

- [1] Панин Б. В. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 313—323.
 [2] Молчанов В. А., Сошка В. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 3. С. 963.
 [3] Витенский И. С., Парилис Э. С. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1798—1803.
 [4] Balashova L. L., Dodonov A. J., Firsov O. B. et al. // Rad. Eff. 1983. Vol. 77. P. 67—77.
 [5] Радциг А. А., Смирнов В. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980.

Поступило в Редакцию
23 мая 1988 г.

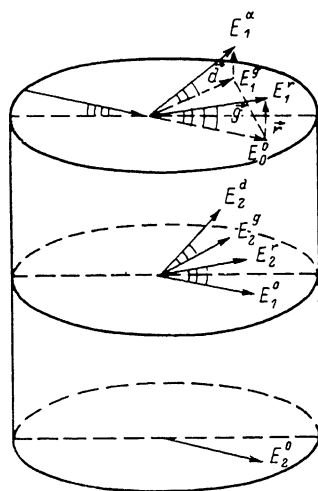
01: 07

Журнал технической физики, т. 59, в. 11, 1989

О ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЕ В СКОЛЬЗЯЩЕЙ ГЕОМЕТРИИ

В. И. Пунегов, А. В. Ладанов

Впервые схема рентгеновской дифракции на кристалле в скользящей геометрии (СГ) теоретически рассмотрена в работе [1]. Автором получены решения для амплитуд зеркально отраженной и дифрагированной волн, а также указано на существование двух критических углов скольжения, при которых интенсивность зеркально отраженных волн резко изменяется. Экспериментально данная схема дифракции впервые была реализована в работе [2] для исследования тонких монокристаллических пленок Al, полученных молекулярно-лучевой (эпитаксией на подложке GaAs.



Дальнейшее развитие теории дифракции в СГ отражено в работе [3] и обзорах [4, 5]. В связи с широким применением в микро- и оптоэлектронике многослойных кристаллов (гетероструктур, сверхрешеток, материалов в пленочном исполнении и т. д.) стали интенсивно использоваться новые рентгенодифракционные методы их исследования, в частности дифракция в СГ [6]. В настоящее время теория дифракции

Схема дифракции в скользящей геометрии на бикристалле.

$E_i^{\alpha}, E_i^{\beta}, E_i^{\gamma}, E_i^{\delta}$ ($i=1, 2$) — амплитуды падающей, зеркально отраженной, дифрагированной по Лауэ, зеркально отраженной дифрагированной волн.

в СГ развита только для идеального кристалла, кристалла с аморфной и кристаллической пленкой [3-5, 7].

Цель данной работы — теоретически рассмотреть дифракцию в СГ применительно к многослойным кристаллам, построить алгоритм расчета амплитудных коэффициентов отражения (АКО) и прохождения (АКП) многослойной системы для сопоставления с экспериментальными данными.

Рассмотрим наиболее общий подход к проблеме, полагая, что коэффициенты отражения и прохождения рентгеновских лучей для любого отдельно взятого, например n -го, слоя известны [3-5]. $\rho_n^{\alpha}, r, \vartheta$ — АКО в направлении зеркально отраженной дифрагированной (ЗОД) волны, зеркально отраженной (ЗО) волны, дифрагированной по Лауэ (D) волны соответственно; $\rho_n^{-r}, -d, -\vartheta$ — АКО для векторов рассеяния $(-r)$, $(-d)$ и $(-\vartheta)$; $\tau_n, \tau_n^{-r}, -d, -\vartheta$ — АКП в направлении падающей, ЗО, ЗОД, D -волн соответственно. Используя формализм дарвиновского суммирования волн [8], рассмотрим дифракцию в СГ на бикристалле, при этом $n=1, 2$ (см. рисунок).

С учетом граничных условий для геометрии, представленной на рисунке, имеем следующие уравнения для волн, входящих из первого (верхнего) кристалла:

$$\begin{aligned} E_1^r &= \rho_1^r E_0^0 + \tau_1^r E_2^s, \\ E_1^q &= \rho_1^q E_0^0 + \tau_1^q E_2^s, \\ E_1^d &= \rho_1^d E_0^0 + \tau_1^d E_2^s, \\ E_1^s &= \tau_1^s E_0^0 + \rho_1^s E_2^s. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения для волн, выходящих из второго (нижнего) кристалла, имеют вид

$$\begin{aligned} E_2^s &= \rho_2^s E_1^q, \quad E_2^q = \rho_2^q E_1^q, \\ E_2^d &= \rho_2^d E_1^q + \tau_2^d E_1^s, \\ E_2^0 &= \tau_2^0 E_1^q + \rho_2^0 E_1^s. \end{aligned} \quad (2)$$

Решая совместно системы (1), (2), полагая, что амплитуда падающей волны $E_0^0 = 1$, находим для бикристалла $R_2^s = E_1^r$ (АКО ЗО волны), $R_2^q = E_1^q$ (АКО ЗОД волны), $R_2^d = E_1^d$ (АКО D -волны), $T_2 = E_2^0$ (АКП).

В случае, когда рассматривается дифракция на N -слоynom кристалле (нумерация слоев снизу вверх), расчет АКО и АКП выполняется по следующей схеме: сначала вычисляются коэффициенты отражения и прохождения двух самых нижних слоев по формулам для бикристалла, затем полученные результаты используются для вычисления АКО и АКП трех нижних слоев, и т. д.

Для N -слоynого кристалла вычисления АКО и АКП проводятся по следующим рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned} R_N^r &= \rho_N^r + \tau_N^r \cdot R_{N-1}^r \cdot \xi_N, \\ R_N^q &= \rho_N^q + \tau_N^q \cdot R_{N-1}^q \cdot \xi_N, \\ R_N^d &= \rho_N^d \cdot T_{N-1}^d + (R_{N-1}^d + \rho_N^d \cdot R_{N-1}^d \cdot T_{N-1}^d) \cdot \xi_N, \\ T_N &= \rho_N^0 \cdot R_{N-1}^0 + (T_{N-1}^0 + \rho_N^0 \cdot R_{N-1}^0 \cdot T_{N-1}^0) \cdot \xi_N, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\xi_N = \tau_N \cdot (1 - \rho_N^r R_{N-1}^r)^{-1},$$

R_{N-1} и T_{N-1} — АКО и АКП $(N-1)$ -слоев кристалла.

В заключение отметим, что при выводе рекуррентных соотношений мы не накладывали никаких ограничений на структуру отдельных слоев, поэтому полученные результаты имеют практическую ценность для расчетов кривых зеркального и зеркального дифракционного отражения не только от дискретно-, но и непрерывно-слоистых кристаллических структур.

Список литературы

- [1] Барышевский В. Г. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. С. 112—116.
- [2] Magga W. C., Eisenberger P., Cho A. Y. // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. P. 6927—6933.
- [3] Афанасьев А. М., Александров П. А., Имамов Р. М. Рентгеновская структурная диагностика в исследовании приповерхностных слоев монокристаллов. М.: Наука, 1986. 96 с.
- [4] Андреев А. В. // УФН. 1985. Т. 145. № 1. С. 113—136.
- [5] Андреева М. А., Борисова С. Ф., Степанов С. А. // Поверхность. 1985. № 4. С. 5—26.
- [6] Golovin A. L., Pietsch U. // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. Vol. 96. P. K111—K115.
- [7] Александров П. А., Степанов С. А. // Поверхность. 1986. № 6. С. 117—120.
- [8] Darwin C. G. // Phil. Mag. 1914. Vol. 27. P. 675—690.

Симктывкарский государственный университет
им. 50-летия СССР

Поступило в Редакцию
22 декабря 1988 г.