

ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых  
технологиях" при ФТИ им. А.Ф. Иоффе

## **ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ И РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ**

*Методические указания к лабораторным работам  
по диагностике материалов*

### **Оглавление:**

Происхождение рентгеновского излучения	3
Физические основы рентгеновской дифрактометрии	4
Физические основы рентгеновской рефлектометрии	5
Оборудование для проведения измерений	6
Возможности XRD и XRR	9
Получение рентгеновских кривых	10
Определение толщины и состава эпитаксиального слоя	11
Рентгеновская дифрактометрия структур со сверхрешетками	13
Определение толщины слоя и периода многослойной структуры	14
а) Тонкий слой на подложке	14
б) Периодическая многослойная структура	15
Контрольные вопросы	17

## Происхождение рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение на шкале длин электромагнитных волн расположено между  $\gamma$ -лучами и ультрафиолетовой частью спектра. Оно возникает в результате замедления заряженных частиц (при бомбардировке вещества быстро летящими электронами).

Различают два вида рентгеновских спектров - непрерывный (тормозной) и линейчатый (характеристический). Наличие непрерывного спектра является следствием неупругого торможения ускоренных электронов мишенью.

Линейчатый, или характеристический спектр возникает при поглощении атомом порции энергии достаточной для возбуждения одного из внутренних электронов. Атом возвращается в невозбужденное состояние путем самопроизвольного заполнения вакансии электроном с внешнего уровня. Избыток энергии выделяется в виде кванта рентгеновского излучения с энергией равной разности энергий электрона на внешнем и вакантном уровнях. При выбивании электрона, например с К-уровня возможен переход электронов с L-уровня (появляется  $K\alpha$ -излучение) или с M-уровня (появляется  $K\beta$ -излучение). При этом получается наиболее коротковолновая К-серия рентгеновского спектра (Рис. 1).

$K\alpha$ -линия является дублетом, состоящим из  $K\alpha_1$ -линии и  $K\alpha_2$ -линии с разделением  $10^{-3}$ .

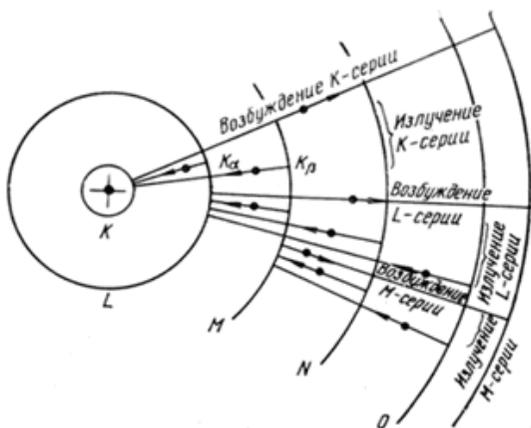


Рис. 1. Схема возникновения характеристических рентгеновских лучей (модель Бора, радиусы орбит даны не в масштабе)

Значения длин волн основных линий К-серии меди (Cu):  $\lambda(K\alpha_1) = 1.5405 \text{ \AA}$ ,  $\lambda(K\alpha_2) = 1.5443 \text{ \AA}$ ,  $\lambda(K\beta) = 1.3922 \text{ \AA}$ .

## Физические основы рентгеновской дифрактометрии

### Условие возникновения дифракции в кристалле, закон Брэгга-Вульфа

Рентгеновская дифрактометрия (рентгенодифракционный анализ, XRD – X-ray diffractometry) основана на способности рентгеновских лучей отражаться от плоских сеток, образованных атомами в кристаллической решетке материала. Это приводит к возникновению дифракционных отражений (дифракционных максимумов), каждое из которых характеризуется определенным межплоскостным расстоянием и интенсивностью. Возникновение дифракции происходит согласно закону Брэгга-Вульфа.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

где  $n$  – целое число, описывающее порядок дифракционного отражения,  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – межплоскостное расстояние между отражающими плоскостями,  $\theta$  – угол, который составляет падающий или дифрагированный луч с отражающей плоскостью.

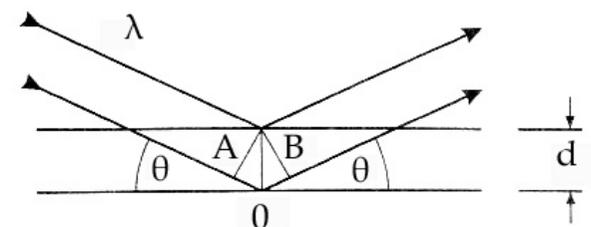


Рис. 2. Дифракция плоской волны.

Вывод закона Брэгга-Вульфа можно понять с помощью Рис. 2, на котором показана схема образования интерферирующих лучей. Сильное отражение получается в случае, когда углы  $\theta$  падения и отражения равны друг другу и разность хода  $AOB$  между двумя лучами равна  $n\lambda$ , т.е. целому числу длин волн.

Важно отметить, что дифракционное отражение даже в случае дифракции плоской волны от идеального и неограниченного кристалла существует не в бесконечно узкой области углов, а

захватывает конечный угловой диапазон. Величина этого диапазона называется шириной кривой качания.

Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия (HRXRD) позволяет работать с пучками рентгеновских лучей, имеющих угловую ширину 1-20 угловых секунд - близкую к теоретической ширине кривой качания от совершенного кристалла. Этот метод используется для анализа структур, обладающих высоким структурным совершенством, например, эпитаксиальных гетероструктур на основе полупроводниковых соединений.

### Физические основы рентгеновской рефлектометрии

#### Критический угол полного внешнего отражения

Для исследования образца методом рентгеновской рефлектометрии (XRR – X-ray reflectometry) не требуется наличие кристаллической решетки, поскольку XRR основана на рассеянии рентгеновских лучей на градиенте плотности. При этом измерение интенсивности отраженного сигнала как функции угла падения производится в области малых углов. В литературе этот рентгеновский метод традиционно описывают в терминах оптической физики.

Рассмотрим преломление рентгеновского пучка на границе раздела вакуум/образец. После применения закона Снеллиуса получаем:

$$\frac{\cos(\alpha_i)}{\cos(\alpha_t)} = \frac{n}{n_0} \quad (2)$$

где  $\alpha_i$ ,  $\alpha_t$  – углы падения и преломления соответственно, а  $n$  и  $n_0$  – показатели преломления материала образца и вакуума.

Поскольку вещественная часть коэффициента преломления рентгеновского излучения меньше единицы в любой среде, то существует критический угол  $\alpha_c$ , для которого  $\alpha_t$  обращается в нуль. Пренебрегая поглощением, запишем коэффициент преломления в среде ( $n_0 = 1$  для вакуума):

$$n \cong 1 - \delta = \frac{\cos(\alpha_i)}{\cos(\alpha_t)} \quad (3)$$

где  $\delta$  – малая поправка, определяющая отклонение коэффициента преломления от единицы.

Используя разложения косинуса при малых аргументах, получим:

$$\alpha_c \approx \sqrt{2\delta} = \lambda \sqrt{\frac{N_a r_e \rho}{\pi A} (Z + f')} \cong \sqrt{\rho \lambda} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $N_a$  – число Авогадро,  $r_e$  – классический радиус электрона,  $\rho$  – плотность материала,  $Z$  – атомный номер,  $f'$  – дисперсионная поправка,  $A$  – атомный вес. В случае сложного вещества в качестве трех последних параметров следует использовать средние величины с учетом атомных долей элементов, составляющих вещество.

В отличие от видимого света, для отражения рентгеновских лучей существует область полного отражения. Эта область соответствует падению рентгеновского пучка на образец под углом меньше  $\alpha_c$ . Этот угол называется критическим углом полного внешнего отражения.

### Оборудование для проведения измерений

#### Рентгеновские установки

Установки для рентгеновской дифрактометрии называются рентгеновскими дифрактометрами. Основными составляющими частями дифрактометра являются:

- Источник рентгеновского излучения
- Гониометр
- Детектор, регистрирующий дифрагированное излучение

В лабораторном источнике рентгеновского излучения электроны ускоряются напряжением около 45 кВ по направлению к твердой мишени, где они тормозятся в результате столкновения. Это приводит к образованию линейчатого спектра на фоне непрерывного (тормозного).

Наиболее распространенным лабораторным источником рентгеновских лучей является рентгеновская трубка. Источником электронов является катод – вольфрамовая спираль, нагреваемая электрическим током. При повышении температуры нити накала количество электронов, испускаемых катодом, возрастает, т.е. сила тока трубки зависит от температуры нити накала (тока накала трубки).

Рентгеновские трубки могут быть запаянными и разборными. На Рис. 2 приведена схема запаянной рентгеновской трубки.

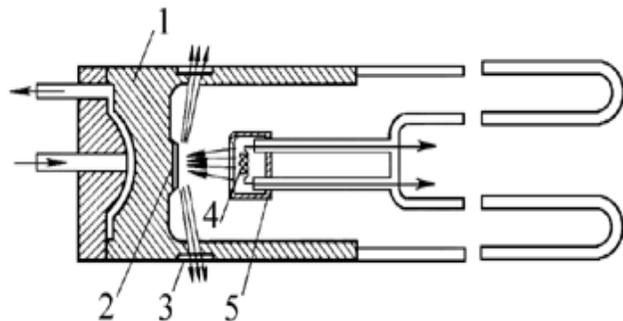


Рис. 2. Запаянная рентгеновская трубка состоит из стеклянного цилиндра, воздух из которого откачен до  $10^{-5} - 10^{-6}$  мм рт. ст., и электродов – анода и катода. Катод представляет собой вольфрамовую спираль 4, электрически соединённую с катодным фокусирующим колпачком 5. Заземлённый анод представляет собой металлическую пластинку 2, спаиваемую на массивное медное основание 1. В корпусе трубки напротив анода расположены окна 3 из слабо поглощающего материала для выхода рентгеновских лучей.

Материал анода определяет длину волны рентгеновского излучения. Наибольшее распространение получили медные аноды в силу высокой интенсивности и удобной длины волны, которая соизмерима с большинством межплоскостных расстояний. Кроме того, медную мишень легко охладить по причине ее высокой теплопроводности, и ее производительность ограничивается только отводом тепла. Охлаждение может быть воздушным, водяным или смешанным в сочетании с вращением анода для более эффективного рассеяния тепла.

Гониометр является основным узлом дифрактометра, на котором установлены детали (щели, монохроматор, держатель образцов), создающие оптимальную геометрию для получения и регистрации дифракционной картины. Гониометр служит для приведения в движение держателя образцов и поворота приёмной щели детектора, а так же для точного отсчёта углов и расстояний. Ось гониометра  $\omega$  отвечает повороту (качанию) образца, ось  $2\theta$  отвечает повороту детектора.

Детекторами служат чаще всего пропорциональные или сцинтилляционные счётчики.

Помимо перечисленных составляющих дифрактометра, как правило, требуются дополнительные компоненты. В частности метод высокоразрешающей дифрактометрии подразумевает хорошую коллимацию и монохроматизацию рентгеновского пучка, для этого между источником и образцом и/или между образцом и детектором устанавливаются специальные оптические элементы. Простейшими оптическими элементами являются щели (системы щелей), ограничивающие угловую расходимость рентгеновского пучка.

Более сложные оптические элементы можно разделить на две группы: улучшающие качество пучка и увеличивающие его интенсивность. К первой относятся монохроматоры и анализаторы, уменьшающие угловую и/или спектральную расходимость рентгеновского пучка, падающего на образец и детектор соответственно. В частности, монохроматоры могут использоваться для того, чтобы исключить  $K_{\alpha 2}$ -линию. В результате, использование излучения только  $K_{\alpha 1}$  линии позволяет достигнуть спектральной расходимости  $\delta\lambda/\lambda \sim 10^{-4}$ . Ко второй группе относятся параболические или эллиптические зеркала, собирающие фотоны первичного пучка и отражающие их по направлению к образцу.

На Рис. 3 приведена схема типичного высокоразрешающего рентгеновского дифрактометра, использующегося для анализа эпитаксиальных структур.

Метод рентгеновской рефлектометрии может быть реализован на рентгеновском дифрактометре, позволяющем проводить измерения в области малых углов падения рентгеновского пучка на образец. При этом, для коррекции геометрического эффекта уменьшения площади засветки с увеличением угла падения дополнительно используется коллиматор с изменяемой апертурой КЕС (Knife Edge Collimator).

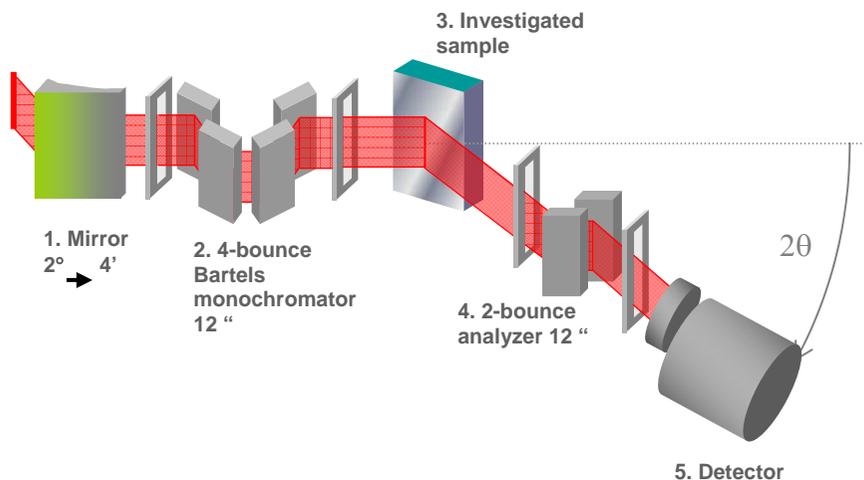


Рис. 3. Оптическая схема дифрактометра: 1. – зеркало Гёбеля, 2. – 4-х кратный Бартелевский монохроматор (расходимость пучка 12''), 3. – исследуемый образец, 4. – 2-кратный анализатор (расходимость пучка 12''), 5. – детектор

### Возможности XRD и XRR

Рентгеновская дифрактометрия позволяет анализировать поликристаллические и монокристаллические объекты, как в виде объемных материалов, так и в виде тонких пленок. Для каждого из этих двух типов материалов имеется определенный набор параметров, определяемых с помощью рентгенодифракционного анализа.

В поликристаллических объектах рентгеновская дифрактометрия позволяет определить:

1. фазы, составляющие смесь
2. параметры решетки отдельных соединений
3. размер областей когерентного рассеяния.

В монокристаллических образцах XRD дает возможность оценить следующие параметры:

1. ориентировка кристалла
2. параметр кристаллической решетки
3. толщины слоев
4. степень структурного совершенства (мозаичность, плотность дислокаций)

5. период сверхрешетки
6. состав твердого раствора
7. качество (гладкость) интерфейсов
8. напряжение решетки и степень релаксации.

Для оценки степени структурного совершенства используется *кривая качания*. Такие дефекты как мозаичность и дислокации приводят к дополнительному уширению кривой качания по сравнению с теоретической кривой качания от идеального кристалла. Кроме того, в величину полуширины экспериментальной кривой качания вносит вклад аппаратная функция дифрактометра.

Для определения параметров кристаллической решетки в направлении перпендикулярном поверхности (точнее, перпендикулярном кристаллографическим плоскостям, от которых происходит отражение) используется *дифракционная кривая*.

Рентгеновская рефлектометрия позволяет проводить исследование не только кристаллических, но и аморфных материалов. Этот метод дает возможность определить:

1. толщины слоев
2. профиль распределения плотности материала по глубине
3. среднеквадратичную амплитуду шероховатости интерфейсов.

Для этого используется *кривая рефлектометрии*.

### Получение рентгеновских кривых

Измерение кривой качания осуществляется в режиме *ω-сканирования*, при котором детектор устанавливается в положение угла близкое к углу ( $2\theta_{Br}$ ) брэгговского отражения от известного семейства плоскостей, а образец сканируется вблизи угла  $\theta_{Br}$  в небольшом интервале углов.

Измерение дифракционной кривой осуществляется в режиме *θ-2θ-сканирования*, при котором скорость поворота детектора в два раза больше скорости поворота образца. Сканирование производится вокруг брэгговского отражения от определенного семейства плоскостей подложки в узком угловом диапазоне.

Измерение кривой рефлектометрии производится также в режиме *θ-2θ-сканирования*, при этом угол падения рентгеновского пучка на образец обычно не превосходит  $5^\circ$ .

Во всех случаях скорость сканирования и шаг определяются решаемой задачей.

### Определение толщины и состава эпитаксиального слоя

Наиболее часто встречающаяся задача это определение толщины и состава эпитаксиального слоя в случае, когда параметры элементарной ячейки слоя и подложки достаточно близки и на дифракционной кривой присутствуют дифракционные отражения и слоя и подложки как на Рис. 4.

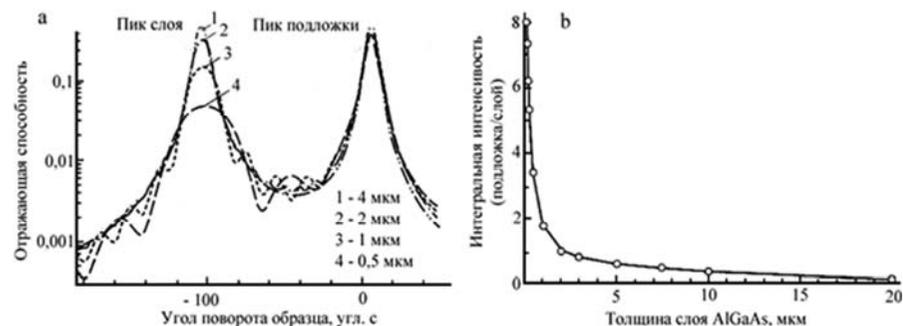


Рис.4 а – дифракционные кривые, на кривых 3 и 4 видны малые интерференционные осцилляции, расположенные около пика слоя - толщинные осцилляции; б – отношение интегральных интенсивности пиков подложки и эпитаксиального слоя. Расчётные кривые для слоя  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  на подложке GaAs, излучение  $CuK_{\alpha}$ , отражение 004.

Чем ближе параметры ячейки слоя и подложки, тем ближе друг к другу будут располагаться на кривой их дифракционные максимумы. Разницу между параметрами элементарной ячейки слоя и подложки называют рассогласованием или несоответствием параметров решетки.

Несоответствие параметров решётки имеет большое значение, так как является мерой деформации в слое, а так же даёт возможность определить состав тройных соединений, и, как следствие, делать заключение о ширине запрещенной зоны.

Истинное несоответствие  $m$  определяется из параметров решётки материалов слоя  $a_l$  и подложки  $a_s$  как:

$$m = \frac{(a_l - a_s)}{a_s} \quad (5)$$

По теории упругости его можно рассчитать в соответствии с формулой:

$$m = m^* \left[ \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)} \right] \quad (6)$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона ( $\nu \sim 1/3$ ),  $m^*$  - экспериментальное рентгеновское несоответствие, получаемое из дифракционной кривой. Если отражение является обычным симметричным отражением типа 004, то:

$$m^* = \left( \frac{\Delta d}{d} \right)_{\perp} = \left( \frac{\Delta c}{c} \right) \quad (7)$$

где  $\left( \frac{\Delta d}{d} \right)_{\perp}$  и  $\left( \frac{\Delta c}{c} \right)$  - относительная разница межплоскостных расстояний и параметров решетки соответственно в направлении перпендикулярном поверхности.

Толщину слоя можно определить по периоду *толщинных осцилляций* (Рис. 4) или по полуширине пика слоя. Более точным является первый способ, однако, в некоторых случаях его применение невозможно. Например, если граница между слоем и подложкой размыта или толщина слоя более 1 мкм осцилляции могут отсутствовать на дифракционной кривой.

Толщина слоя  $t$ , определяемая по периоду толщинных осцилляций  $\Delta\theta_p$ :

$$t = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_p \cos\theta} \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $\theta$  - брэгговский угол.

Для повышения точности определения толщины следует измерить разделение между возможно большим количеством толщинных осцилляций и провести усреднение. В этом случае точность определения толщины увеличится в N раз, где N – число измерений.

Толщина слоя  $t$ , определяемая по полуширине дифракционного максимума слоя  $\Delta\theta_{FWHM}$ :

$$t = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_{FWHM} \cos\theta} \quad (9)$$

Величину  $\Delta\theta_{FWHM}$  можно найти аппроксимацией пика слоя функцией Гаусса или Лоренца.

Погрешность определения толщины слоя ( $\Delta t$ ) связана в основном с ошибкой в определении полуширины дифракционного максимума –  $D(\Delta\theta_{FWHM})$ . Выражение для погрешности выглядит следующим образом:

$$\Delta t = \frac{\lambda}{2(\Delta\theta_{FWHM})^2 \cos\theta} D(\Delta\theta_{FWHM}) \quad (10)$$

Следует заметить, что в случае определения толщины слоя по периоду толщинных осцилляций погрешность определяется аналогичным выражением и будет меньше во столько раз, во сколько  $D(\Delta\theta_{FWHM})$  меньше  $D(\Delta\theta_p)$  (погрешность определения периода толщинных осцилляций).

### Рентгеновская дифрактометрия структур со сверхрешетками

Под *сверхрешеткой* (СР) будем понимать структуру, состоящую из регулярно повторяющихся слоев по крайней мере двух различных материалов.

Характерной особенностью дифракционных кривых от СР является последовательность разделенных равными промежутками пиков-сателлитов, обусловленных периодическим изменением параметров СР по глубине.

Т.о. на дифракционной кривой от СР могут проявляться:

- пик от подложки
- пик среднего состава (нулевой сателлит), отвечающий среднему межплоскостному расстоянию слоев, составляющих СР.
- набор пиков-сателлитов по обе стороны от нулевого, расстояние между которыми определяется периодичностью СР (общей толщиной повторяющихся слоев).
- набор осцилляций отвечающих полной толщине СР, количество таких осцилляций между двумя соседними сателлитами равно  $m-2$ , где  $m$  – число повторений слоев.

Из дифракционной кривой непосредственно определяются две характеристики СР: период  $T$  из расстояния  $\Delta\theta$  между сателлитами и

среднее межплоскостное расстояние  $\left\langle \frac{\Delta c}{c} \right\rangle$  из углового положения

нулевого сателлита относительно пика отражения подложки. Для идеальной СР, с двумя чередующимися слоями стехиометрического состава с известными параметрами решетки ( $a_1$  и  $a_2$ ) и упругими свойствами этого достаточно для вычисления толщин слоев:

$$T = t_1 + t_2 = \frac{\lambda}{2\Delta\theta \cos\theta}, \quad (11)$$

$$\left\langle \frac{\Delta c}{c} \right\rangle = \frac{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)_1 t_1 (1 + P_1) + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)_2 t_2 (1 + P_2)}{t_1 + t_2}, \quad (12)$$

где  $\theta$  – брэгговский угол,  $P_1$  и  $P_2$  – параметры, определяемые через коэффициенты Пуассона:

$$P \equiv \frac{2\nu}{1 - \nu} \quad (13)$$

### Определение толщины слоя и периода многослойной структуры

#### а) Тонкий слой на подложке

Интерференция волн отраженных от поверхности слоя и от границы слой/подложка приводит к осцилляциям интенсивности отраженного сигнала. Если разница фаз двух отраженных волн кратна длине волны, на кривой рефлектометрии будут наблюдаться максимумы интенсивности:

$$m\lambda = 2t\sqrt{\sin^2 \alpha_i - \sin^2 \alpha_c} \approx 2t\sqrt{\alpha_i^2 - \alpha_c^2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

или

$$\alpha_{i,m}^2 = \alpha_{i,c}^2 + \frac{\lambda^2}{4t^2} m^2 \quad (15)$$

где  $t$  - толщина слоя,  $\alpha_{i,c}$  - критический угол полного внешнего отражения.

Для углов  $\alpha_{m+1}$  и  $\alpha_m$  значительно больших, чем  $\alpha_c$  расстояние между двумя соседними осцилляциями, как следует из формулы (15) выражается:

$$2\alpha_{m+1} - 2\alpha_m \approx \frac{\lambda}{t} \quad (16)$$

и таким образом обратно пропорционально  $t$ .

### б) Периодическая многослойная структура

Для периодической многослойной структуры формула (15) описывает также появление на кривой рефлектометрии так называемых сателлитов, т.е. максимумов, отвечающих периоду повторения:

$$\alpha_{i,m}^2 = \langle \alpha_{i,c} \rangle^2 + \frac{\lambda^2}{4T^2} m^2 \quad (17)$$

Здесь  $\langle \alpha_{i,c} \rangle$  - средний критический угол многослойной структуры.

### Защита от рентгеновского излучения и дозиметрия

При выполнении работ, связанных с применением рентгеновских методов исследования материалов, и использовании соответствующих аппаратов и трубок существует опасность поражения работающих электрическим током и ионизирующим излучением.

Защита от поражения электрическим током обеспечивается защитным ограждением и системой блокировки. Однако необходимо учитывать, что блокировочные устройства (дверцы и др.) разрывают только цепь высоковольтного питания и разряжают емкости в высоковольтной схеме, но при этом обычно не обесточиваются цепи низкого напряжения (220 – 380 В).

Действие ионизирующего излучения основано на поглощении и рассеянии рентгеновских и  $\gamma$ -лучей, которое сопровождается в общем случае образованием фотоэлектронов, электронов отдачи и пар, ответственных за ионизацию и возбуждение атомов и молекул среды.

Рентгеновские лучи, поглощенные организмом человека, оказывают на него биологическое воздействие. Степень этого воздействия определяется длиной волны излучения и количеством поглощенных фотонов. Эти две величины определяют поглощаемую дозу (ПД), под которой понимают дозу, измеряемую поглощенной энергией на единицу массы (Дж/кг).

Единицей поглощенной энергии является рад:  
 $1 \text{ Р} = 0.01 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ эрг/г}$ .

Дозу излучения, определяющую биологическое воздействие излучения на организм, называют биологической дозой и измеряют в бэрах:

$1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад/Q}$ , где Q — коэффициент качества, для рентгеновских лучей равный единице:  $Q_{\text{рент}} = 1$ .

В расчетах ПД исходят из среднего состава биологической ткани: 76.2% O; 11.1% C; 10.1% H; 2.6% N.

Нормами радиационной безопасности (НРБ-76) устанавливается предельно допустимая доза (ПДД), под которой понимают наибольшее значение индивидуальной дозы, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии человека неблагоприятных биологических изменений, обнаруживаемых современными методами. Для лиц, непосредственно работающих с источниками ионизирующих излучений в условиях облучения всех частей тела, установлена предельно допустимая доза, равная 5 бэр в год, что соответствует 0.1 Р за неделю или мощности дозы около 3 мР/ч. Естественный фон (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и т. п.) составляет 0.1 бэр/год.

Для измерения дозы рентгеновского и  $\gamma$ -излучения используют ионизирующее действие этого излучения при поглощении его в воздухе, т.е. заряд всех ионов одного знака, возникающих в воздухе при полном торможении всех вторичных электронов, которые были образованы фотонами. Единицей такой дозы, характеризующейся величиной заряда на единицу массы (Кл/кг) является рентген:  $1 \text{ Р} = 258 \text{ мкКл/кг}$ . Доза 1 Р отвечает заряду ионов в одну электростатическую единицу в  $1 \text{ см}^3$  атмосферного воздуха (масса 0.001296 г) при 0°C и 105 Па (760 мм рт. ст.). В случае мягкой биологической ткани и рентгеновских лучей  $1 \text{ Р} = 1 \text{ рад} = 1 \text{ бэр}$ .

Безопасные от действия излучения условия работы обеспечиваются защитными устройствами современной аппаратуры, необходимыми организационно-техническими мероприятиями и строгим выполнением работающими правил техники безопасности.

Организационно-технические мероприятия включают правильное размещение и установку аппаратов, а также дополнительных устройств.

Для защиты работающих от облучения в соответствии с конструкцией аппаратуры и особенностями установки образцов для

данной конкретной задачи периодически должно проводиться: определение с помощью дозиметров безопасных зон и зон повышенной опасности возле аппарата, дозиметрический контроль, составление рабочих инструкций и правил техники безопасности, мероприятия по ликвидации аварийной обстановки, специальное обучение и профосмотры.

Работа на аппаратах с отключенными или снятыми защитными устройствами строго запрещена.

Дозиметрическая аппаратура различна для разных видов излучения и частиц.

Для измерения доз рентгеновского и гамма-излучений служат различного типа рентгенометры. Датчиками в них являются ионизационные камеры различных объемов. Отсчет дозы в рентгенах производится по величине ионизационного тока, регистрируемого выходным стрелочным прибором. Эти приборы позволяют измерять дозы в пределах 0.001 – 50 000 Р в диапазоне энергий от 6 кэВ до 1 – 2 МэВ.

В зарубежных рентгенометрах применяются полупроводниковые датчики, сопротивление которых изменяется под воздействием рентгеновского излучения, а также малогабаритные ионизационные камеры.

### **Контрольные вопросы**

1. Каким образом образуется рентгеновское излучение?
2. Объясните физический принцип метода рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии. Что такое критический угол полного внешнего отражения?
3. Перечислите основные составляющие рентгеновского дифрактометра. Какие дополнительные элементы требуются в эксперименте высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии?
4. Чем определяется длина волны рентгеновского излучения?
5. Какие параметры образца можно определить методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии? рентгеновской рефлектометрии?
6. В каких режимах осуществляется измерение дифракционных кривых? кривых рентгеновской рефлектометрии?
7. Перечислите методы определения толщины эпитаксиального

слоя. Что вы можете сказать о точности определения толщины этими методами?

8. Каким образом можно определить состав твердого раствора слоя? Почему существует различие между истинным и экспериментально измеряемым рентгеновским несоответствием?

9. Как можно определить период СР?

10. В чем различие методов рентгеновской дифрактометрии для монокристаллов и для поликристаллов?

11. С какими физическими явлениями связано воздействие излучений на среду, в том числе биологическую?

12. Что понимают под ионизирующим действием облучения?

13. Назовите меры, обеспечивающие работу, безопасную от воздействия электрического тока и рентгеновского излучения.