

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИИ ТОЛЩИН СЛОЕВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.В. Антонов, Н.В. Галанов, А.И. Исаков, В.И. Микеров.

УДК 539.125.5

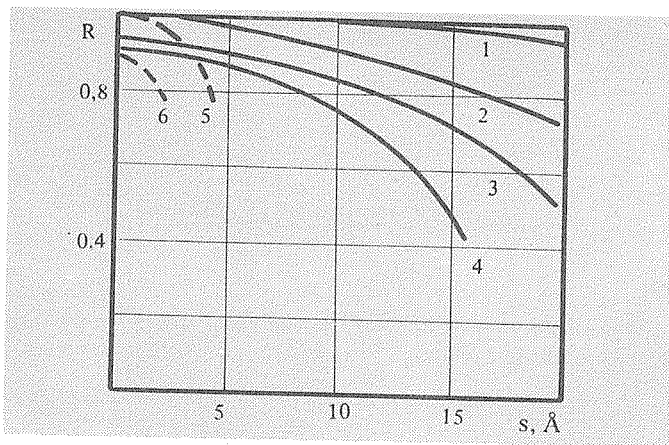
Проведен анализ влияния дисперсии толщин слоев многослойных интерференционных систем на величину коэффициента отражения в рефлексах. Рассмотрена возможность подавления рефлексов высоких порядков введением соответствующей дисперсии.

Многослойные интерференционные системы (МИС) находят все более широкое распространение в рентгеновской и ядерной физике в качестве монохроматоров, поляризаторов, элементов зеркальной оптики, покрытий нейтроноводов [1-6].

Квазипериодическое изменение ядерного потенциала в МИС обуславливает зонную структуру, проявляющуюся в наличии разрешенных и запрещенных зон для падающего излучения. Для отраженного излучения это приводит к появлению рефлексов. Задача создания МИС с заданными характеристиками — положением рефлексов, их шириной, коэффициентами отражения в них — требует анализа влияния различных технологических факторов. При изготовлении МИС путем послойного осаждения двух веществ на подложку к таким факторам относятся прежде всего те, которые влияют на совершенство профиля потенциала: шероховатость поверхности подложки, остроконечность осажденных слоев, неравнотолщинность слоев, взаимная диффузия веществ, образование промежуточных фаз на границах слоев. При отсутствии перечисленных факторов потенциал взаимодействия излучения с МИС имеет вид потенциала Кронига — Пенни.

В настоящей работе анализируется влияние дисперсии толщин слоев МИС на коэффициент отражения R в рефлексах. Используется численный метод расчета, основанный на рекуррентных соотношениях [7], полученных при решении уравнения Шредингера с потенциалом Кронига — Пенни для нейтронов. Предполагалось, что распределение толщин слоев следует нормальному закону с соответствующим математическим ожиданием $d/2$ и дисперсией s . Величина R определялась усреднением по 15 выборкам максимального коэф-

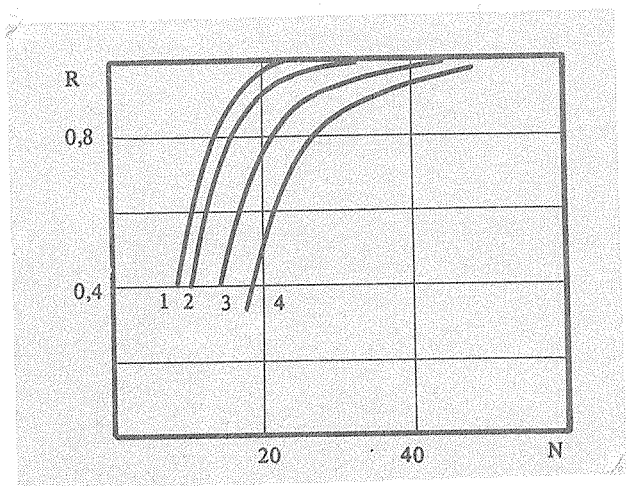
коэффициента отражения в рефлексе. Расчет проводился для МИС на основе изотопов никеля ^{58}Ni — ^{62}Ni с периодами $d = 50$ и 100 \AA . Эта пара материалов характеризуется максимальным "размахом" потенциала и в связи с этим обеспечивает по сравнению с другими парами при прочих равных условиях наибольшее значение R . Указанные периоды соответствуют используемым в настоящее время МИС.



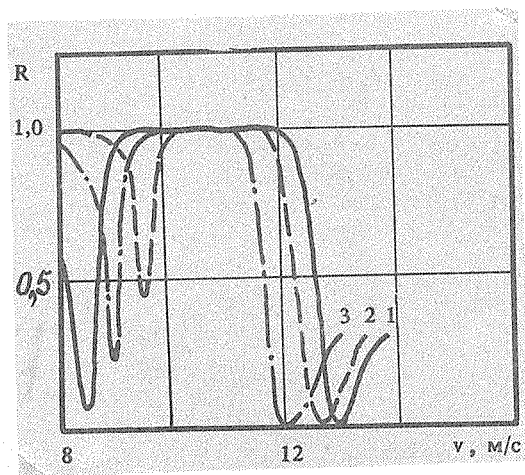
Р и с. 1. Зависимость максимального коэффициента отражения в первой запрещенной зоне от дисперсии толщин слоев. Структура ^{58}Ni — ^{62}Ni , $d = 100 \text{ \AA}$, $N = 40$ (1), 30 (2), 20 (3), 15 (4); $d = 50 \text{ \AA}$, $N = 100$ (5), 50 (6).

На рис. 1 представлены результаты расчета зависимости $R(s)$ для $d = 50$ и 100 \AA и разного числа пар слоев N в структурах. Видно, что влияние дисперсии зависит от периода структуры. Одна и та же величина относительной дисперсии приводит к существенно бóльшим изменениям R при меньших периодах. При $d = 100 \text{ \AA}$, $N = 40$ введение дисперсии $0,2d$ уменьшает коэффициент отражения R на 7%. В то же время при $d = 50 \text{ \AA}$ и $N = 50$ дисперсия $0,04d$ уменьшает R на 18%.

Влияние дисперсии может скомпенсировано увеличением числа пар слоев. Из рис. 2 видно, что при реальной величине дисперсии (порядка нескольких ангстрем) коэффициент отражения может быть близок к единице. Заметим, что в случае рентгеновского излучения это невозможно из-за большой величины мнимой части диэлектрической проницаемости. Проведенные расчеты позволили выяснить влияние дисперсии на структуру рефлексов. Относи-



Р и с. 2. Зависимость максимального коэффициента отражения в первой запрещенной зоне от числа пар слоев. Структура $^{58}\text{Ni} - ^{62}\text{Ni}$; $d = 100 \text{ \AA}$, $s = 0$ (1), 5 \AA (2), 10 \AA (3), 15 \AA (4).



Р и с. 3. Первая запрещенная зона. Структура $^{58}\text{Ni} - ^{62}\text{Ni}$; $d = 200 \text{ \AA}$, $N = 7$, $s = 0$ (1), 20 \AA (2), 40 \AA (3).

тельно малая величина дисперсии сказывается прежде всего на краях рефлексов. При увеличении дисперсии провалы в зависимости R от нормальной компоненты скорости нейтрона v проникают в глубь рефлексов (рис. 3), в результате чего дисперсия сказывается не только на величине R , но и на эффективной ширине рефлекса. Существенно, что влияние дисперсии начинает сказываться раньше на рефлексах более высоких порядков. В связи с тем, что рефлексы высоких порядков являются иногда нежелательными, возникает вопрос о возможности их эффективного подавления введением дисперсии толщин слоев. Заметим, что амплитуды рефлексов четных порядков при равных толщинах слоев в периоде значительно меньше (обычно на один-два порядка) амплитуд нечетных рефлексов, а амплитуды рефлексов выше третьего порядка могут быть подавлены уменьшением числа пар слоев. В связи с этим для такой структуры имеет смысл рассматривать рефлексы первого и третьего порядков. Расчет показывает, что отношение амплитуд этих рефлексов существенно зависит от числа периодов структуры. Так, при $d = 100 \text{ \AA}$ ($d_1 = d_2 = d/2$) и $N = 20$ отношение коэффициентов отражений третьего и первого рефлексов $R_3/R_1 = 0,417$, а при $N = 7$ $R_3/R_1 = 0,074$ (структура $^{58}\text{Ni} - ^{62}\text{Ni}$). При этом необходимо учитывать также значительное уменьшение ширины рефлексов с увеличением их порядка. Были проведены расчеты интегральных коэффициентов отражения в этих рефлексах с

учетом спектра нейтронов. Рассчитывалась величина $c = \int_{v_1}^{v_2} R(v)\Phi(v)dv$ с функцией распределения по спектру $\Phi(v) \sim v^3$. Зависимость $R(v)$ рассчитывалась исходя из параметров структуры: потенциалов барьера и ямы, числа периодов, ширины барьера и ямы. Интервал v_1, v_2 выбирался таким, чтобы в него попадала первая (расчет c_1) или третья (расчет c_3) зоны. Для сравнения была рассчитана величина $\tilde{R} = \int_{v_1}^{v_2} R(v)dv$. (табл. 1).

Результаты расчета показывают, что в рассматриваемых МИС при учете спектра $\Phi(v) \sim v^3$ значительно понизить отношение интенсивностей отражений третьего и первого порядков за счет разброса толщин слоев не удастся, но уменьшить это отношение можно за счет выбора материалов. Это отношение уменьшается с уменьшением размаха потенциала $\Delta U = U_{\text{б}} - U_{\text{я}}$, где $U_{\text{б}}$ и $U_{\text{я}}$ — потенциалы соответственно барьера и ямы. Дисперсия $s = 0,05d$ для периода $d = 160 \text{ \AA}$ приводит к деформации третьего рефлекса, но на величине отношения интенсивностей сказывается мало, хотя отношение коэффициентов отражения для малого числа пар слоев может быть очень малым.

Результаты расчета амплитуд, усредненных и интегральных значений R

Число периодов	R_3/R_1 $s = 0$	\tilde{R}_3/\tilde{R}_1 $s = 0$	$\tilde{\tilde{R}}_3/\tilde{\tilde{R}}_1$ $s = 0,05d$	c_3/c_1 $s = 0$	c_3/c_1 $s = 0,05d$
Структура ${}^{58}\text{Ni} - {}^{62}\text{Ni}$, $d = 160 \text{ \AA}$					
20	0,417	0,095	0,085	2,48	2,27
7	0,074	0,038	0,036	1,0	0,83
Структура $\text{Be} - \text{Ti}$, $d = 160 \text{ \AA}$					
20	0,148	0,048	0,037	1,2	1,0
7	0,027	0,021	0,015	0,5	0,48

В связи с приведенными данными следует обратить внимание на ограниченную применимость результатов, полученных на основе формул кинематической теории /8/, указывающих на возможность подавления высших рефлексов введением дисперсии в толщины слоев. Мы полагаем, что этот вопрос требует более тщательного анализа. Очевидно, что хорошо сформированные ($R \sim 0,5 \div 1$) рефлексы высоких порядков могут быть использованы при разработке монохроматоров и элементов зеркальной оптики.

В заключение заметим, что экспериментальные значения R для изготовленных нами МИС с $d \leq 100 \text{ \AA}$ на основе ${}^{58}\text{Ni} - {}^{62}\text{Ni}$, $\text{Be}-\text{Ti}$ оказываются меньше рассчитанных с учетом дисперсии толщин слоев. Это означает, что дисперсия для таких МИС не является определяющим параметром и для объяснения наблюдаемого расхождения требуется учет влияния других факторов.

Поступила в редакцию 6 июня 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 20, в. 9, 632 (1974).
2. Schoenborn В.Р., Caspar D.L.D., Kammerer O.F. J. Appl. Cryst., 7, 508 (1974).
3. Лукасов А.Г. и др. ЖЭТФ, 77, 1720 (1979).
4. Ebisawa T. et al. J. Nucl. Sci. and Technol., 16, № 9, 647 (1979).
5. Антонов А.В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 51, (1981).
6. Антонов А.В. и др. Монохроматор нейтронов. Авторское свидетельство № 513571, с приоритетом от 23.04.1974 г., Бюллетень изобретений, № 13, 251 (1984).
7. Антонов А.В. и др. Труды ФИАН, 94, 94, М., (1977).
8. Sears V.F. Acta Cryst., A 39, 601 (1983).