

Глава 3

ОБОРУДОВАНИЕ КАНАЛОВ СИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАНЦИИ

Проведение исследований на синхротронном излучении сильно отличается от работы с лабораторными источниками рентгеновских лучей, во-первых, из-за огромной мощности излучения, которое способно расплавить самый тугоплавкий материал, не говоря об излучении рентгеновского лазера, который может превратить любое вещество в плазму. Второе отличие заключается в большой удаленности экспериментальной установки от источника излучения и необходимости персоналу работать с пучком излучения и экспериментальной установкой дистанционно из-за большой радиационной опасности. Наконец, в случае СИ исследователь практически всегда вынужден работать с перенастраиваемыми монохроматорами и рентгеновской оптикой, чего как правило не требуется при работе с характеристическим излучением рентгеновских трубок. Все это проявляется в особенностях оборудования канала вывода излучения из синхротрона, транспорта его к измерительным установкам и устройства самих измерительных установок, которые обычно называют экспериментальными станциями.

Задача оборудования канала синхротронного излучения заключается в отборе рентгеновских лучей из спектра, поставляемого источником СИ, модифицирования отобранных рентгеновских лучей с помощью специальной рентгеновской оптики согласно требованиям конкретного эксперимента и подачи их в экспериментальную станцию, где результат их взаимодействия с образцом должен быть зарегистрирован и проанализирован. Вся эта работа проводится за радиационной защитой, которая предохраняет экспериментатора от вредного воздействия рентгеновского излучения (см. схему на рис. 3.1). Поскольку каждый конкретный эксперимент предъявляет свои требования к свойствам излучения, таким как, например, энергия (длина волны), энергетический интервал (ΔE), сходимость/расходимость лучей, поляризация, размер фокусного пятна и интенсивность, а технические свойства точек отбора СИ различны даже на одном накопительном кольце, то невозможно создать универсальное оборудование, пригодное для всех пучков, поэтому каждый пучок оборудуется индивидуально, хотя при этом могут использоваться одинаковые, более или менее стандартные, оптические элементы.

3.1. Каналы вывода пучков СИ

Рентгеновское излучение из точек генерации СИ в накопительном кольце подводится к экспериментальным установкам, в которых исследуются образцы по специально оборудованным вакуумным каналам. Кольцо синхротрона обычно располагается внутри тоннеля, бетонные стены которого служат для персонала, работаю-

щего на синхротроне, биологической защитой от жесткого и очень интенсивного рентгеновского излучения. Все экспериментальные установки располагаются вне тоннеля, а пучки синхротронного излучения из поворотных магнитов или вставных устройств накопительного кольца выводятся через стену биологической защиты, как схематически изображено на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Схематическое изображение оборудования канала синхротронного излучения с пультом управления и экспериментальной установкой

Поскольку пучки СИ отбираются под малыми углами к траектории кольца (обычно не более 10 градусов, а чаще 5–7 градусов), то при толщине стены даже порядка 0,5 м для выхода за стену тоннеля канал должен иметь длину минимум 5 м. На самом деле, с учетом зазора между кольцом и стеной тоннеля, вакуумный канал, выводящий пучок СИ за пределы тоннеля в экспериментальную зону, имеет длину не менее 10 м. После вывода пучка «белого» синхротронного излучения в экспериментальную зону необходимо привести его свойства (сечение пучка, сходимость или расходимость его лучей, спектр, яркость и поляризацию) в соответствие с требованиями конкретного эксперимента и затем подать подготовленный пучок на исследуемый образец в экспериментальной установке. Принимая во внимание длину рентгенооптического блока, необходимого для спектральной и геометрической подготовки пучка, суммарное расстояние от точки испускания СИ в кольце до исследуемого образца может составлять 20 и более метров. Транспортировка пучка синхротронного излучения на такие большие расстояния с минимальными потерями интенсивности от источника к образцу существенно более сложна по сравнению с лабораторными рентгенодифракционными и рентгеноспектральными установками. Пучок синхротронного излучения, как правило, ведется по вакуумному каналу на всем пути от выхода в экспериментальную зону вплоть до экспериментальной установки.

Канал для вывода рентгеновских лучей из кольца в экспериментальную зону (к порту пучка, от которого начинается пользовательская часть канала) представляет собой прямолинейную трубу из нержавеющей стали закрытую с торцов вакуумно плотными бериллиевыми окнами, пропускающими рентгеновское излучение. Обычно пользовательская часть канала СИ оборудуется заслонками, позволяющими перекрывать пучок, коллимирующими щелями, ограничивающими его размеры, а также фокусирующей оптикой, концентрирующей пучок излучения на образец, и монохроматорами, отбирающими из непрерывного спектра СИ длину волны, необходимую для эксперимента. Все это — элементы рентгеновской оптики.

Особенность условий работы элементов рентгеновской оптики на пучках синхротронного излучения состоит в том, что они должны без заметных термических деформаций выдерживать сильные тепловые нагрузки, которые могут в 15 и более раз превосходить тепловую плотность на поверхности Солнца, поэтому их часто снабжают устройствами внутреннего охлаждения или системами теплоотвода.

Еще одной особенностью работы на синхротронном излучении является то, что для снижения влияния внешнего фона на результаты измерений экспериментальная установка (например, рентгеновский дифрактометр или спектрометр) размещается в специальном защитном домике. Высокая интенсивность пучка СИ является главным достоинством для экспериментатора, в то же время из-за этого требуется очень серьезная радиационная защита. В процессе проведения эксперимента персонал, проводящий эксперимент, обязан находиться вне домика, где расположена экспериментальная установка с исследуемым образцом, в специальной комнате с пультом дистанционного управления экспериментом, чтобы избежать случайного облучения. Поэтому работа на синхротронном источнике требует полной автоматизация эксперимента с дистанционным управлением всеми частями установки. Таким образом, как показано на схеме рис. 3.1, канал синхротронного излучения состоит из канала вывода пучка из синхротрона в экспериментальную зону, рентгенооптического блока, где происходит подготовка пучка для эксперимента, домика с экспериментальной установкой и помещения для операторов, дистанционно управляющих экспериментом.

Входные монохроматоры и фокусирующие зеркала при работе на синхротронном излучении должны обязательно находиться в вакууме, чтобы не было загрязнения поверхности веществами, входящими в состав атмосферы, которые могут ускоряться и вбиваться в поверхность мощным потоком высокоэнергетических фотонов. Вакуум также *предотвращает нагрев* частей оптической системы *за счет конвекции* атмосферы, а также загрязнение синхротронного излучения флуоресцентным излучением от атомов атмосферного воздуха. Кроме того, первые элементы рентгенооптической системы снабжаются принудительным охлаждением, чтобы предотвратить их перегрев или даже расплавление прямым пучком белого СИ и не допустить геометрические aberrации, связанные с локальным термическим расширением. Охлаждение элементов рентгенооптической системы и вакуумирование камер, в которых они располагаются, особенно важно, когда на элемент действует весь спектр синхротронного излучения, несущий очень большую энергию, которая при поглощении превращается в тепло.

3.2. Средства контроля и диагностики пучков СИ

Чтобы работать с пучками синхротронного излучения, прежде всего надо их «видеть» и иметь полное представление об их яркости, спектре, направлении распространения, форме и положении, то есть ставить диагноз состоянию пучка. Для этого в ряде точек канала СИ устанавливают средства диагностики пучка (рис. 3.2).

В случае видимого света большую часть этих сведений можно было бы получить прямо с помощью зрения. Но так как рентгеновские лучи не видимы для человеческого глаза, то информацию о них приходится получать косвенно, используя специальные средства и приборы, чувствительные к рентгеновскому излучению. Эти средства условно можно разделить на две группы: средства обнаружения пучков и средства определения их интенсивности и спектрального состава. Как правило, между этими группами существует пересечение, то есть средства обнаружения рентгеновских лучей до некоторой степени могут говорить о яркости излучения, а

3.2.1. Детекторы рентгеновского излучения. Рентгеновский детектор — это устройство для регистрации и определения интенсивности рентгеновских лучей. Существует множество типов рентгеновских детекторов, различающихся между собой принципом действия и техническими характеристиками. Однако, выбор детектора для работы на синхротронном излучении, по сравнению с измерениями на излучении рентгеновских трубок, представляет собой более сложную задачу из-за чрезвычайно высокой его яркости и интенсивности. Правда, есть и один момент, упрощающий решение этой задачи, поскольку в случае синхротрона, благодаря исключительно высокой интенсивности излучения и большим расстояниям между рентгенооптическими элементами, значительно меньше ограничений, связанных с размерами детекторов.

Принцип детектирования и определения интенсивности потока невидимых для человеческого глаза рентгеновских лучей основан на поглощении рентгеновского фотона в чувствительном материале детектора и преобразовании поглощенной энергии в сигнал или изображение, которое можно интерпретировать как величину связанную с числом поглощенных фотонов, а иногда и с их энергией и координатами точки поглощения.

Методы регистрации рентгеновских лучей делятся на *фотографические*, где поглощенные фотоматериалом рентгеновские кванты создают почернение фотоэмульсии, плотность которого может быть в дальнейшем сопоставлена с интенсивностью рентгеновских лучей, и *электронные*, когда поглощенные рентгеновские фотоны создают в активной среде детектора электрические заряды, которые могут измеряться и пересчитываться в интенсивности потока фотонов. Каждый из этих способов регистрации рентгеновских лучей находит свое применение в рентгеновской технике, хотя применение фотографических методов постоянно снижается и в последнее время они используются лишь в очень специфических случаях¹⁾. Более прогрессивны электронные методы, которые позволяют автоматизировать процесс измерений, чтобы проводить их дистанционно и повысить их производительность и точность. Наибольший интерес среди электронных детекторов для нас представляют *пропорциональные счетчики*, действующие в режиме счета отдельных квантов, и ионизационные камеры, позволяющие измерять мощные интегральные потоки фотонов порядка 10^{13} фотон/с и выше. Первые интересны в качестве конечных измерительных устройств в рентгеновских дифрактометрических установках или рентгеновских спектрометрах, тогда как вторые необходимы для слежения за интенсивностью первичного пучка (мониторинг интенсивности пучка).

Перечень типов детекторов, применяемых в рентгеноструктурном и рентгеноспектральном анализе, а также перспективных детекторов, разрабатываемых в последние годы, перечислен в табл. 3.1. Внутри каждого из этих типов имеется множество разных промышленно производимых моделей детекторов, и все это многообразие находит свое применение. К сожалению, идеальных детекторов, пригодных на все

¹⁾ Хотя фотопленка является почти идеальным координатным детектором, который может быть изогнут почти по любой поверхности и обеспечивает одновременную регистрацию дифрактограмм в широком диапазоне углов, она обладает большим количеством недостатков (см., например, Асланов, 1983). Главным из них является то, что она не позволяет следить за процессом съемки в режиме *on-line*. Полученный результат можно оценить только после завершения эксперимента, а в случае экспериментальной ошибки или неудовлетворительного качества фотоматериала, измерения порой повторить сложно или почти невозможно, особенно на установке коллективного пользования, такой, как источник СИ. Поэтому, несмотря на то, что фотографический метод регистрации рентгеновских лучей исторически был самым первым, сейчас он в чистом виде применяется редко.

Таблица 3.1. Детекторы, применяемые в рентгеновских экспериментах на синхротронном излучении, и детекторы находящиеся в стадии разработки. (таблица заимствована из Gruner et al., 2001)

Технология	Тип конвертера	Размерность
Рентгеновская пленка	Эмульсия AgBr	Двухкоординатный
Запоминающие фосфоры (IP — пластины с оптической памятью)	BaFBr:Eu ⁺²	Двухкоординатный
Сцинтилляционные кристаллы	NaI, CsI	Точечный
Газоразрядные	Ar, Xe	Точечные, линейные, двухкоординатные
Телевизионные	Фосфор	Двухкоординатный
ПЗС	Фосфор	Двухкоординатный
Кремниевые диоды	Монокристалл Si	Линейные, двухкоординатные
Лавинные диоды	Монокристалл Si	Точечные, линейные
Новые разрабатываемые типы детекторов		
Пиксельные матрицы	Si, GaAs, CdZnTe	Двухкоординатный
Плоские панели из аморфного кремния + фосфор	CsI, Cd ₂ O ₂ S	Двухкоординатный
Плоские панели из аморфного кремния + фотопроводник	PbI ₂ , CdZnTe, TlBr, HgI ₂	Двухкоординатный

случаи жизни, нет, и даже нельзя сказать, что детектор того или иного типа лучше других. Примерные характеристики разных детекторов указаны в табл. 3.2, а более подробно они будут обсуждаться далее.

Для регистрации излучения на синхротронных пучках чаще всего применяют электронные детекторы, т.е. приборы, вырабатывающие электрический импульс при поглощении гамма-кванта в чувствительном объеме детектора. По принципу преобразования $\Delta E \Rightarrow q$ энергии поглощенного излучения в электрические сигналы рентгеновские детекторы с электронной регистрацией можно разделить (см. ГОСТ 14105-69) на *ионизационные*, действие которых основано на ионизации вещества, и *радиолюминесцентные*, в том числе *сцинтилляционные*, использующие люминесценцию вещества под действием ионизирующего излучения. Ионизационные детекторы, в свою очередь, делятся на *газонаполненные* и *твердотельные*, в зависимости от детектирующей среды.

По виду выходных сигналов электронные детекторы, в свою очередь, разделяются на *дискретные*, на выходе которых образуется последовательность электрических сигналов (импульсов) от отдельных частиц, и *аналоговые*, на выходе которых сигналы от отдельных частиц не различаются, а регистрируется поток частиц, информация о котором получается по значению электрического тока в выходной

съемку дифрактограмм в режиме быстрой покадровой съемки («метод кино»). В работе Атемиуа (1995) при съемках на синхротронном излучении удавалось успешно проводить покадровую съемку, получая до 40 кадров на одной пластине размерами 127×127 мм² с временным разрешением 0,3 с. В принципе, временное разрешение может быть намного лучше.

Первые попытки применить IP детекторы для рентгеновских дифракционных измерений были предприняты японской фирмой Ригаку, где двумерный IP детектор использовался в безэкранный рентгеновской камере Вейсенберга¹⁾. В настоящее время в Японии и Европе существует довольно много производителей детекторов на IP для рентгеновской дифрактометрии. Например, известны быстрые системы детектирования IPDS, разработанные фирмой Stoe (Германия) для монокристалльной дифрактометрии. Эти детекторы позволяют снимать дифракционную картину на IP диаметром 180 мм до угла $2\theta = 66,0^\circ$. В области разработки IP детекторов очень активно работает еще одна немецкая фирма «X-ray Research GmbH», производящая широко известные системы детектирования MARRSEARCH с круглыми IP различного диаметра. В самом большом детекторе MAR345 этой фирмы используются IP диаметром 345 мм, позволяющие регистрировать дифракцию в пределах приемной апертуры 133° . Детектор имеет систему быстрого считывания данных, обеспечивающую считывание всей пластины с разрешением 150 мкм за 1,5 минуты. Фирма Ригаку производит в основном детекторы, работающие с прямоугольными пластинами, и в настоящее время наряду с IP-детекторами с плоским окном выпускает цилиндрический изогнутый детектор D/MAX-RAPID с пластиной 465×256 мм, изгибающейся по радиусу и охватывающей диапазон углов 2θ в 200° .

Хотя IP по своей природе является двумерным координатным детектором, ее можно использовать и как линейный ПЧД, экспонируя пластину полоса за полосой, как в описанном выше способе съемки с разрешением по времени. Такая возможность продемонстрирована, например, в работе Атемиуа (1995). Показано, что IP на основе люминофора BaF(Br,I):Eu²⁺ прекрасно действует как ЛПЧД с размером пикселя 100×100 мкм, обеспечивающий пространственное разрешение около 170 мкм и динамический диапазон регистрации от 1 до 10^5 . Эффективность детектирования зависит от длительности экспонирования, и превышает 80% для рентгеновских лучей с энергией 8–20 кэВ при средних экспозициях. Уровень шумового фона в таком детекторе не более трех рентгеновских квантов на один пиксель при энергии рентгеновских лучей 8 кэВ. Точность измерения интенсивности составляет около 0,5–1%.

Основным недостатком IP-детектора по сравнению с большинством детекторов с электронной регистрацией является отсутствие энергетического разрешения, что может компенсироваться применением специальных рентгенооптических устройств типа монохроматоров.

3.2.6. Учет мертвого времени детектора в экспериментах на СИ. После события регистрации каждого фотона счетчики квантов некоторое время «приходят в себя», и это время восстановления счетчика называют *мертвым временем*, в течение которого никакие фотоны, попадающие в счетчик не регистрируются и

¹⁾ Камера Вейсенберга обычно работает с регистрацией дифракционной картины на фотопленку. Принцип гониометра Вейсенберга хорошо известен и описан в большом количестве учебников и монографий по рентгеновской кристаллографии и рентгеноструктурному анализу (см., например, Асланов, 1983).

выпадают из статистики¹⁾, в результате чего число N_{rec} посчитанных счетчиком фотонов оказывается меньше их числа, фактически попавшего в детектор. Поэтому для получения правильных значений интенсивности I_t при высокой скорости счета результаты показаний I_{rec} рентгеновских счетчиков требуют систематической коррекции с помощью поправки на мертвое время. Такая поправка не нужна для **интегрирующих детекторов**, накапливающих сигнал регистрации, например, в таких как рентгеновская пленка, пластины с оптической памятью или телевизионные детекторы, в которых энергия фотонов прямо конвертируется фосфором детектора в накапливающееся световое изображение, а эффективность конверсии зависит от потенциала ионизации поглощающего материала фосфора.

Если измерения интенсивности I_t проводятся при равномерном и непрерывном потоке фотонов, то мертвое время τ , в течение которого детектор после регистрации одного фотона остается нечувствительным к новым фотонам, приводит к тому что в процессе регистрации N_{rec} фотонов детектор будет закрыт в течение суммарного времени τN_{rec} и за это время будут потеряны $\tau N_{\text{rec}} I_t$ фотонов из общего числа N_t упавших на детектор. Таким образом из-за мертвого времени детектор покажет, что за время t он насчитал N_{rec} фотонов, тогда как на самом деле их было N_t , причем

$$N_{\text{rec}} = N_t - \tau N_{\text{rec}} I_t \quad (3.7)$$

Если поток фотонов равномерный и непрерывный, то поделив обе части этого равенства на время t , можно получить формулу для коррекции зарегистрированных измерений I_{rec} и вычисления правильной интенсивности I_t , измеренной детектором с мертвым временем τ ,

$$I_t = \frac{I_{\text{rec}}}{1 - \tau I_{\text{rec}}} \quad (3.8)$$

Данное выражение широко и успешно используется на практике для коррекции интенсивности, измеряемой счетчиками квантов при работе с рентгеновскими трубками (Chipman, 1969). Величина τ является характеристикой каждого конкретного детектора и довольно легко определяется экспериментально путем сравнения показаний счетчика при измерениях потоков фотонов с сильно различающейся интенсивностью, регулируемой с помощью перекрытия пучка рентгеновских лучей фильтром ослабителем (см., например, Асланов, Фетисов и др., 1989; Aslanov et al., 1998).

Пульсирующая временная структура пучков синхротронного излучения делает поток фотонов разрывным во времени (см. рис.3.24), что нарушает корректность введения поправки на мертвое время с помощью выражения (3.8). Например, при

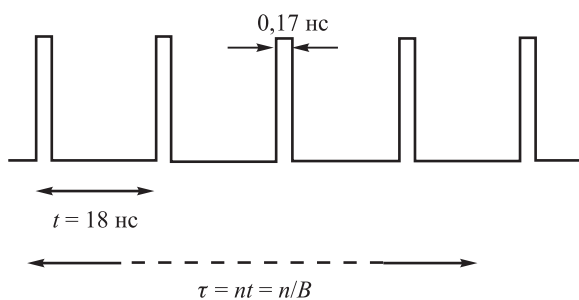


Рис. 3.24. Временная структура синхротронного излучения и соответствующее суммарное мертвое время счета, складывающееся из мертвого времени детектора и «мертвого времени источника», в течение которого фотоны от источника просто отсутствуют. Цифры приведены для источника NSLS при работе в режиме с 30 сгустками. Рисунок из Correns, (1992), гл. 4

¹⁾ Примерные значения мертвого времени разных счетчиков показаны в табл.3.2 и приводились выше при описании конкретных типов детекторов.

Выражения (3.16)–(3.19) справедливы для счета детектором, работающим в интегральном режиме измерения. Если повторить вывод для случая дифференциального режима измерений (с энергетическим окном дискриминатора), то получится выражение

$$N = \frac{N_{\text{rec}} e^{N/B}}{1 - nN_{\text{rec}}/B} = \frac{N_{\text{rec}} e^{N/B}}{1 - \tau N_{\text{rec}}}, \quad (3.21)$$

Когда $B \gg N$, т. е. когда скорость счета не велика, то $e^{N/B} = (1 + N/B)$, выражения (3.20) или (3.8) оказываются снова применимыми для коррекции измерений на мертвое время детектора.

Бывают особые случаи, в которых полученные формулы коррекции показаний детекторов на просчеты из-за мертвого времени требуют доработки или изменения. Примером такого случая может быть нарушение равномерности следования банчей в накопительном кольце (при выводе формул полагалось, что промежутки между банчами одинаковы). Так, накопительное кольцо NSLS обычно работает в режиме 25 электронных густков вместо равномерно распределенных по кольцу 30 густков. При таком режиме 5 фазовых позиций в накопительном кольце оказываются пустыми. Это приводит к тому, что 24 временных интервала между банчами одинаковы и равны 18 нс, а после них следует длинный пустой промежуток длительностью 108 нс. В таких случаях корректировать показания детектора на мертвое время надо с помощью комбинации двух формул с разными интервалами следования импульсов излучения.

Кроме приведенного примера, связанного с режимом работы источника СИ, очень часто встречаются проблемы мертвого времени, обусловленные свойствами самого детектора. Вывод всех полученных выше поправочных формул был основан на предположении, что мертвое время обусловлено техническими характеристиками электрической цепи детектора, определяющими время необходимое для формирования и счета импульса после регистрации фотона, и что мертвое время наступает после каждого *зарегистрированного* фотона. Эти предположения справедливы пока лимитирующим фактором является электрическая цепь детектора. Однако мертвое время может определяться и самими физическими процессами, происходящими в активной среде детектора при попадании туда фотона, например временем затухания световой сцинтилляции в сцинтилляционном детекторе, которая совсем необязательно будет зарегистрирована счетчиком. Такое мертвое время наступает после попадания в детектор каждого фотона, независимо от того зарегистрирован он или нет, и при достаточно интенсивном потоке фотонов мертвое время может стать непрерывно протяженным. Детектор с таким протяженным мертвым временем регистрирует только одно событие — попадание в него первого фотона, этот импульс не успевает затухнуть, когда приходят следующие фотоны, тоже создающие вспышки в рабочем теле детектора, причем детектор не может их различить и воспринимает как продолжение первой вспышки, а дальше детектор просто захлебывается и ничего не регистрирует. Этот случай полностью отличается от приведенного выше рассмотрения и не может быть исправлен с помощью полученных поправочных формул.

3.3. Устройства для управления пучками СИ

Источник СИ поставляет экспериментатору пучок белого излучения, включающего широчайший диапазон длин волн, а для эксперимента, как правило, требуется монохроматическое излучение или сравнительно узкий участок рентгеновского спектра. Кроме того, источник СИ это огромная машина, которую нельзя повернуть или сместить по желанию экспериментатора, чтобы направить пучок излучения в нужную

точку измерительной установки, как это делают с лабораторными рентгеновскими трубками. На пучках СИ эта проблема монохроматизации, коллимации и ориентации пучка рентгеновских лучей решается с помощью рентгеновской оптики. Рентгеновская оптика сильно отличается от стеклянной оптики, действующей на основе преломления света, с которой мы привыкли иметь дело в обычной жизни. Главными элементами рентгеновской оптики являются кристаллические дифракционные монохроматоры, действие которых основано на брэгговском отражении, определяемом формулой (1.53). Для коллимации лучей в пучке при работе с синхротронным излучением также широко используются рентгеновские зеркала полного внешнего отражения, которые очень редко применяются при работе с лабораторными источниками рентгеновских лучей.

Применение любой оптики, в том числе и рентгеновской, сопряжено с появлением хроматических (связанных с искажением спектра) и геометрических аберраций, а также с неизбежным поглощением излучения. Поэтому оптики часто шутят, что самая лучшая оптика — это отсутствие всякой оптики. Но поскольку без рентгеновской оптики проводить рентгендифракционные или рентгеноспектральные измерения на синхротронном излучении невозможно, то с этими негативными явлениями приходится сосуществовать и бороться, зная принцип действия и основные свойства рентгенооптических устройств и приспособлений.

3.3.1. Заслонки и коллиматоры. Заслонки, ловушки, коллиматоры или диафрагмы, которые также называют рентгеновскими щелями, являются самыми старыми элементами рентгеновской оптики, применявшимися уже в первых опытах с рентгеновскими лучами. По принципу действия эти элементы идентичны, так как работают на основе поглощения рентгеновских лучей, а их назначение определено их названием. Так, заслонки предназначены для того, чтобы перекрывать пучки рентгеновских лучей, а ловушки служат для «отлавливания» и поглощения части излучения, которое уже не будет дальше использоваться в эксперименте. Коллиматоры и щели применяются для ограничения сечения пучка до нужных размеров и направления его в нужную область экспериментальной установки (на другой оптический элемент, исследуемый образец или детектор).

Чтобы перекрыть интенсивный пучок рентгеновских лучей, на его пути ставится заслонка — просто толстая пластина из поглощающего материала, которая поглощает рентгеновские лучи, превращая их энергию в тепло. Для изготовления заслонок могут использоваться различные материалы, а их толщина рассчитывается в зависимости от поглощающих свойств материала для данной длины волны или энергии лучей в пучке. Известно¹⁾, что линейный коэффициент поглощения вещества пропорционален четвертой степени атомного номера Z^4 , поэтому чем больше атомный номер элемента, тем лучшим поглотителем рентгеновских лучей он является. По этой причине для изготовления заслонок перекрывающих рентгеновские пучки, особенно в компактных лабораторных установках, часто применяют свинец или вольфрам, что позволяет делать заслонки с малой толщиной. Понятно, что самые лучшие заслонки, ловушки или щели для рентгеновских лучей получились бы из урана, но уран слишком дорог и поэтому обычно их делают из вольфрама или свинца. Также понятно, что чем короче длина волны (или выше энергия) излучения, тем толще надо делать заслонку или ловушку пучка, чтобы перекрыть его полностью. Поскольку пучок синхротронного излучения несет фотоны с энергией вплоть до энергии накопительного кольца, то в синхротронах третьего поколения максимальная энергия фотонов, которые должны перекрываться заслонками, устанавливаемыми на

¹⁾ См. выражение (1.45).

компанией Oxford-Danfysik (например, монитор QBRM — монитор для точного измерения положения и интенсивности рентгеновского пучка с четырьмя *rip*-диодами). Испытания этого монитора, проведенные на APS (Brady, 2003), показали, что он способен определять центр тяжести положения пучков рентгеновских лучей с точностью не хуже 5 мкм при низких и высоких потоках фотонов (10^{11} фотон/с и выше) со скоростью экспозиции несколько миллисекунд.

3.3.3. Монохроматоры и кристалл-спектрометры — дифракционная оптика. Монокристалльные монохроматоры используются в рентгеновской технике для выделения монохроматических волн с момента открытия дифракции рентгеновских лучей. Действие этих устройств основано на брэгговском отражении монокристаллом рентгеновских лучей с длиной волны, определенной условием (1.30), которые затем используются в качестве первичного пучка в дифракционных или спектральных исследованиях. При работе на СИ монохроматоры применяются, как для отбора излучения с нужной длиной волны, так и для управления размерами и пространственным положением пучков рентгеновских лучей, а также в качестве спектрометров, обеспечивающих сканирование энергии рентгеновских лучей с высоким разрешением, например, в спектрометрии поглощения. Такое широкое разнообразие применений кристаллических монохроматоров требует использования различных схем монохроматоров в зависимости от конкретной задачи, решаемой с их помощью.

К настоящему времени изобретено много разных схем монохроматизации рентгеновских лучей с помощью кристаллических монохроматоров. В табл. 3.5 приведено краткое описание и основные характеристики наиболее часто используемых из них, с которыми нам придется встречаться при рассмотрении разных тем в данной книге. Некоторые из этих схем и варианты их развития мы рассмотрим в данной главе. Дополнительно к разным применениям этих схем нам придется также обращаться в главах, где будут рассмотрены области практического использования СИ в рентгеноструктурном и рентгеноспектральном анализе

Как видно из приведенных схем, монохроматоры состоят из дифракционно отражающих монокристаллов, которые должны быть установлены на устройстве, обеспечивающем регулировку угла между отражающими кристаллографическими плоскостями и направлением рентгеновских лучей. В фокусирующих схемах дополнительно требуется устройство для контролируемого изгиба кристалла. Особенно конструкция монохроматоров, работающих на пучках СИ, является часто возникающая необходимость охлаждения кристаллов, что связано с огромной мощностью излучения, которое при поглощении может вызывать сильный локальный нагрев кристалла и искажение его геометрии и структуры. Главнейшей частью монохроматоров, конечно, является кристалл, качество которого определяет все основные параметры монохроматора и область его возможного применения. При выборе кристалла важными характеристиками являются отражающая способность и совершенство кристаллической структуры, которое определяет спектральную *разрешающую способность* монохроматора.

3.3.3.1. Энергетическое (спектральное) разрешение монохроматора. Энергетическое разрешение кристалл-монохроматора (или, другими словами, *спектральная полоса пропускания* монохроматора) определяет ширину спектрального интервала, который можно вырезать с его помощью из белого излучения. Например, чтобы разделять близко расположенные пики на дифрактограмме порошка, необходимо проводить дифрактометрию на квазимонохроматическом излучении с узкой спектральной линией. Для простоты и точности математического описания формы дифракционных линий при рентгеноструктурном или рентгеноспектральном анализе желательно, чтобы используемая при измерениях спектральная линия имела гауссовское

сагиттальный изгиб второго кристалла монохроматора по схеме рис. 3.38, в, принцип которого подробно изложен в статьях Sparks et al. (1980); (1982) Подробное изложение и расчет фокусировки, выполненный Д. М. Хейкером приведен статье Аругюнян и др. (1999), а конструкция описана в статье Ковальчук и др. (1999).

Расчет кривизны, необходимой для получения нужного сечения пучка в зависимости от расстояний между источником излучения и кристаллом, а также между кристаллом и образцом проводится по тем же формулам, которые используются для оценки фокусировки рентгеновскими зеркалами (см. формулы (3.16) и (3.17), а также, например, книгу Мишетт (1981)).

3.3.4. Рентгеновские зеркала. Рассмотренная в предыдущем разделе дифракционная монокристаллическая оптика брэгговского отражения более или менее известна специалистам, имеющим опыт работы с рентгеновскими лучами от лабораторных источников, но гораздо меньше они знают об отражательной оптике типа рентгеновских зеркал, которые в лабораторных установках практически не применяются. Причина в том, что рентгеновские зеркала эффективно работают только с пучками параллельных или почти параллельных рентгеновских лучей, которые крайне редко получают или применяются в лабораторных рентгеновских дифрактометрах и спектрометрах. Кроме того, из-за своего физического принципа рентгеновские зеркала полного внешнего отражения имеют очень большую длину (до 1,5 м), часто превосходящую размеры самих лабораторных установок, поэтому применения в них не получили. Лишь в последние годы появились рентгено-оптические элементы на основе многослойных тонкопленочных структур сравнительно малого размера, в которых используется комбинация принципов брэгговской и зеркально отражающей оптики и которые способны работать с расходящимися пучками рентгеновских лучей. Указанные причины, препятствующие использованию отражательной оптики в лабораторных установках с рентгеновскими трубками, полностью отсутствуют при работе на источниках СИ, где рентгеновские зеркала нашли очень широкое применение. Такие зеркала служат фильтрами для отсеечения высших порядков отражения (высших гармоник) проникающих через кристалл-монокроматор и серьезно затрудняющих анализ результатов измерений. Но главной функцией рентгеновских зеркал является фокусировка пучка рентгеновских лучей, которая достигается за счет использования слегка изогнутых зеркал.

Действие рентгеновских зеркал основано на эффекте полного внешнего отражения рентгеновских лучей от гладкой поверхности, который был рассмотрен в § 1.3.1. Показатель преломления n для рентгеновских лучей описывается комплексной функцией от амплитуд рассеяния (см., например, Джеймс, 1950; Иверонова и Ревкевич, 1978; Сорпс, 1992 или Hart & Bergmann, 1998, а также § 6.7.5), как

$$n = 1 - \delta - i\beta, \quad (3.25)$$

где член α для вещества, состоящего из разных атомов, определяется как

$$\delta = \frac{\lambda^2 r_e}{2\pi} \sum_{\text{atoms}} (Z_k + f'_k) N_k. \quad (3.26)$$

Символ Z_k в этой формуле обозначает номер в периодической таблице элементов для атома сорта k , λ длина волны рентгеновских лучей, r_e классический радиус электрона по Томсону, N_k число атомов типа k в единице объема, а f' является действительной частью атомного фактора аномального рассеяния (см. § 1.7.2.2).

Уравнения для других геометрий зеркала (а также изогнутого монохроматора) приводятся в работах Casiuffo et al. (1987), Мишетт (1989) или для частных случаев их можно найти в статье Арутюнян и др. (1999).

3.3.4.1. Многослойные пленочные структуры. Новый этап развития отражательной рентгеновской оптики, ведущий к совершенно новым возможностям в рентгеновской технике, начался в последнее десятилетие 20го века с развитием технологии создания искусственных *многослойных тонкопленочных структур* (МТПС). Сегодня рентгеновские оптические элементы на основе синтетических многослойных тонкопленочных структур применяются в качестве монохроматоров и коллиматоров как на пучках синхротронного излучения, так и во многих лабораторных рентгеновских установках, включая спектрометры, томографы и т.п. где успешно дополняют возможности монокристалльных монохроматоров и рентгеновских зеркал скользящего отражения. Например, уже более половины вновь выпускаемых в мире современных рентгеновских дифрактометров стандартно комплектуются отражателями из синтетических многослойных структур и этот процент продолжает постоянно расти.

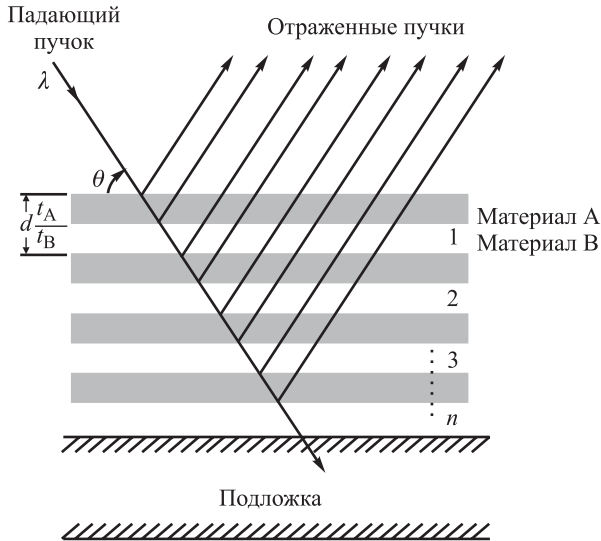


Рис. 3.48. Схема многослойного рентгеновского отражателя из n пар слоев. Отраженный пучок монохроматических лучей получается в результате интерференционного сложения лучей, отраженных слоями материала А, поэтому параметры λ и θ должны удовлетворять уравнению Вульфа–Брэгга, а относительная толщина слоев материалов А и В, соответственно с высоким и низким значениями атомного номера Z , должны выбираться так, чтобы обеспечить оптимальную отражательную способность. Полная отражательная способность является векторной суммой комплексных коэффициентов отражения в каждой паре интерференций лучей с разной длиной хода

Рентгеновский отражатель на основе МТПС представляет собой стопку из ряда чередующихся тончайших слоев материалов с высоким и низким показателями преломления (см. рис. 3.48). Такая структура обладает трансляционной периодичностью с периодом

$$d = t_A + t_B \quad (3.33)$$

и при попадании на нее рентгеновских лучей — вследствие разницы показателей преломления n_A и n_B слоев А и В — действует как брэгговский монокристалль-

монохроматоре ¹⁾ Confocal Max-Flux™, сегодня с успехом используются в лабораторных монокристаллических дифрактометрах. Благодаря их применению, существенно увеличивается светосила дифрактометра и повышается разрешающая способность рентгеноструктурного анализа.

3.3.5. Другие перспективные элементы рентгеновской оптики.

3.3.5.1. Отражательная оптика. Эффект полного внешнего отражения рентгеновских лучей от гладких поверхностей используется для изготовления трубчатых рентгеновских волноводов, работающих подобно оптическим волоконным световодам видимого диапазона. В этих устройствах применяется многократное зеркальное отражение лучей от гладкой поверхности при углах падения меньше θ_c .

Такое отражение можно получить, например, если направить пучок рентгеновских лучей под углом $\theta < \theta_c$ к поверхности цилиндрически изогнутого зеркала (см. рис. 3.58, а). В результате многократных отражений пучок можно повернуть на значительный угол φ вплоть до десятков градусов. Коэффициент отражения при этом сравним с коэффициентом отражения от зеркала скользящего падения из такого же материала и с такой же шероховатостью поверхности. Многократное отражение можно также получить, используя два почти параллельных зеркала (см. рис. 3.58, б).

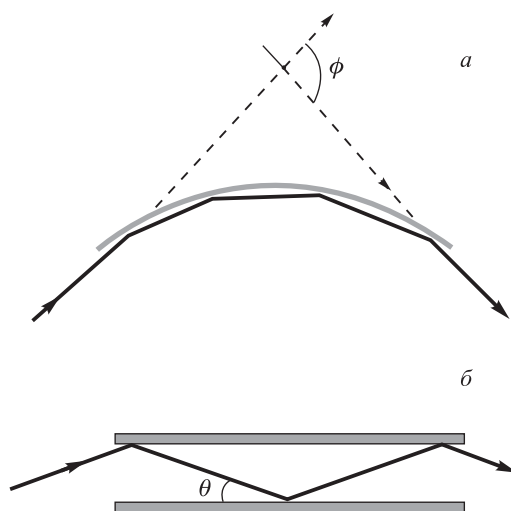


Рис. 3.58. Многократное отражение луча от поверхности изогнутого зеркала (а) и от двух параллельных зеркальных поверхностей (б) при угле скользящего падения $\theta < \theta_c$

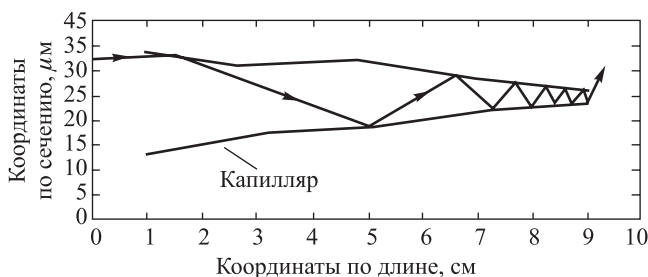


Рис. 3.59. Полное внешнее отражение рентгеновского луча от стенок капилляра переменного сечения

Подобный эффект также наблюдается, если в качестве зеркал использовать, например, стенки гладкой капиллярной трубки из кварца или стекла рис. 3.59. Любой рентгеновский луч, попадая внутрь такой трубки, например, при угле, меньшем, чем критический угол, будет многократно отражаться от внутренних поверхностей,

¹⁾ Подробнее см., например, http://www.osmic.com/New_Developments/Why_CMF.htm #Introduction .

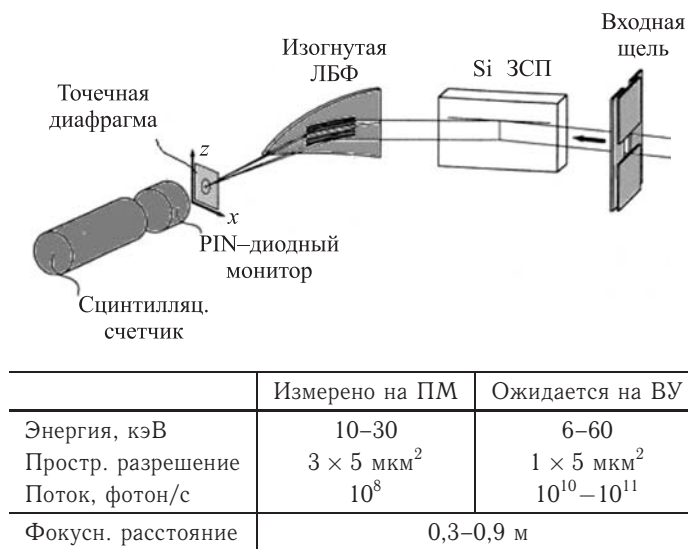


Рис. 3.62. Схема и результаты испытаний изогнутой линейной линзы Брэгга–Френеля (ЛБФ) с шириной внешней зоны 0,3 мкм и радиусом меридиональной кривизны около 3 м. Испытание проводилось на излучении от пучка VM5 из ПМ (поворотного магнита) накопительного кольца ESRF. В таблице под рисунком в крайней правой колонке приведена экстраполяция полученных результатов к условиям пучка ID22 из ВУ (вставного устройства)

3.3.5.3. Преломляющая оптика — рентгеновские линзы. Наконец надо сказать, что в последние годы разрабатываются и проходят испытания рентгеновские преломляющие линзы похожие по действию на обычные оптические фокусирующие линзы. Эти рентгеновские оптические устройства были опробованы на практике (Snigirev et al., 1996) в 1996 г. А. А. Снигиревым с сотрудниками (ИПТМ РАН, Черноголовка), потом прошли довольно интенсивный путь совершенствования и сегодня уже практически применяются на ряде источников СИ для получения хорошо сфокусированных микропучков рентгеновских лучей с высокой плотностью потока фотонов.

Идея рентгеновских преломляющих линз Снигирева заключается в следующем. Показатель преломления рентгеновских лучей немного меньше единицы (коэффициент преломления лучей с энергией квантов 5–40 кэВ в рентгенопрозрачных материалах отличается от единицы на $\sim 10^{-5}$), причем вакуум и газы для рентгеновских лучей оказываются более плотными средами, чем твердое тело. Поэтому рентгеновские лучи по сравнению с обычным светом ведут себя противоположным образом по отношению к преломлению разными средами. Если свет фокусируется двояковыпуклой стеклянной линзой, попадая в нее из воздуха или вакуума, то рентгеновские лучи будут фокусироваться двояковыпуклой вакуумной полостью в стекле, попадая в нее из стекла. Если в материале с низким коэффициентом поглощения рентгеновских лучей¹⁾ сделать, например, цилиндрическую пустоту (просверлить отверстие), то эта пустота будет фокусировать рентгеновские лучи. Фокусное расстояние такой

¹⁾ Стекло, используемое для изготовления оптических линз, по прозрачности не лучший материал для рентгеновских лучей. С точки зрения минимума поглощения для изготовления рентгеновских преломляющих линз наиболее подходящими материалами оказываются литий и бериллий.

помощью сильфонных соединений), а трубы крепятся в держателях с устройствами для регулировки их положения.

Надо отметить, что все части оборудования канала транспортировки пучка СИ имеют довольно большие размеры и вес. Это же относится и к трубам канала, которые, помимо своей большой собственной длины, часто снаружи закрываются свинцовой радиационной защитой. Поскольку транспортировка пучков жестких рентгеновских лучей очень большой интенсивности связана с серьезной радиационной опасностью, то толщина свинцовой защиты должна быть достаточной для поглощения рассеянного излучения от остаточных газов или случайных касаний пучка стенками канала. Подобную радиационную защиту часто делают простой обмоткой трубы свинцовой фольгой¹⁾. Все это делает канал транспортировки пучка очень тяжелым, поэтому для крепления его частей обычно используются специальные (как правило регулируемые) достаточно прочные и массивные подставки.

3.5. Отбор и монохроматизация СИ для экспериментов

Проблема отбора излучения из синхротронного пучка и его подготовка для эксперимента осуществляется с помощью рентгенооптического блока, располагающегося между выходом канала излучения из источника в экспериментальный зал (портом пучка СИ) и экспериментальной установкой пользователя (экспериментальной станцией), и состоящего из комбинации различных элементов рентгеновской оптики. Такими элементами являются коллимирующие щели, монокристалльные монохроматоры, абсорбционные ослабители и фильтры излучения, монокристалльные монохроматоры, фильтрующие и фокусирующие рентгеновские зеркала полного внешнего отражения. В последнее время в рентгенооптических блоках для фокусировки и коллимации на пучках СИ стали также применяться преломляющие и отражающие линзы разного типа.

Система отбора и подготовки пучков рентгеновских лучей из белого спектра зависит от задачи эксперимента и типа источника, который используется в данной экспериментальной установке. Свойства СИ, в частности горизонтальная поляризация излучения из поворотных магнитов, налагает определенные требования и ограничения на компоновку рентгеновской оптики. Например, при работе на синхротронном излучении из соображений максимальной эффективности отражения дифракционные плоскости²⁾ и плоскости отражения обычно располагаются вертикально, в отличие от лабораторных установок, где они чаще всего расположены горизонтально, чтобы упростить конструкцию измерительной установки. Такая схема исключает ослабление интенсивности отобранного пучка из-за поляризационного фактора с изменением угла θ при перестройке длины волны и при проведении дифракционных исследований. Задача разработчиков пользовательского канала — обеспечить отбор излучения из какой-либо доступной точки источника синхротронного излучения, обработать пучки так, чтобы они давали требуемую для конкретного эксперимента энергию (длину волны), энергетический интервал (ΔE), сходимость/расходимость лучей, поляризацию, размер фокусного пятна и интенсивность. Задача эта не универ-

¹⁾ Поскольку для откачки труб до сверхвысокого вакуума часто приходится нагревать стенки вакуумных объемов до температуры выше 100°C , чтобы удалить адсорбированные газы, то свинцовая защита должна быть такой, чтобы ее можно было легко снять, а потом поставить снова.

²⁾ Под дифракционной плоскостью и плоскостью отражения здесь понимается геометрическая плоскость, содержащая первичный и отраженный лучи и нормаль к отражающей плоскости оптического элемента.

самостоятельно. Поэтому большинство крупных центров синхротронного излучения создавало собственные цеха, мастерские и лаборатории для разработки и производства экспериментальных установок. В них создавалось уникальное оборудование, часто с очень хорошими техническими характеристиками. И до настоящего времени подобные разработки ведутся и продолжается производство отдельных модулей для оборудования источников СИ в крупных центрах по использованию СИ, таких, как, например, HASYLAB в Германии, ESRF во Франции, APS в США, SPring-8 в Японии или Новосибирский ИЯФ СО РАН в России. Однако, производимые таким образом установки и устройства, несмотря на их высокий научно-технический потенциал, оставались и остаются полукустарными опытными образцами, в которых всегда присутствуют неустраненные недоработки, осложняющие работу с ними. Поэтому с приходом на рынок оборудования СИ специализированных компаний, которые во взаимодействии с центрами синхротронного излучения поставили разработку и производство необходимых модулей и устройств на промышленную основу, даже эти крупные институты все больше пользуются оборудованием, изготавливаемым такими компаниями.

Что необходимо для создания измерительной установки для проведения исследований материалов с помощью синхротронного излучения?

Главным элементом в любой измерительной установке является исследуемый образец. Существует мало рентгеновских методов исследования материалов, в которых образец остается неподвижным в процессе измерений. Чаще всего требуется перемещать и поворачивать его в трехмерном пространстве, например, чтобы воздействовать неподвижным пучком рентгеновских лучей с разных сторон, или подвергать его различным внешним воздействиям, чтобы получить нужные сведения о структуре и свойствах вещества. Одновременно с этим необходимо независимо перемещать детектор, регистрирующий сигналы рентгеновского излучения вокруг образца. Для этого используются специальные механические устройства, называемые гониостатами, гониометрами, дифрактометрами и спектрометрами, которые обеспечивают трехмерные перемещения и ориентации образца и позволяют подставлять его под различные внешние воздействия. Достаточно подробное описание рентгеновских гониостатов, гониометров и дифрактометров можно найти, например, в книгах Асланов (1982) и Aslanov, Fetisov & Howard (1998). Наиболее распространены трехосные гониометры с эйлеровой геометрией и каппа-геометрией, обеспечивающие трехмерное изменение ориентации образца по полной сфере, которые обычно применяются в рентгеновской дифрактометрии монокристаллов, и двухкружные гониометры, поворачивающие образец вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, которые чаще всего применяют в дифрактометрии порошков. В практике рентгеновских исследований веществ с помощью СИ иногда приходится применять и более сложные гониометры, например, с 5, 7 и даже большим числом вращательных степеней свободы. Все определяется задачей. В то же время, например, для порошковой дифрактометрии образцов в капилляре с использованием координационного детектора может оказаться достаточным использовать простейший гониометр с одной осью. Множество гониометров разной сложности и размеров, которые годятся для проведения рентгеновских дифракционных и спектральных исследований веществ на синхротронном излучении, промышленно производится специализированными компаниями в Германии, Нидерландах, Японии и США. Ряд подобных устройств для манипуляций с образцами разработан в России Институтом Кристаллографии РАН, но их серийное производство не налажено.

Существует множество различных камер, в которых исследуемый образец может подвергаться различным воздействиям: нагреваться до высоких температур, охлаждаться, подвергаться высоким давлениям, облучаться лазером и т.п. Существуют

специальные ячейки, обеспечивающие рентгеноструктурные и рентгеноспектральные измерения образцов в сверхглубоком вакууме, сверхвысоком давлении, высоких или криогенных температурах, в мощных магнитных полях, в растворенном или расплавленном состоянии, при воздействии коррозионной среды или излучения импульсного лазера, и т. д., и т. п. Часто размеры этих приспособлений не удается сделать как угодно малыми. Поэтому для работы с ними требуется использовать гониометры очень больших размеров, чтобы в них можно было встроить соответствующие приставки.

Необходимыми элементами экспериментальной станции являются рентгеновские детекторы. Они нужны, как для счета фотонов, рассеянных исследуемым образцом, так и для контроля интенсивности поступающего и прошедшего через образец пучков. В зависимости от задачи эксперимента могут использоваться точечные, линейные координационные, телевизионные детекторы с разрешением и без разрешения по энергии. В действующих сегодня экспериментальных станциях можно найти все типы детекторов, рассмотренные выше. Количество типов и моделей детекторов имеющихся на мировом рынке сегодня огромно, и постоянно разрабатываются все более совершенные. Поэтому не представляет большой сложности выбрать нужный для конкретной задачи, хотя он может оказаться и очень дорогим.

Различные щели, коллиматоры и фильтры рентгеновских лучей, которые также широко применяются в установках экспериментальных станций, практически не отличаются от стандартно используемых в соответствующих лабораторных установках, и их можно легко купить либо изготовить по заказу.

Поскольку синхротрон нельзя переместить в пространстве, как рентгеновскую трубку, что обычно делается в лабораторных установках, когда нужно сместить пучок рентгеновских лучей, то на экспериментальных станциях приходится подгонять положение самой измерительной установки к положению пучка. Поэтому установки экспериментальных станций целиком или их блоки крепятся на специальных подставках (оптических столах или оптических скамьях), которые имеют механизмы трансляционных перемещений в координатах XUZ . Более сложные и дорогие подставки могут иметь механизмы поворота и наклона. Выбор типа и сложности подставок определяется сложностью и конструкцией экспериментальной станции. Уместно лишь отметить, что при выборе подставки следует стремиться к минимуму степеней свободы в ней. Лишние степени свободы не облегчают юстировку, но создают лишние проблемы и снижают стабильность измерительной установки.

При создании экспериментальной станции обычно возникает вопрос, в какой атмосфере должна работать измерительная станция. Может ли она работать на открытом воздухе или для нее требуется вакуумная камера. Использование вакуума, обычной атмосферы или гелия зависит от конструкции конкретной установки и решаемой с ее помощью задачи. Иногда и сами измерительные установки делаются вакуумными, чтобы понизить рассеянный фон и флуоресцентный фон атмосферного воздуха. Например, если проводится анализ легких элементов, то флуоресцентное излучение от атмосферы может мешать эксперименту. Поглощение фотонов в воздухе является также большой помехой при работе с длинноволновым излучением (энергия < 5 кэВ). В случае дифракционных исследований на жестком излучении с энергией > 8 кэВ влияния рассеяния и поглощения в атмосфере не столь велико. Однако при больших расстояниях между образцом и детектором чаще всего установку закрывают пленкой ПВХ и этот замкнутый объем заполняют гелием для снижения паразитного фона и поглощения фотонов.

Здесь мы лишь кратко рассмотрели общий подход к созданию рентгеновских установок для исследований на синхротронном излучении. Конечно, требования к

элементам и деталям экспериментальной установки различны в разных экспериментальных методах. В одних жесткие требования предъявляются к характеристикам детекторов, их спектральному и пространственному разрешению, динамическому диапазону и т. п., тогда как в других более важно иметь прецизионный гониометр со сложной системой координат при более мягком подходе к параметрам детектора. Все зависит от конкретного метода и задачи эксперимента, но структура установки внутри экспериментальной станции везде одна: детектор-монитор первичного пучка — держатель-гониометр образца — детектор рассеянного излучения! Поскольку оборудование экспериментальных станций, как и оборудование оптического блока пучка СИ, каждый раз уникально, то все варианты здесь описать невозможно. Но ряд конкретных экспериментальных установок для исследования структуры веществ с помощью СИ будет рассмотрен в последующих главах, посвященных практическим применениям синхротронного излучения.