

## X-RAY OPTICS

R. N. KUZ'MIN

*The physical principles of X-ray optics and its applications are described. The analysis of the peculiarities of X-ray diffraction has been performed within the system of the three-mirror monoblock crystalline interferometer. The Sagnac experiment on the X-rays, X-ray images of the biological object, and X-ray microscope are discussed.*

**Рассмотрены физические принципы рентгеновской оптики и ее приложения. Проведен анализ особенностей рентгеновской дифракции в системе трехзеркального моноблочного кристаллического интерферометра. Обсуждены опыт Саньяка, изображение биологического объекта и рентгеновский микроскоп.**

© Кузьмин Р.Н., 1997

## РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА

Р. Н. КУЗЬМИН

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

В 1995 году исполнилось 100 лет с момента замечательного события – открытия рентгеновских лучей, которое повлияло на различные области научных знаний и сыграло огромную роль в практической деятельности человека.

Рентгеновская оптика как один из разделов оптики имеет четко определенные физические границы. Это обусловлено как самим происхождением рентгеновских лучей, так и особенностями взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Практическое исследование оптических свойств в рентгеновском диапазоне длин волн началось самим первооткрывателем Конрадом Рентгеном.

### ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

#### Поглощение и прямолинейное распространение рентгеновских лучей

Рентген, не зная физической природы открытых им в 1895 году проникающих лучей, назвал их таинственными X-лучами. Рентгеновским лучам и их использованию посвящены горы книг и статей. Ни об одном открытии в физике весть не разлеталась по миру так быстро. Только за один год, последовавший за первым сообщением Рентгена, появилось более тысячи публикаций в научных журналах и прессе. Именно практическое применение рентгеновских лучей в медицине и технике закрепило славу Рентгена. Просвечивание вещества основано на общем свойстве электромагнитных волн – их прямолинейном распространении. Прохождение рентгеновских лучей через вещество сопровождается вторичными процессами, следствием которых является и ослабление рентгеновского пучка, описываемое коэффициентом поглощения, который характеризует вещество. Он различен для разных элементов, зависит от длины волны излучения и испытывает характерные скачки поглощения. Отметим, что это свойство создает контраст изображения. Вообще вторичные процессы шире отражают процесс взаимодействия излучения с веществом, поэтому могут содержать дополнительную информацию об объекте. Особенно ярко проявляются вторичные процессы при взаимодействии рентгеновского излучения с кристаллами [1].

#### Дифракция рентгеновских лучей

При взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллами была установлена волновая природа

рентгеновского излучения. Сделали это М. Лауз, В. Фридрих и П. Книппинг в 1912 году, когда зафиксировали интерференционную картину после пропускания рентгеновскими лучами. Это была первая лаузограмма. У. Брэгг и Ю.В. Вульф независимо выразили условие интерференции в виде закона отражения

$$2ds\sin\theta = n\lambda,$$

где  $d$  — межплоскостное расстояние в кристалле,  $\theta$  — угол скольжения,  $\lambda$  — длина волны,  $n$  — порядок отражения. Важным физическим выводом явилось экспериментальное доказательство того, что рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны с чрезвычайно малой длиной волны  $\sim 1 \text{ \AA}$  ( $10^{-8}$  см), по порядку величины равной межплоскостным расстояниям в кристалле. Сам кристалл представляет собой идеальную оптическую решетку для разложения рентгеновского излучения в спектр. Отражение в атомных плоскостях рентгеновских лучей происходит так же, как и в оптике от зеркала. Только в случае кристалла имеется множество идентичных зеркал — систем атомных плоскостей, расположенных параллельно одна другой. Если кристалл установлен так, что условие дифракции Вульфа—Брэгга не выполняется ни для одной из систем атомных плоскостей, то брэгговского отражения не происходит. При выполнении условия дифракции для двухволнового случая (падающая волна и отраженная) в рентгеновской оптике различают две крайние схемы наблюдения дифракции. В схеме Лауз рентгеновские лучи проходят через кристалл, отражаясь от семейства атомных плоскостей, перпендикулярных поверхности кристалла. В этом случае поток энергии волн, выходящих с нижней границы (для непоглощающего излучения) кристалла, равен потоку энергии, падающей на кристалл. В случае дифракции по Брэггу существует область углов скольжения, в пределах которой происходит полное отражение падающей волны на кристалл. Отметим, однако, что любое электромагнитное излучение, встречая преграду на своем пути, изменяет направление потока квантов, луч преломляется, а по мере продвижения через среду и поглощается. Поэтому закон отражения Вульфа—Брэгга является только первым приближением вследствие того, что преломление влияет и на угол отражения.

Физическим следствием этого является то, что для рентгеновских лучей действительная часть показателя преломления меньше единицы лишь на малую величину  $\delta \sim 10^{-5}$ , поэтому их преломление незначительно. Показатель преломления настолько близок к единице, что вогнутые преломляющие линзы должны иметь неприемлемо большие фокусные расстояния и огромную кривизну у краев линз. В результате рентгеновские кванты полностью поглощаются на периферии линз. Таким образом, в рентгеновском диапазоне не удается использовать линзы, аналогичные оптическим.

При переходе рентгеновского луча из вакуума в среду с меньшим показателем преломления при угле падения, близком к  $90^\circ$ , наблюдается явление полного внешнего отражения (ПВО) рентгеновских лучей от поверхности. При некотором критическом угле скольжения, очень малом (меньше  $1'$ ), рентгеновская волна не проникает в вещество и отражается. Коэффициент отражения близок к единице. Явление ПВО происходит и для жесткого рентгеновского и даже гамма-излучений, но при этом критический угол становится предельно малым — меньше  $0,001$  радиана.

Рентгеновская оптика лучше проявляется в дифракционных эффектах в совершенных (идеальная решетка) кристаллах [2].

### РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ

Необходимо сделать несколько общих вводных предложений для раскрытия особенности взаимодействия рентгеновского излучения с кристаллом. Лауз разработал геометрическую (кинематическую) теорию трехмерной дифракции и интерференции. В этой теории амплитуды рассеянных волн малы по сравнению с амплитудой первичной волны. В динамической теории Дарвина отражение рентгеновских лучей рассматривалось как последовательное и многократное отражение от миллионов плоскостей, составляющих кристалл. Ч. Дарвин получил формулу, которая правильно учитывала отражение от идеального кристалла в некотором конечном интервале углов около угла Брэгга. Глубина проникновения рентгеновских лучей в образец при этом минимальна. Она носит специальное наименование длины экстинкции и составляет несколько микрон. Вдали от угла дифракции проникновение рентгеновских лучей характеризуется обычным экспоненциальным поглощением, которое составляет несколько десятков микрон для кристалла из кремния. Еще одна изумительная теория дифракции была создана П.П. Эвальдом. Она предвосхитила много волновые эффекты в рентгенооптике. Сфера отражений, которую принято называть сферой Эвальда, связана воедино векторы падающего и рассеянного квантов с векторами обратной решетки кристалла. Стоит отметить, что в теориях Дарвина и Эвальда содержались элементы зонной структуры твердых тел. Область сильного отражения отвечает запрещенной зоне. В дальнейшем было обнаружено экспериментально, что интенсивность рассеяния рентгеновских лучей не совпадает с рассчитанной по дарвиновским формулам, а превышает ее примерно в десять раз. Поэтому Дарвин предположил, что реальные кристаллы несовершенны и состоят из блоков мозаичной структуры, в которой каждый отдельный блок кристалла обладает совершенной решеткой, но слегка повернут относительно соседних блоков. Данная теория легла в основу

рентгеноструктурного анализа кристаллов, огромной ветви рентгеновской оптики, которой мы здесь касаться не будем.

Современная динамическая теория дифракции в совершенных кристаллах восходит к Лауз, который заменил точечные дипольные резонаторы Эвальда на непрерывную электронную плотность. Распространение и дифракция плоских монохроматических волн описываются уравнениями Максвелла и материальным уравнением, устанавливающим связь между возмущением и откликом диэлектрической проницаемости среды или ее поляризуемости.

Появление совершенных кристаллов кремния и германия — основных “кирпичиков” современной микроэлектроники — привело к интенсивному изучению динамических эффектов, которые больше всего проявляются в аномальном слабом поглощении рентгеновских лучей при прохождении их через идеальный кристалл в условиях дифракции. Это открытие случайно сделал Х. Борман. Физически эффект Бормана можно представить как явление канализации незаряженных частиц — квантов рентгеновского излучения — через щель между плоскостями кристалла. При пропускании параллельного монохроматического рентгеновского пучка через клинообразную кристаллическую пластинку можно наблюдать на фотопластинке максимумы и минимумы, представляющие собой интерференционные полосы.

В двухвольновом приближении в каждом из двух полей имеет место периодическая модуляция по глубине кристалла, которая возникает в результате интерференции преломленной и дифрагированной волн. Период модуляции совпадает с периодом решетки, а максимумы и минимумы двух полей (или соответствующие пучности и узлы) смещены на половину периода. В результате фотоэлектронное поглощение, играющее основную роль при взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллом, резко возрастает для того поля, максимумы которого лежат на атомных плоскостях, и падает в противном случае. Возникает как бы стоячая волна. Период такой волны-линейки жестко связан с периодом повторяемости.

Слегка изменяя угол падения в некотором конечном интервале вблизи угла Брэгга, можно совмещать либо пучности волны, либо ее узлы с атомными плоскостями. Отсюда следует, что стоячая рентгеновская волна представляет собой уникальную инструментальную технику измерения длины в масштабах межатомных расстояний. Рентгеновская стоячая волна возбуждает атомы кристалла, а они, в свою очередь, испускают вторичное излучение. Это излучение может быть в виде рентгеновского флуоресцентного, комптоновского, теплового диффузного рассеяния, представлять собой внешний и внутренний фотоэффекты. Интенсивность вторичного процесса прямо связана с фото-

электронным поглощением на атомах, их положением в структуре кристалла и фазами отражения. Поскольку поглощение зависит от угла падения, то интенсивность вторичного процесса также зависит от него. Измерения интенсивности рентгеновской флуоресценции при двухлучевой дифракции на совершенном кристалле впервые выполнил Баттерман. Рентгеновское флуоресцентное излучение выходит с больших глубин, поэтому его экспериментальная кривая оказалась обращенной к кривой отражения. Не имея особенностей, она не содержала дополнительной информации о структуре кристалла. Но начало было положено. Со временем методика была усовершенствована и позволила определять положение примесных атомов на поверхности полупроводниковых монокристаллов.

Таким образом, новой возможностью явилась регистрация вторичных процессов одновременно с наблюдением брэгговского рассеяния. Амплитуда стоячей рентгеновской волны слабо зависит от отклонения от точного брэгговского угла, но в то же время фаза волны резко изменяется с угловым отклонением, обусловливая этим движение узлов и пучностей поля относительно отражающих плоскостей. Этот факт непосредственно проявляется в угловой зависимости выхода фотоэлектронов. Исследуя угловую зависимость рассеяния рентгеновских квантов  $P_R$  (рис. 1) вблизи брэгговского угла, можно наблюдать сильную аномалию, состоящую в резком уменьшении выхода фотоэлектронов  $K$  от угла отклонения от точного значения  $\theta_B$ .

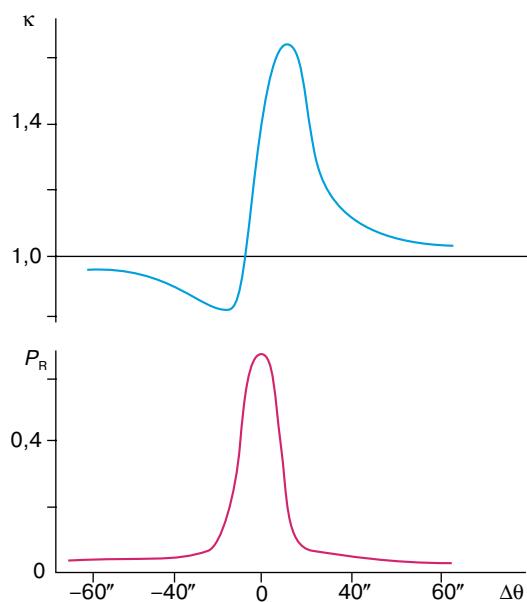


Рис. 1. Типичные кривые фотоэмиссии  $K$  и отражения  $P_R$  в случае симметричного (111)-отражения от кристалла германия, излучение  $CuK_{\alpha}$

Для прикладных целей [1], по-видимому, наибольший интерес представляет использование в методике стоячих рентгеновских волн именно фотоэлектронной эмиссии. В частности, кривая выхода фотоэмиссии обладает высокой чувствительностью к степени аморфизации поверхности. Малая глубина выхода фотоэлектронов, высокая чувствительность к структурным искажениям вблизи поверхности кристалла, сравнительно простая методика эксперимента определяют преимущества перед регистрацией других вторичных продуктов атомных реакций. Дальнейшее развитие методики связано с энергетическим анализом фотоэлектронов, поскольку наличие корреляции между энергией электронов и глубиной их выхода открывает возможность по-слойного неразрушающего контроля структурного совершенства тонких (от одного микрона до нескольких нанометров) приповерхностных слоев кристаллов.

Основу послойного анализа составляют вероятности выхода фотоэлектронов с различной глубины. Для их получения используются угловые зависимости выхода фотоэлектронов различных энергий в условиях Брэгг–Лауз дифракции при скользящем падении рентгеновских лучей на образец.

Позднее освоение скользящего падения произошло, вероятно, потому, что симметричная дифракция давала достаточно сведений о дефектной структуре совершенных кристаллов. Была достигнута огромная точность в рентгеновской дифрактометрии двух- и трехкристальных схем. В трехканальном дифрактометре после монохроматора, изготовленного из совершенного кристалла, рентгеновский пучок с малой (секундной) расходностью попадает на образец. Далее третьим совершенным кристаллом анализируется угловое распределение интенсивности, отраженной образцом. Промер кривой отражения осуществляется с точностью до долей секунды. Гониометр с пьезоэлементом обеспечивает точность углового перемещения кристалла не хуже  $10^{-5}$  радиана. Ранее было отмечено, что при выходе из области сильного отражения рентгеновские лучи почти на порядок глубже проникают в кристалл. Вместе с тем глубина, с которой выходит дифрагированное излучение, уменьшается по мере удаления от угла  $\theta_B$  и даже может стать сравнимой с межплоскостным расстоянием. Она уникальна в том смысле, что точность измерения переходных слоев между пленками достигает десятых долей нанометра.

Можно представить ситуацию, в которой одновременно с зеркальным отражением имеет место и брэгговская дифракция от плоскостей, перпендикулярных поверхности. В подобном эксперименте падающая, преломленная и отраженная волны не лежат в одной плоскости, поэтому схема называется некомпланарной. Подобные работы положили начало опытам по реконструкции атомарной поверхности кристаллических тел.

## РЕНТГЕНОВСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ И РЕЗОНАТОРЫ

Рентгеновский пучок можно разделить на два с помощью кристаллического зеркала, затем последующей дифракцией на втором кристалле свести их в плоскость третьего. Такой прибор, построенный по классической оптической схеме, имеет в данном случае вместо зеркал и призм другие отражающие элементы – кристаллические плоскости (рис. 2). При смешивании когерентных пучков в кристаллическом интерферометре также образуются стоячие рентгеновские волны. Важную роль в развитии рентгеновской интерферометрии сыграли работы У. Бонза и М. Харта. Обнаруженный ими, а затем другими исследователями эффект муара привел к разработке рентгеновской топографии. Муар очень чувствителен к изменениям периодов решетки кристаллов вплоть до величины  $\Delta d/d = 10^{-7}$ . Легкая деформация изменяет картину муара, что позволяет идентифицировать различные типы нарушений и создавать атомный стандарт массы.

Рентгеновский прибор с замкнутой траекторией луча представляет собой кристаллический резонатор. Л.А. Ривлин впервые рассмотрел условия образования кольцевой (замкнутой) траектории рентгеновского излучения на основе отражения от плоскостей кристалла и ПВО. Он также оценил добротность резонатора, которая оказалась больше  $10^9$ . Кристаллические резонаторы обладают

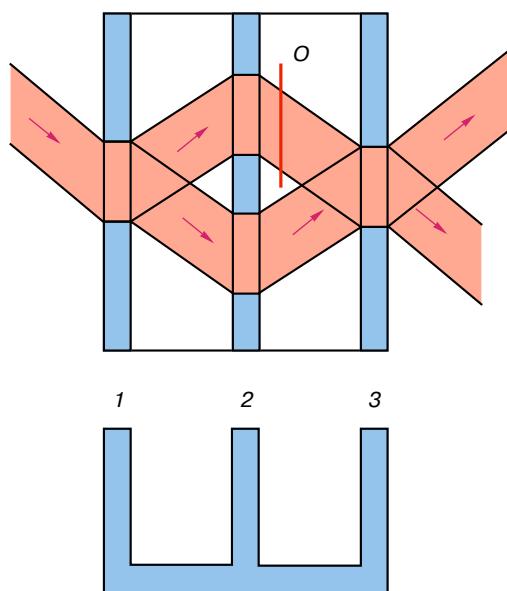


Рис. 2. Схема рентгеновских пучков в трехкристальном интерферометре состоит из трех отдельных монокристаллов, вырезанных из большого совершенного кристалла кремния: 1 – разделитель, 2 – зеркало, 3 – анализатор. Изменение фазы рентгеновского луча возникает при помещении в одно из плеч интерферометра объекта О

удивительно высокими сверхмонохроматизирующими свойствами.

Интерферометры и резонаторы как точечные инструменты можно использовать в гироскопических и акселерометрических системах. В оптике хорошо изучены особенности распространения излучения в инерциальных и неинерциальных системах отсчета. Хорошо известны эффект увлечения О.Ж. Френеля, опыты М.Г. Саньяка–Ф. Харриса, А.А. Майкельсона–Х.Г. Гейля и др. Аналогичные эффекты наблюдаются и в рентгеновской оптике [3]. В результате богатой волновой картины и чрезвычайно резкой зависимости амплитуд отдельных волн и их фаз от параметров и ориентации кристаллов вся система оказывается чувствительной к внешним воздействиям, в том числе связанным с движением.

Система из двух монокристаллических пластин, вырезанных из одного блока, реагирует на пространственный поворот одной из них на угол  $\sim 10^{-4}$  угловой секунды ( $0,0001'$ ), что недостижимо в оптике, а трехкристальный интерферометр фиксирует смещение одного из кристаллов на величину  $\sim 10^{-11}$  см. Простейшее проявление релятивистских эффектов в дифракции связано с аберрацией, отражающей смещение падающего луча на угол  $\Delta\theta = (v/c)\sin\alpha$ , где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и волновым вектором луча. При использовании двухкристального интерферометра в случае  $\alpha = \pi/2$  легко зафиксировать этот эффект при поступательном или периодическом движении одного из монокристаллов со скоростью  $v \sim 1$  см/с. В оптике для обнаружения этого эффекта нужны установки космических масштабов. Опыт Саньяка в рентгеновском диапазоне позволяет определять параметры неинерциального движения, в частности угловую скорость вращения Земли, с использованием интерференции волн, обгащающих во встречных направлениях контур во вращающемся с известной угловой скоростью интерферометре [3].

## РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОСКОП

Устойчивый интерес к рентгеновской оптике диктуется практическими задачами рентгеновской микроскопии. Несмотря на то что был достигнут значительный прогресс в изготовлении искусственных периодических структур (штрих-решеток), гладких поверхностей и многослойных зеркал, принципиальная трудность в создании рентгеновских микроскопов и телескопов не преодолена. Так как для рентгеновских лучей  $n < 1$ , а для оптики  $n > 1$ , то линзы, фокусирующие свет, заставят рентгеновские лучи расходиться, а отрицательные линзы будут действовать как положительные, хотя и с очень малой оптической силой. Нетрудно рассчитать, что фокусное расстояние стеклянной линзы для рентгеновских лучей с  $\lambda = 10^{-8}$  см в  $10^5$  раз превосходит ее фокусное расстояние в области видимого света. Однако малая длина волны рентгеновских лучей позво-

ляет надеяться на получение изображений с большей разрешающей способностью. Последняя зависит от двух факторов: длины волны и угловой апертуры. Для микроскопии важен также контраст, а он может быть достигнут за счет изменения длины волны, поскольку для рентгеновских лучей проникающая способность различна для разных длин волн и изменяется в широких пределах. Например, характеристическое излучение меди по проникновению в целлюлозу в  $10^3$  раз превосходит электроны, создающие изображение в электронном микроскопе при напряжении в  $10^5$  В, а характеристическое излучение углерода ( $\lambda = 44$  Å) поглощается наполовину влажной бесцветной тканью микронной толщины, которая почти полностью прозрачна для света. Кроме того, наличие скачков вблизи краев поглощения элементов повышает контраст в рентгеновской микроскопии и позволяет проводить качественный химический анализ.

Самый простой способ получения изображений теневой. На отбрасывании тени основаны контрастная рентгеновская микроскопия (микрорадиография) и проекционная микроскопия с точечным источником. В проекционном микроскопе рентгеновские лучи проходят сквозь объект и создают его изображение на экране или фотоматериале. Влияние на четкость изображения оказывает только образец. При этом лучи не отражаются и не преломляются в каком-либо устройстве. Предельная разрешающая сила не зависит от апертуры. Принципиально она ограничена френелевской дифракцией, а практически – размерами источника и разрешением регистрирующего материала: фотопленка, резист. Для популярного рентгеновского резиста полиметилметакрилата наилучшее разрешение меньше 100 Å.

Кристаллические отражатели, фокусирующие устройства также можно использовать в рентгеновских микроскопах. Первоначально они создавались для рентгеновских фокусирующих спектрометров (Дж.В.М. Дю-Монд и П. Кирпатрик, У. Кошуа и Дж.З. Иогансон). Особо заслуживает упоминания сферическое изогнутое зеркало Рамачандрана и Татакари. Монокристалл слюды был ими прикреплен на конце откаченной вакуумной трубы. От такого зеркала рентгеновские лучи при дифракции отображали точечный источник в точку. Несмотря на идентичность оптическому изображению, в этом случае имеется предел разрешения в 0,1 мкм, обусловленный реальной шириной кривой отражения.

Новейшая история рентгеновских микроскопов связана с созданием зонных пластинок и дифракционных решеток. Эти дифракционные элементы представляют собой либо концентрические окружности с разностью диаметров менее 100 нм, либо прямые штриховые дифракционные решетки. Чрезвычайно точное изготовление решеток обеспечивает сохранение одной и той же фазы для одинаковых ее элементов. Процесс образования изображений

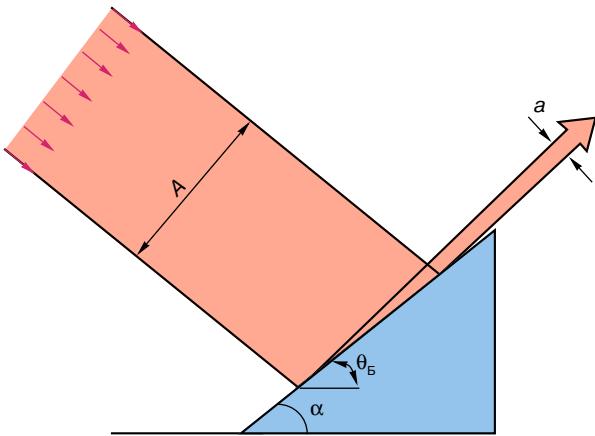
зонными пластинками с большим числом зон подчиняется тем же закономерностям, что и при использовании тонких линз. Известны устройства диаметром до 9 мм и числом зон до  $4 \cdot 10^4$ , установленные на накопительном кольце электронов. Обычно зонные пластинки с высоким разрешением имеют малые размеры – от 20 до нескольких микрон. Такие пластинки называются микрозонными.

Многослойные структуры (МИС), состоящие из чередующихся слоев двух различных веществ, при толщине слоя, начиная с моноатомного, перспективны для использования их в качестве отражающих и дисперсионных элементов. Подобные структуры, нанесенные на слегка искривленные подложки, позволяют фокусировать и концентрировать излучение в существенно большем угле, чем однородные структуры. Прямыми аналогом оптического интерферометра Фабри–Перо является структура, в которой два идентичных многослойных периодических зеркала разделены слоем слабопоглощающего вещества с толщиной, значительно превышающей период многослойной структуры. Слабопоглощающая (углеродная) пленка является резонансной полостью и аналогична оптической пластинке.

Новые типы рентгенооптических устройств могут быть получены комбинированием микроструктур, представляющих собой отражательные элементы: дифракционные решетки, зонные пластинки и т.д., у которых отражающие области изготовлены по типу МИС. Подобные устройства могут работать при больших углах скольжения вплоть до нормального падения в случае мягкого рентгеновского излучения.

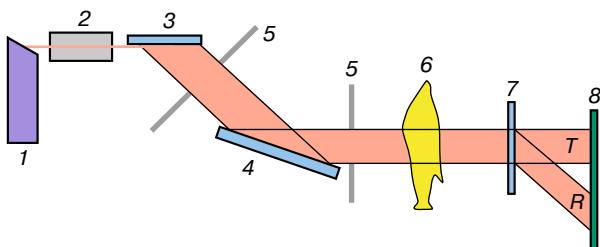
Известны различные фокусирующие кристаллические системы, повышающие плотность потока рентгеновского излучения. Примером может служить асимметричная дифракция. В этом случае рентгеновское излучение падает на кристалл, в котором отражающие плоскости по отношению к поверхности расположены под некоторым углом. Изменяя этот угол, можно достичь такого положения, когда отраженный луч окажется практически под поверхностью (рис. 3).

Для создания идеальной коллимации рентгеновского излучения используется многолучевая дифракция. Эта  $N$ -лучевая дифракция отличается от двухволнового случая тем, что условия Брэгга должны одновременно выполняться для системы атомных плоскостей. В настоящее время экспериментально изучены шести-, восьми- и даже двенадцатилучевая дифракция. При этом одним из наиболее ярких когерентных эффектов, сопровождающих многоволновое рассеяние в совершенных кристаллах, является многоволновой эффект Бормана. В экспериментах в этом случае формируется практически коллимированный пучок с очень малой расходимостью ( $\sim 10^{-6}$  радиан), усиленный в  $10^3$  по сравнению с двухвольновым случаем.

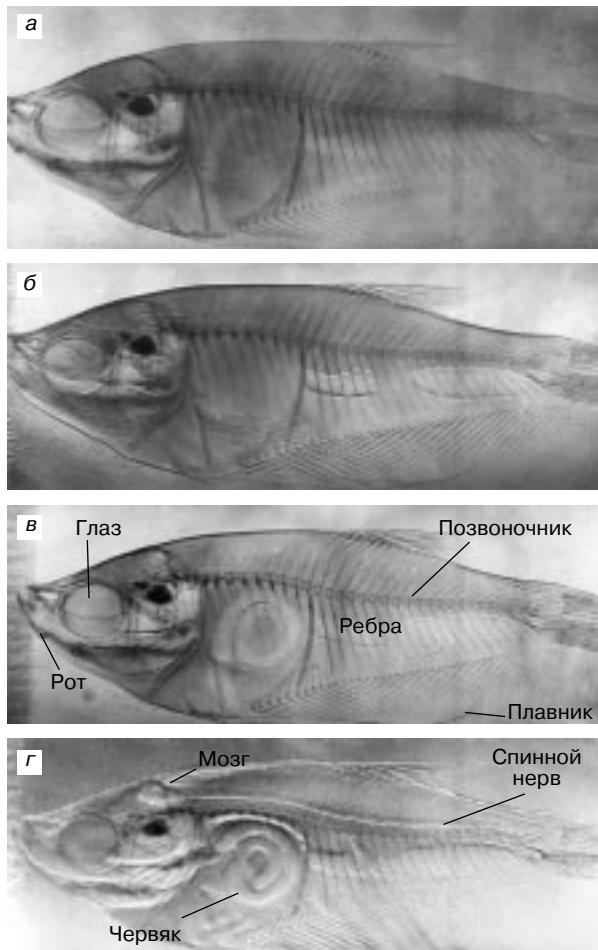


**Рис. 3.** Сжатие рентгеновского пучка в асимметричной дифракции.  $A$  – ширина падающего пучка на монокристалл, кристаллические отражающие плоскости параллельны основанию;  $a$  – ширина после дифракции

Развитием рентгеновского просвечивания является метод фазовой дисперсионной интроскопии (радиографии), который применяется к анализу мягких тканей биологических объектов. Рассмотрим схему метода (рис. 4). Рентгеновский коллимированный пучок двумя монохроматорами формируется в параллельный (слаборасходящийся  $\Delta\theta \approx 0,1'' - 0,5''$ ) широкий поток рентгеновских лучей, который проходит через объект. В нем он ослабляется за счет частичного поглощения и, главное, преломляется из-за неоднородного распределения плотности вещества в объекте, что приводит к изменению фазы волны в плоскости волнового фронта за объектом. Прошедшее излучение анализируется высокосовершенным кристалл-анализатором. Это фазово-модулированное излучение испытывает дифракционное рассеяние, характер которого зависит как от ориентации анализатора, так и от сложного интерференционного поведения поля на его



**Рис. 4.** Схема опыта по фазовой дисперсионной рентгеновской интроскопии: 1 – рентгеновская трубка, 2 – щелевой коллиматор, 3 – первый кристалл-монохроматор, 4 – второй кристалл-монохроматор, 5 – щели, 6 – объект (аквариумная рыбка), 7 – кристалл-анализатор, 8 – детектор (фотопленка)



**Рис. 5.** а – абсорбционное изображение (без анализатора) аквариумной рыбки (4 см длиной и 0,5 см толщиной) в рентгеновском излучении  $MoK_{\alpha}$ , видны только позвоночник и ребра; б–г – фазовое дисперсионное изображение аквариумной рыбки. Пояснения см. в тексте

поверхности. Отраженный ( $R$ ) и прошедший ( $T$ ) пучки регистрируются рентгеновской пленкой. Эта техника близка к интерферометрической схеме рис. 2, когда в один из разделенных пучков вставляется исследуемый объект. В новой схеме изменяется угол кристалла-анализатора по отношению к направлению падающего пучка, что позволяет подбирать лучший контраст в изображении объекта. Малейшие изменения фазы волны приводят к значительному усилению контраста изображения по сравнению с обычным просвечиванием.

На рис. 5, а показано абсорбционное изображение четырехсантиметровой аквариумной рыбки.

Видны только позвоночник и ребра. Остальные детали мягких тканей и внутренностей не проявляются. Последующие фото получены с использованием фазово-дисперсионной интроскопии: б – изображение в  $T$ -пучке, угол поворота анализатора  $\Delta\theta = 1^\circ$ ; в – в  $T$ -пучке и  $\vartheta - \Delta\theta = -1^\circ$  в  $R$ -пучке. Изображение становится более информативным и рельефным. Помимо костей видны спинной нерв, грудные плавники, рыбий воздушный пузырь и даже мелкий червячок в желудке рыбки, которого она проглотила перед рентгеновской съемкой.

Высокая фазовая чувствительность метода находится вне конкуренции с другими методами, что обеспечивает ему блестящую перспективу в диагностике раковых образований на ранних стадиях [4].

Ясно, что рентгеновская оптика будет развиваться. Определенные успехи достигнуты в области рентгеновской голографии [5]. Можно полагать, что новые открытия произойдут после создания лазеров ангстремного диапазона длин волн [6].

Автор признателен В.Н. Ингалу и Е.А. Беляевской за предоставление оригинала рентгеновского снимка рыбки для публикации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пинскер З.Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982.
2. Высоцкий В.И., Воронцов В.И., Кузьмин Р.Н. и др. Опыт Саньяка на рентгеновском излучении // Успехи физ. наук. 1994. Т. 164, № 3. С. 309–324.
3. Бушуев В.А., Кузьмин Р.Н. Вторичные процессы в рентгеновской оптике. М.: Изд-во МГУ, 1990.
4. Ingall V.N., Beliaevskaya E.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. P. 2314.
5. Duax W.L. Holography with X-rays // Intern. Union Crystallography // Newsletter. 1996. Vol. 4, № 2. P. 3.
6. Элтон Р. Рентгеновские лазеры / Пер. с англ. под ред. А.В. Виноградова. М.: Мир, 1994.

\* \* \*

Рунар Николаевич Кузьмин, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, специалист в смежных областях физики твердого тела, прикладной ядерной физики и оптики. Директор Института синергетики Академии творчества при Московском университете. Первый вице-президент Общенациональной академии знаний. Автор более 250 статей, десяти монографий и учебных пособий.