины Q предлагается проводить измерения в длинноволновой (λ_1) и коротковолновой (λ_2) областях рентгеновского спектра вблизи K -края поглощения (λ_K) атомов элемента, входящего в состав исследуемого материала, где значения ряда параметров диф-

Таблица 1. Значения t_H , полученные при помощи предложенной методики расчета и метода Бормана [2, 3] в кристаллах Si и CdSb, шлифованных свободным абразивом с зернами различного диаметра d

Материал	μt	$Q, \text{ см}^{-1}$	$d, \text{ мкм}$	$t_H, \text{ мкм}$	
				Предложенный метод	Метод Бормана
Si	0,6 ($\lambda=0,709 \text{ \AA}$)	$12,5 \cdot 10^{-2}$	10	12	11
			20	18	19
			28	20	22
			60	24	23
CdSb	0,6 ($\lambda=0,464 \text{ \AA}$)	$3,4 \cdot 10^{-2}$	10	15	13
			20	27	25
			28	38	40

Таблица 2. Значения t_H в кристаллах CdTe

№ образца	$N_g, \text{см}^{-2}$	$\mu_{i1}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{i2}, \text{см}^{-1}$	$-\alpha, \text{имп/с}$	$\beta \cdot 10^2, \text{имп/с}$	$\gamma, \text{имп/с}$	$t_H, \text{мкм}$	
							Предложенный метод	Метод Бормана
1	$\sim 10^3$	6	14	0,24	0,45	1,64	68	60
2	$\sim 10^7$	53	129	0,05	1,00	0,18	73	—
3	$\sim 10^3$	6	14	4,55	7,06	5,95	16	14

ракции практически совпадают [6] ($c_1 \approx c_2$; $\chi r h_1 \approx \chi r h_2$; $\theta_1 \approx \theta_2$). Действительно, записав соотношение (1) для двух указанных областей рентгеновского спектра вблизи λ_H , получим систему уравнений

$$I_{Hj} = I_{0j} Q_j t_H \exp(-\mu_j t) + I_{cj} \exp(-\mu_j t_H); \quad (4)$$

$$j = 1, 2$$

Последняя с учетом того, что $I_c(t - t_H) = I_c(t) \exp(\mu_i t)$, где μ_i — интерференционный коэффициент поглощения рентгеновских лучей в кристаллической матрице, а $I_{01} \approx I_{02}$, $Q_1 \approx Q_2$; может быть преобразована в уравнения для определения t_H :

$$\alpha = \beta \exp[-t_H(\mu_1 - \mu_{i1})] - \gamma \exp \times [-t_H(-\mu_2 - \mu_{i2})], \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha = I_{H1} \exp(-\mu_2 t) - I_{H2} \exp(-\mu_1 t);$$

$$\beta = I_{c1} \exp(-\mu_2 t); \quad \gamma = I_{c2} \exp(-\mu_1 t).$$

Таким образом, определив экспериментально параметры дифракции α , β , γ , μ_{i1} , μ_{i2} , на основании соотношения (5) легко рассчитать величину t_H .

Проверка предложенной методики осуществлялась на кристаллах CdTe ($t \approx 600$ мкм), содержащих дислокации различной плотности N_g . По данным метода избирательного травления и рентгеновской топографии значения N_g составляли соответственно $\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$ для образцов № 1 и № 3 и 10^7 см^{-2} для образца № 2 (табл. 2). Нарушенный слой создавался в процессе резки кристаллов при одинаковом режиме (образцы № 1, № 2) или шлифовкой абразивным порошком (образец № 3) с диаметром зерна 10 мкм. Измерения интенсивности дифрагированных пучков проводились по известной методике [6] вблизи K -края поглощения атомов Cd ($\lambda_K = 0,464 \text{ \AA}$; $\lambda_1 = 0,475 \text{ \AA}$; $\lambda_2 = 0,454 \text{ \AA}$; ширина спектрального окна $\Delta\lambda = 0,02 \text{ \AA}$) на однокристалльном спектрометре, собранном на базе установки УРС-2.0 (трубка с молибденовым анодом).

Экспериментальные значения нормальных коэффициентов поглощения для λ_1 и λ_2 составляли соответственно 60 и 156 см^{-1} . Регистрировались отражения типа 220.

Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 2. Видно, что с помощью предложенной методики получены разумные значения t_H для всех образцов. Данные для образцов № 1 и № 2, как и следовало ожидать, близки между собой. Значения t_H для образцов № 1 и № 3 удовлетворительно согласуются с данными независимых измерений. Отметим, что для образца № 2 определить t_H с помощью известных рентгенодифракционных методов не удалось.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности рентгеновских методов контроля t_H , основанных на Лауэ-дифракции рентгеновских лучей в условиях слабого поглощения, и о корректности предложенной методики определения t_H в сильно искаженных монокристаллах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даценко Л. И., Короткевич Н. Ф. — Украинский физический журнал, 1973, т. 18, № 1, с. 145—152.
2. Мельничук И. В., Никулица В. Г., Раренко И. М. — Украинский физический журнал, 1975, т. 20, № 1, с. 117—120.
3. Гуреев А. Н., Прокопенко И. В. — Заводская лаборатория, 1979, № 6, с. 536—538.
4. Карбань В. И., Кой П., Рогов В. В. и др. — В кн.: Обработка полупроводниковых кристаллов. Киев: Наукова думка, 1982, с. 221—224.
5. Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. М.: ИЛ, 1950. 572 с.
6. Скороход М. Я., Даценко Л. И., Гуреев А. Н. и др. — Украинский физический журнал, 1970, т. 15, № 5, с. 787—795.