

Глава 2

ЧТО ТАКОЕ СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ?

Открытие рентгеновских лучей в конце 19 века в последующем сильно повлияло на все отрасли науки и техники. Сегодня, кажется, невозможно найти какую-либо область деятельности человека, от медицины и биологии, физики, химии, материаловедения, машиностроения, химической промышленности до гуманитарных наук, где бы эти лучи не применялись в том или ином виде с большой пользой. Многие современные достижения в исследовании строения материи и создании новых материалов и веществ, без которых трудно представить нашу сегодняшнюю жизнь, в значительной степени обязаны своим появлением рентгеновским лучам. И, конечно, рентгеновские лучи, будучи инструментом для исследования атомного строения веществ, внесли неоценимый вклад в химическую науку. Ко второй половине XX-го века знания в области физики рентгеновских лучей и возможности их практического применения, казалось бы, достигли насыщения и, можно было бы подумать, остается только совершенствовать отдельные «мелочи» в инструментальной части методов рентгеновского анализа. Однако, именно во второй половине 20-го столетия физика преподнесла подарок: рентгеновские лучи из источников синхротронного излучения для прикладного использования.

В начале 1960-х годов, когда это излучение стало доступным для первых прикладных испытаний, наверно, только очень продвинутые физики могли вообразить, насколько оно может круто поменять жизнь. Отличие синхротронного излучения от излучения рентгеновских трубок состоит в следующих основных характеристиках: (1) синхротронное излучение имеет широкий непрерывный спектр; (2) сильно поляризовано; (3) возникает короткими импульсами; (4) сильно коллимировано (его лучи распространяются узким пучком типа света прожектора); (5) обладает яркостью на много порядков (в тысячи и миллионы, а сегодня уже в 10^{20}) раз выше, чем излучение рентгеновских трубок. Первые попытки его практического применения показали, что оно весьма перспективно для рентгеновской спектроскопии и просвечивания. Вначале рентгеноструктурщиков в этом «чудовище» насторожили и даже оттолкнули два факта: непрерывность спектра, которая требовала нового подхода к монохроматизации излучения (поскольку большинство методов рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа использует монохроматические рентгеновские лучи), и импульсный характер (большая часть существовавшей техники работала с непрерывно излучающими источниками рентгеновских лучей). И, конечно, тогда трудно было всерьез думать о широком практическом использовании этого излучения из-за гигантских размеров установок, генерирующих его, доступ к которым для специалистов в области прикладного использования рентгеновских лучей был крайне

ограничен. Все остальные характеристики синхротронного излучения уже тогда были привлекательны для исследователей.

Как потом оказалось, потребовалось не так много времени, чтобы научиться отбирать из спектра излучение с нужной длиной волны, а проблема, связанная с тем, что каждая лаборатория не может себе позволить купить отдельный синхротрон, решилась созданием центров коллективного пользования при источниках синхротронного излучения. Также оказалось, что импульсный характер синхротронного излучения не является недостатком, а есть его важнейшее достоинство для проведения исследований с разрешением по времени. Более того, когда установился вкус к использованию временной структуры синхротронного излучения для исследования динамики процессов в веществе, у пользователей возникло желание иметь еще более короткие импульсы излучения, чтобы например, изучать быстрые процессы диссоциации и т.п., время жизни которых составляет 10^{-12} с и меньше (длительность импульса синхротронного излучения составляет около 100 пикосекунд, т.е. около 10^{-10} с). Здесь физики в последнее десятилетие XX-го века опять преподнесли подарок себе и всем остальным, разработав принцип рентгеновского лазера, длительность импульса излучения в котором может составлять менее 1 фемтосекунды (10^{-15} с), а яркость излучения может превышать яркость современных источников синхротронного излучения на 10–12 порядков. Дополнительным достоинством такого источника является монохроматичность и когерентность излучения (как у оптического лазера), возможность плавной регулировки длины волны и создания любого типа поляризации излучения. Правда, первые реально действующие для потребителя излучения источники такого типа для рентгеновского диапазона (вплоть до длин волны порядка 1 Å) находятся еще в стадии строительства и заработают не раньше 2009–2012 года, но они откроют новую эру в применении рентгеновских лучей и подтолкнут к разработке новых методов рентгеновского анализа, которых не было раньше и нет еще сегодня.

Что же дает синхротронное излучение в рентгеновской области, которой мы здесь ограничиваем рассмотрение этого уникального средства исследования структуры химических веществ, дополнительно к тому, что уже умеют делать на обычном излучении рентгеновских трубок? Во-первых, это фантастическое увеличение скорости рентгеноструктурных и рентгеноспектральных измерений, что позволяет не только исследовать структуру молекул, но и наблюдать динамику процессов образования и изменения конформации молекул и кластеров, и даже процессы разрыва и образования химических связей. Становится доступным исследование переходных процессов ионизации, диссоциации и изменения электронной плотности в молекулах. Уже сегодня с помощью синхротронного излучения проводятся исследования таких сложных явлений, как магнитное и структурное упорядочение вблизи фазовых переходов в конденсированных средах, включая аморфные и жидкие фазы. Пока эти исследования ограничены основным состоянием химических систем, но уже начинаются исследования динамики процессов, которые существенно расширятся с появлением рентгеновских лазеров и линейных ускорителей рекуператоров, позволяющих проводить измерения с временным разрешением порядка 10^{-15} с. Высокая интенсивность синхротронного излучения позволяет уменьшить размеры исследуемых объемов вещества до субмикронных размеров (менее 100 нм), благодаря чему станет возможно изучать свойства веществ с неомогенным составом и наноструктур. Простота настраиваемости СИ на любую длину волны резко расширила использование методов аномальной дифракции для решения фазовой проблемы в рентгеноструктурном анализе макромолекулярных кристаллов. Уникальные поляризационные свойства и возможность получения когерентных рентгеновских лучей открывают огромные перспективы для исследования важных процессов в полимерах, таких

как формирование структуры, переориентация полимерных цепочек, влияние трения, кристаллизация, нуклеация или диффузия. Еще одним новым методом исследования, который, скорее всего, появится с введением в действие первых источников когерентного рентгеновского излучения, станет трехмерная голография строения вещества с атомным разрешением, которая в отличие от оптической голографии будет обладать еще и селективностью по химическим элементам.

Чтобы потенциальным пользователям можно было плодотворно думать об использовании этих и других возможностей, предоставляемых синхротронным излучением, следует иметь некоторое представление о том, что это за излучение, как оно получается, каковы его свойства и как с ним работать. Для этого надо хотя бы на самом начальном уровне (в «нулевом приближении», как говорят физики) с природой и свойствами СИ. Хотя спектр синхротронного излучения простирается от ИК области до жесткого рентгена и каждая из областей этого спектра имеет большую практическую ценность, мы ограничим наше рассмотрение рентгеновской областью спектра (длины волн 0,2–2,0 Å), так как весь наш довольно объемистый последующий обзор сможет охватить лишь рентгеноструктурные и рентгеноспектральные методы исследования атомной структуры веществ.

Поскольку данный обзор написан для начинающих исследователей с минимальным количеством формул, то для интересующихся подробностями теории и практики получения и применения синхротронного излучения можно рекомендовать за дополнительными сведениями обращаться к специальной литературе по этим вопросам, которая имеется в большом количестве и ежегодно публикуется на английском языке, а также, хотя и в существенно меньшем количестве, есть на русском языке. Но надо иметь в виду, что имеющаяся литература главным образом предназначена либо для специалистов, ориентированных на получение синхротронного излучения, либо для профессионалов, разрабатывающих инструментальные методы анализа. Среди монографий по синхротронному излучению можно отметить, во-первых, книги (Тернов, Михайлин, 1986), (Тернов, Михайлин, Халилов, 1987), введение в синхротронное излучение (Margaritondo, 1988, на англ. яз.), касающееся главным образом практических вопросов, или более теоретическое введение (Wiedemann, 2002 на англ. яз.), и наконец, ориентированные на химиков книги (Sham, 2002; и Margaritondo, 2002 на англ. яз.), где основы получения и применения синхротронного излучения изложены в довольно популярной адаптированной форме.

2.1. Синхротронное излучение: его свойства и получение

Синхротронное излучение — это *магнитотормозное* электромагнитное излучение, испускаемое *релятивистскими* зараженными частицами, когда постоянное магнитное поле заставляет их двигаться по круговым орбитам. Синхротронное излучение и его основные свойства были предсказаны теоретически задолго до того, как появились первые ускорители заряженных частиц и СИ было получено на практике, что является ярким примером, когда развитие, казалось бы, фундаментальной теоретической физики опережает и стимулирует технический прогресс. В отличие от обычных рентгеновских лучей, случайно обнаруженных В. К. Рентгеном, синхротронное излучение было рассчитано из основных физических принципов.

Существование электромагнитного излучения от движущихся с ускорением заряженных частиц следовало уже из уравнений классической электродинамики, опубликованных Дж. К. Максвеллом во второй половине 19 века. Основателем же теории синхротронного излучения считается английский физик Дж. А. Шотт, который в 1912 году в своей статье описал поляризационные свойства и угловое распределение электромагнитного излучения электрона на круговой орбите, теоретически предска-

Кардинально другая ситуация получается для *релятивистских* и *ультрарелятивистских* частиц, например, электронов, испускающих синхротронное излучение. В этом случае как излучаемые электромагнитные волны распространяются со скоростью света, так и частица (т. е. «антенна», которая продолжает излучать с постоянной частотой) движется с околосветовой скоростью, поэтому сильно выражен эффект Доплера, а поведение частиц уже подчиняется законам релятивистской электродинамики. В результате электромагнитное излучение релятивистской заряженной частицы проявляется сильную угловую направленность, когда все мгновенное излучение оказывается сосредоточено в узком конусе с углом раствора θ порядка $1/\gamma$ (что для электронов с энергией 2 ГэВ составляет около 0,25 мрад или ~ 50 угловых секунд), который направлен по касательной к орбите электрона по ходу его движения. Поскольку наблюдатель, смотрящий на орбиту движения частиц, видит не точку равную размеру одной частицы, а некоторый конечный участок ее орбиты, то для него излучение распределено в форме почти плоского веера, направленного перпендикулярно вектору центростремительного ускорения и по ходу излучающего электрона, что и показано

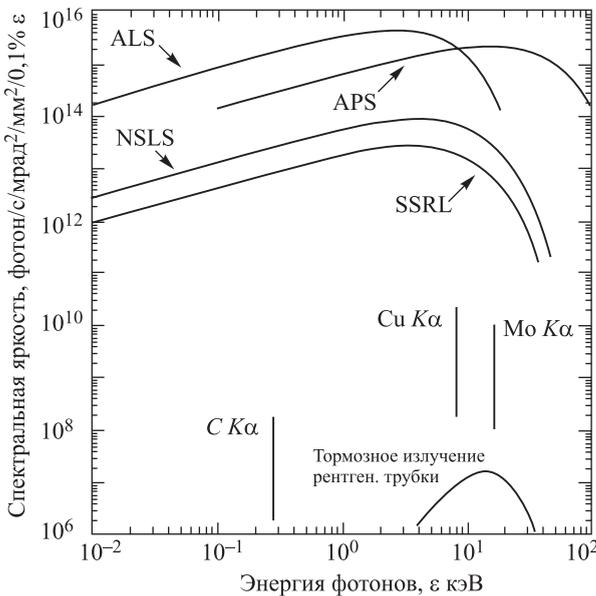


Рис. 2.2. Примеры спектров СИ из поворотных магнитов источников с разными параметрами. Характеристики по названиям приведены в §6.11.1. Энергия накопителя: ALS $E = 1,9$ ГэВ; APS $E = 7$ ГэВ; NSLS $E = 2,8$ ГэВ; SSRL (SPEAR-2) $E = 3$ ГэВ. Для сравнения показаны значения яркости характеристических эмиссионных линий из рентгеновских трубок и усредненный спектр тормозного излучения рентгеновской трубки. (Данные из Navrotski (2), 2004)

Так же излучение от быстро летящей частицы для наблюдателя, находящегося в лабораторной системе координат, представляется как бы испускаемым в направлении движения частицы.

на рис. 2.1, б.

Угол расходимости лучей синхротронного излучения перпендикулярно плоскости орбиты обратно пропорционален лоренц-фактору электрона, т. е.

$$\theta_v \sim \frac{mc^2}{E} = \frac{1}{\gamma}. \quad (2.4)$$

Чем больше энергия электронов, тем меньше расходимость пучка перпендикулярно плоскости орбиты. Следовательно синхротронное излучение сильно коллимировано.

Такой эффект самоколлимации и направленности СИ можно понять на качественном уровне, если сравнить электромагнитное излучение релятивистских электронов, движущихся с ускорением, например, с быстро едущим грузовиком, перевозящим в кузове картофель, который рассыпается во все стороны. Скорости рассыпающихся картофелин и грузовика сравнимы. Для наблюдателя, стоящего рядом с дорогой перед грузовиком, все рассыпающиеся из кузова картофелины казались бы летящими вперед.

Вторым свойством СИ, также связанным с эффектом Допплера, является его спектральное распределение. Для наблюдателя, находящегося в лабораторной системе координат, полная масса частицы на релятивистских и ультрарелятивистских скоростях начинает зависеть от скорости, как $m = m_0\gamma$, происходит релятивистское лоренцовское сжатие длины волны излучения в γ раз и доплеровский сдвиг частоты излучаемых электромагнитных волн в сторону более высоких частот $\omega \gg \omega_c$. Таким образом, основная доля излучаемой энергии оказывается сдвинутой в более высокие частоты, а максимум приходится на частоту

$$\omega_{\max} \sim \omega_c \gamma^3, \quad (2.5)$$

т. е. на гармонику с частотой в γ^3 раз большей, чем частота обращения электрона по орбите. С учетом того, что для электрона или позитрона $\gamma = 1957E$, и что ультрарелятивистский электрон вращается по орбите длиной около 300 м с частотой порядка 10^6 Гц, видно, что при энергии электронов 5 ГэВ максимум интенсивности синхротронного излучения приходится на частоту $\sim 10^{18}$ Гц, которая соответствует рентгеновскому диапазону (см. классификацию на рис. 1.1). В этой области интервалы между кратными частотами (гармониками) малы настолько, что распределение частот в спектре практически сливается и спектр синхротронного излучения можно считать непрерывным.

Важно отметить, что, если электрон испускает синхротронное излучение в области рентгеновских частот на высших гармониках, то одновременно излучаются и более низкие частоты вплоть до частоты обращения электрона по орбите, которая соответствует диапазону УКВ или СВЧ волн. Это значит, что спектр синхротронного излучения простирается от радиоволн до рентгеновских лучей, включая ИК-, УФ-излучение и видимый свет, и поэтому синхротронное излучение можно наблюдать визуально как яркий пучок света, что имеет место на самом деле, если сделать прозрачное окно в камере синхротрона. Пример спектрального распределения СИ для ряда синхротронов показан на рис. 2.2.

Концентрация всего излучения в узком конусе делает синхротронное излучение в тысячи и миллионы раз ярче циклотронного излучения или излучения рентгеновской трубки, в которых фотоны рассеиваются во все стороны от излучающих частиц.

2.2. Принципиальное устройство синхротрона

Синхротрон — это циклический ускоритель заряженных частиц, представляющий собой электровакуумную установку с приблизительно кольцевой вакуумной камерой, в которой частицы (электроны или позитроны), подталкиваемые продольными импульсами электрического поля, ускоряются до скорости близкой к скорости света, а стоящие у них на пути мощные постоянные магниты своим магнитным полем направляют их движение по замкнутой траектории (см. схему на рис. 2.3).

Генератором синхротронного излучения могут быть любые релятивистские заряженные частицы: электроны, позитроны (которые получать сложнее), протоны и т. п. (заметим, что для ускорения протонов до релятивистских скоростей требуется во много раз больше энергии, чем для ускорения электронов). Синхротронное излучение легких частиц, электронов и позитронов, при равных условиях ускорения, значительно интенсивнее, чем у протонов, так как, благодаря малой массе, их скорость приближается к скорости света уже в самом начале процесса ускорения и далее может рассматриваться как практически постоянная. В наши дни большинство синхротронов, используемых для генерации синхротронного излучения, работает на электронах, хотя уже есть довольно много позитронных источников СИ, которые

электрона численным равенством $\gamma = 1957E$, если величина энергии берется в ГэВ. Для прикидочных оценок можно пользоваться более простым соотношением $\gamma \approx 2E$, и наоборот $E \approx 0,5\gamma$, если измерять энергию электрона в единицах МэВ.

Очевидно, что с увеличением энергии электрона когерентная длина возрастает и для ультрарелятивистских электронов может достигать «макроскопического» значения, превышающего расстояние между соседними излучателями (ядрами атомов). В таких случаях излучение от соседних центров будет происходить когерентно.

2.7.4.2. Тормозное излучение из аморфных мишеней. При прохождении через вещество релятивистские электроны, как и медленные электроны в рентгеновской трубке, взаимодействуют с ним и испускают электромагнитное излучение. Как и в рентгеновской трубке, процесс взаимодействия сопровождается рассеянием электрона на неподвижных центрах с зарядом Z , при котором траектория электрона отклоняется и испускается тормозное излучение (происходят радиационные потери энергии электрона), а также ионизационными явлениями, в которых может возникать характеристическое излучение из атомов вещества. Если атомы вещества упорядочены, например, в кристаллическую решетку, то при определенных условиях могут возникать когерентные процессы, влияющие на процесс излучения и на спектр. Если же таких когерентных эффектов не возникает, то вещество, как аморфное, так и кристаллическое, и даже монокристаллическое по отношению к электронам теоретически можно рассматривать, как аморфное.

Как и положено тормозному излучению, спектр ТИ релятивистских электронов имеет высокоэнергетическую границу — коротковолновый край, где энергия фотонов ε равна максимальной энергии электронов $E(0)$. В отличие от тормозного излучения рентгеновских трубок, где энергия фотонов у коротковолнового края измеряется десятками килоэлектронвольт, в случае ТИ ультрарелятивистских электронов энергия гамма-излучения у коротковолнового края достигает десятков и тысяч МэВ.

И теория, и экспериментальные наблюдения показывают, что, как в случае умеренно-релятивистских ($E > 10$ МэВ), так и ультрарелятивистских ($E \geq 500$ МэВ) электронов, их радиационные потери (потери на ТИ) превышают ионизационные потери (на характеристическое излучение) в десятки раз даже в случае толстых мишеней. В случае тонких мишеней ($x \leq 0,0006X_0$) ионизационные потери почти равны нулю, и основным излучением является ТИ. Но главное — это то, что в случае тонких мишеней и ультрарелятивистских электронов пространственное распределение тормозных фотонов всех энергий $0 < \varepsilon \leq E$ практически одинаково и ограничено конусом с углом $\theta_\gamma \sim \gamma^{-1}$ в направлении импульса первичного электрона (рис. 2.22, а), то есть похоже на пространственное распределение излучения из магнитных ондуляторов. Но в отличие от организованного движения электронов в магнитных вставных устройствах, их движение в аморфной мишени беспорядочно, поэтому ТИ неполяризовано.

Спектр тормозного излучения релятивистских электронов в аморфных веществах очень точно описывается квантовой электродинамикой и достаточно хорошо классической электродинамикой в ультрарелятивистском приближении. Теория, подтвержденная многочисленными экспериментальными наблюдениями, показывает, что спектр ТИ ультрарелятивистских электронов в области мягких фотонов ($\varepsilon \ll E$ соответствует области рентгеновских лучей) ведет себя пропорционально $1/\varepsilon$, но практически не зависит от энергии фотонов в жесткой области (ε приблизительно выше 200 МэВ — см., например, рис. 2.23). Но спектрально-угловая плотность электромагнитной энергии, излучаемой электронами в слое вещества, в обоих случаях не зависит от энергии фотонов и сосредоточена в конусе с углом $\theta_\gamma \sim \gamma^{-1}$ относительно направления импульса первичного электрона.

являются гигантскими инженерными сооружениями ¹⁾. Например, периметр крупнейшего на сегодняшний день в Европе накопительного кольца 3-го поколения ESRF в Гренобле составляет 844 м, а накопительные кольца APS и SPring8 еще больше. Источники СИ всегда являются установками коллективного пользования, на которых различные организации могут временно или постоянно абонировать отдельный канал синхротронного излучения для своих работ или заказывать выполнение исследований персоналу источника.

2.9. Новые источники СИ — источники СИ 4-го поколения

Приобретаемый опыт исследований с использованием широчайших возможностей, предоставляемых источниками СИ, подталкивает к росту требований, предъявляемых к этим источникам. В частности, стремление исследовать с помощью рентгеновских лучей все более мелкие объемы вещества (размерами порядка нескольких нанометров), требует сверхярких микропучков, а для изучения структурных превращений в реальном времени протекания химических реакций желательнее иметь длительность импульсов порядка 100 фемтосекунд. Более чем тридцатилетние усилия ученых и инженеров по разработке и строительству все более совершенных накопительных колец привели к тому, что их характеристики в источниках СИ 3-го поколения достигли своих физических пределов, как по размерам и яркости источника излучения, так и по его временной структуре. Например, диаметр электронного пучка в накопительном кольце ESRF при энергии 7 ГэВ и токе 200 мА достигает 50 мкм и далее уменьшаться не может из-за физических принципов, а следовательно не может дальше повышаться и яркость СИ.

Пределы характеристик источников излучения на базе накопительных колец естественным образом заключены в самом принципе их действия, как источников фотонного излучения. Их нельзя преодолеть никакими дальнейшими техническими усовершенствованиями. Эти ограничения параметров связаны с условием накопления ускоренных частиц (тока), при котором частицы в кольце должны накапливаться на стабильных равновесных орбитах, а свойства их сгустков должны быть согласованы с возмущениями энергии и импульса, возникающими при испускании СИ, свойствами РЧ ускоряющей системы, эффектами межчастичных рассеяний в пучке (эффект Тушека) и погрешностями в системе поворачивающих и фокусирующих магнитов. Все эти возмущения приводят к связи между горизонтальными и вертикальными размерами пучка частиц на орбите. Данные возмущения являются свойствами каждого конкретного накопительного кольца и определяются структурой его магнитных и электронно-оптических элементов. В свою очередь, структура накопительного кольца строится в результате компромисса между исходным эмиттансом загружаемых пакетов частиц и структурой их уравновешенных сгустков, которая обычно достигается за многие тысячи оборотов по кольцу и характеризуется длиной в несколько миллисекунд. Хотя равновесное сжатие частиц в пакеты обеспечивает накопительное кольцо отличной стабильностью, оно приводит к тому, что параметры накопленных уравновешенных сгустков никак не связаны с параметрами исходно инжектированных пакетов частиц, которые, в принципе, могут иметь длину и на несколько порядков меньше. Поэтому, если в накопительное кольцо инжектировать прекрасно сформированные пакеты частиц с эмиттансом и длиной меньше тех, которые характерны для данной структуры кольца, то в процессе движения по

¹⁾ Характеристики некоторых источников синхротронного излучения приведены в конце данной книги в табл. 6.9.

кольцу они все равно будут уравновешены и доведены до значений типичных для данного кольца. То есть можно сказать, что сама структура накопительного кольца и требование равновесности пучка на его орбите будут неизбежно ухудшать исходные характеристики хорошо сформированных пакетов, получаемых из инжектора.

Таким образом технология накопительных колец для производства фотонов на сегодня уже практически исчерпала возможности совершенствования таких характеристик, как длительность импульса излучения, яркость и временная структура пучков СИ, и возникла потребность в поиске альтернативных технологий генерирования рентгеновских лучей, способных обойти естественные ограничения накопительных колец. В последнее время в качестве такой альтернативы рассматриваются рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и источники СИ на базе линейных ускорителей с возвратом мощности (ЛУР), которые мы кратко рассмотрим далее.

2.9.1. Рентгеновские лазеры на свободных электронах. В качестве альтернативы накопительным кольцам в последнее десятилетие физики преподнесли сюрприз, разработав источники излучения с яркостью в миллиард раз выше яркости излучения, которое получается из источников СИ 3-го поколения в рентгеновском диапазоне (см. рис. 2.25), — рентгеновские лазеры на свободных электронах. Пока эти источники прошли только стадию опытных испытаний, но два из них находятся в стадии строительства — это европейский проект XFEL¹⁾ и американский проект LCLS²⁾. Кроме огромной яркости (см. графики на рис. 2.25) по сравнению с излучением источников 3-го поколения, их электромагнитное излучение отличается высокой монохроматичностью, настраиваемостью по длине волны и когерентностью подобно излучению оптических лазеров, а также чрезвычайно малой длительностью импульсов (вплоть до 10^{-14} – 10^{-15} с).

Идея лазеров на свободных электронах стала интенсивно разрабатываться во всем мире с 1970-х годов, и сейчас трудно найти научный центр, занимающийся ускорителями заряженных частиц, который не работал бы над этой проблемой. Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ, называемые в англоязычной литературе FEL)³⁾ — это источники когерентного излучения нового типа, основанные на использовании электронных пучков ускорителей в особой комбинации с длинными периодическими магнитными структурами — ондуляторами.

В принципе, в ондуляторах могут генерироваться три типа излучения: некогерентное спонтанное, когерентное спонтанное и индуцированное (подробнее см., например, Алферов и др., 1989). Обычные ондуляторы, а также их разновидность — вигглеры, встраиваемые в накопительное кольцо синхротрона для создания дополнительных точек фотонного излучения, генерируют *некогерентное спонтанное излучение*. В них электроны пучка, сгруппированные в довольно большие сгустки, излучают независимо друг от друга. Суммарная мощность испускаемого при этом излучения состоит из арифметической суммы мощностей излучения каждого электрона и обычно составляет около 3–4 кВт за один импульс (за один проход электронного сгустка через ондулятор). Случай именно такого ондуляторного излучения рассматривался выше при описании вставных устройств, и именно такое излучение преимущественно

¹⁾ Рентгеновский лазер на свободных электронах TTF XFEL в лаборатории DESY, Гамбург, Германия, планируется ввести в эксплуатацию в рентгеновском диапазоне длин волн около 1 Å в 2012 году.

²⁾ Лазер на свободных электронах в исследовательском центре Stanford Linear Accelerator Center, Стэнфорд, США, диапазон длин волн излучения 1,5–15 Å, ввод в эксплуатацию запланирован на 2009 год.

³⁾ Сокращение от Free Electron Laser.

До настоящего времени нет понимания, как можно использовать столь мощное излучение, и как работать с когерентным излучением в рамках обычных методик, например, рентгеноструктурного анализа. Очевидно, чтобы проводить традиционные рентгеновские исследования веществ на излучении из ЛСЭ придется переделывать все методики, применяемые сегодня на накопительных кольцах и разрабатывать принципиально новые. Поскольку после каждого импульса излучения образец будет разрушаться, скорее всего, придется проводить измерения на серии образцов, поэтому методики исследования придется ориентировать на усреднение и сшивку данных. Поэтому нет никаких оснований считать, что ЛСЭ заменят источники СИ типа накопительных колец, хотя с их появлением для исследователей откроются совершенно новые научные области. Пройдет еще немало лет после создания рентгеновских ЛСЭ, прежде чем будут разработаны соответствующие методики и технические средства для их воплощения и рентгеновские ЛСЭ можно будет использовать на практике. Поэтому разработка и строительство ЛСЭ, продиктованная требованиями передовых областей науки и техники, не снимает необходимости параллельно улучшать технологию генерирования СИ со свойствами похожими на излучение накопительных колец, но с улучшенными параметрами. При поисках таких альтернативных решений в последнее десятилетие внимание разработчиков снова привлекли линейные ускорители, как потенциальные источники СИ.

2.9.2. Источники СИ на базе линейных ускорителей (ЛУР). В последние годы было заявлено о разработке новых источников рентгеновских лучей со свойствами похожими на свойства традиционного СИ, но с более высокой яркостью и гибкой временной структурой, которые должны строиться на базе линейных ускорителей (Gruner, Bilderback et al., 2002; Gruner, 2004; Murphy, 2003). Эти источники должны представлять собой нечто промежуточное между источниками СИ 3-го поколения и ЛСЭ. Большую подборку информации о таких разработках можно найти, например, в материалах Конференции по ускорителям частиц, проходившей в 2003 году в Портленде (PAC2003).

В самом начале данной главы мы уже говорили, что линейные ускорители тоже могут быть источниками электромагнитного излучения аналогичного СИ, если в них установить ондулятор или вигглер. Ускорение частиц в ЛИНАКе происходит за один проход, поэтому нет нужды заботиться о равновесности орбиты, и электронный пучок в нем можно сжимать без этого ограничения вплоть до размера, соответствующего дифракционному пределу¹⁾. ЛИНАК, в отличие от накопительного кольца, не ухудшает структуру электронных пакетов при ускорении. В хорошо сконструированном линейном ускорителе эмиттанс пучка и длина ускоренного электронного сгустка зависит не от ускорителя, а полностью определяется эмиттансом и длиной сгустка, выдаваемыми *источником частиц* (инжектором). Современные источники электронов (электронные пушки) обладают собственным эмиттансом меньше того, который достигается при наилучших системах управления пучками в накопительных кольцах, поэтому яркость пучка рентгеновских лучей из ЛИНАК может быть намного выше, чем из накопительного кольца. Именно поэтому разрабатываемые сегодня ЛСЭ, для работы которых требуется очень малый эмиттанс, в качестве ускорителей частиц используют ЛИНАКи.

¹⁾ Дифракционный предел — это фундаментальное ограничение в оптике, означающее, что невозможно сфокусировать свет в пятно с диаметром менее половины длины волны, оказывается действительным и для электронов. Это значит, что нельзя сделать пучок электронов бесконечно тонким и его минимальный размер не может быть меньше половины длины волны, соответствующей данной энергии электронов.

Но если ЛИНАК не ухудшает эмиттанс электронных сгустков, то почему бы не попробовать использовать его для создания источника рентгеновских лучей высокой яркости путем получения пучка высокоэнергетических электронов с малым эмиттансом и пропускания его через ондулятор, где будет генерироваться яркое рентгеновское излучение? Этой идее уже много лет, но ее практическая реализация наталкивалась на серьезные технические трудности. Сложность создания такой установки заключается в необходимости огромной энергии для получения достаточного большого тока ускоренных электронов, которые необходимы для генерирования интенсивных потоков рентгеновских лучей. Например, пучок с током 100 мА при энергии 7 ГэВ (обычный режим работы накопительных колец APS, SPring8 или ESRF) несет 700 МВт мощности, что сравнимо с мощностью крупной электростанции, и значительная часть этой мощности после генерирования импульса СИ должна быть бесполезно рассеяна в поглотителе пучка частиц. В накопительном кольце проблема экономии электрической мощности решается путем многократного использования одних и тех же электронов, движущихся по кругу. Эти электроны проходят через точки излучения и ускорения миллионы раз в секунду, а внешний источник питания лишь восполняет сравнительно малые потери на излучение, то есть кинетическая энергия электронов в накопительном кольце не выбрасывается бесполезным образом. Поэтому производство рентгеновского излучения с помощью постоянно действующего обычного линейного ускорителя будет невероятно дорогим. К счастью, есть способы избежать полной потери энергии при генерировании рентгеновского излучения с помощью ЛИНАК. Таким способом является использование линейных ускорителей-рекуператоров, в которых неизрасходованная мощность электронного пучка может возвращаться обратно в ускоритель и употребляться повторно для ускорения следующей порции электронов.

В большинстве случаев большие ЛИНАКи работают на принципе ускорения заряженных частиц с помощью бегущей электромагнитной волны, которая создает однонаправленную силу, действующую на заряженную частицу. Эта сила может, как ускорять частицы, так и замедлять их, в зависимости от положения электрона относительно фазы электромагнитной волны (см. вставку на рис. 2.36 и пояснения к принципу автофазировки в § 2.2, рис. 2.5). В ускорителях такая электромагнитная волна создается радиочастотными ускорительными станциями, действующими по принципу клистрона. Если частица ускоряется, то она забирает энергию из электромагнитной волны, и, наоборот, если частица тормозится, то она отдает свою энергию электромагнитной волне. Эта добавленная энергия электромагнитной волны может снова использоваться для ускорения следующей порции электронов. Такой принцип регенерации не нов и предлагался почти полвека назад М. Тигнером (Tigner, 1965). Однако практически его работоспособность показана сравнительно недавно. Так в 1998 году в СЕВАФ¹⁾ был пущен в эксплуатацию маленький ЛСЭ на 38 МэВ для ИК области, в котором использовался этот принцип возврата и регенерации мощности электронного пучка [Neil, et al., 1998]. Этот проект продемонстрировал, что в ЛИНАК может возвращаться около 99% мощности. Очень совершенные схемы источников СИ на линейных ускорителях с регенерацией мощности предложены также в Новосибирске (Skrinsky and Vinokurov, 1978; Skrinsky and Vinokurov,

¹⁾ СЕВАФ — Continuous Electron Beam Accelerator Facility (Непрерывный ускоритель электронного пучка), работающий по принципу ЛУР, и служащий драйвером инфракрасного ЛСЭ типа ЛСЭ-осциллятора, действующего в лаборатории Томаса Джеферсона (штат Вирджиния, США). В настоящее время этот ускоритель проходит стадию модернизации, после которой его энергия будет доведена до 12 ГэВ, а длина волны ЛСЭ будет доведена до вакуумного ультрафиолета ($\lambda \sim 250$ нм).

- очень малый размер электронного пучка от 3 до 40 мкм соответственно для σ_x или σ_y ;
- форма электронного пучка может быть либо плоской, либо круглой;
- благодаря малому эмиттансу и диаметру электронного пучка, ЛУР позволит применять для генерирования СИ ондуляторы, имеющие малый период и малый зазор, и таким образом уменьшить размеры ондуляторов без ухудшения их технических характеристик, как источников СИ;
- использование длинных ондуляторов с малым зазором позволит генерировать пучки рентгеновских лучей с очень малой расходимостью: от 3 до 10 микро радиан;
- по желанию пользователя станут доступны «горячие» монохроматические пучки (с очень высокой плотностью фотонов);
- возможно получение полностью поперечно когерентных пучков рентгеновских лучей, если сделать эмиттанс меньше $\lambda/4\pi$, что например, для рентгеновских лучей с энергией 8 кэВ ($\lambda = 1,5 \text{ \AA}$) составляет 0,01 нм·рад;
- возможная (регулируемая) длина банча будет от 100 фс до 10 пс;
- частота повторения банчей может варьироваться от 1 МГц до 1,3 ГГц.

В источниках СИ на базе ЛУР, в противоположность накопительным кольцам, основные характеристики электронных сгустков определяются в первую очередь инжектором, а не кольцом. Это сильно облегчает задачу модернизации источника, что очень важно для начала строительства рентгеновских ЛУР сегодня, когда еще не все технические проблемы решены. Даже пока не совершенный построенный источник такого типа не придется разрушать, чтобы улучшить его параметры, когда технический прогресс позволит это сделать. Для модернизации источника СИ на основе ЛУР надо будет только улучшать инжектор, не трогая всего остального. Если же возникает необходимость радикального улучшения параметров источника на основе накопительного кольца, то это означает переделку практически всей его электромагнитной структуры и вакуумной системы, т. е., фактически, надо строить новое накопительное кольцо. Поскольку банчи в ЛУР не хранятся, как в накопительных кольцах, а формируются заново после каждого импульса инжектора, то здесь нет деградации свойств источника из-за заполнения фазового объема. Более того, можно будет программировать сложные цуги электронных пакетов, необходимые для проведения специфических экспериментов с рентгеновскими лучами, если, например, управлять инжектором с помощью лазерного освещения фотокатода, являющегося источником электронов. Еще одним большим достоинством этого источника является возможность управления поперечным сечением банчей. В накопительных кольцах банчи стремятся стать плоскими и иметь вертикальный эмиттанс на несколько порядков величины меньше горизонтального. Напротив, пучки электронов в ЛУР являются круглыми по природе, и их эмиттанс в горизонтальном и вертикальном направлениях одинаков, что очень выгодно для некоторых элементов рентгеновской оптики.

2.9.3. Комптоновские источники импульсного рентгеновского излучения.

Накопительные кольца, рентгеновские лазеры на свободных электронах и источники СИ рентгеновского диапазона на базе ЛУР это огромные установки коллективного пользования. Они обладают уникальными свойствами, существенно расширяющими возможности изучения строения и свойств материи с помощью рентгеновских лучей, но доступ исследователей к ним все-таки сильно ограничен и даже крупный научно-исследовательский институт или университет чаще всего не в состоянии иметь свой источник излучения подобного типа и даже арендовать пучок на каком-либо существующем накопительном кольце. Кроме того существует реальная проблема удаленности исследовательских центров от действующих генераторов СИ.

Идея создания компактных источников рентгеновского излучения с размерами в сотни раз меньше накопительных колец или ЛУР, но с параметрами излучения близкими к синхротронному, которые можно было бы использовать в отдельных научных организациях возникла в начале 1990-х годов (см. например, Blum, 1993). Наиболее успешной в этом направлении оказалась модель источника, основанного на рассеянии лазерного инфракрасного или красного излучения на пучке ультрарелятивистских электронов. Суть ее состоит в том, что при лобовом столкновении фотонов с ультрарелятивистскими электронами, если энергия фотона меньше энергии электрона, может возникать обратный комптон-эффект (ОКЭ), состоящий в передаче энергии электрона фотону и уменьшению его длины волны (см. § 1.5.1.5)¹⁾ до рентгеновского диапазона, используемого в рентгеноструктурных и рентгеноспектральных исследованиях, а также в медицинской рентгеновской диагностике.

Возможность получения пучков жесткого поляризованного гамма-излучения в с помощью обратного комптоновского рассеяния (ОКР) лазерных фотонов видимого света на ультрарелятивистских электронах была теоретически обоснована гораздо раньше, еще в 1963 году в работе Ф. Арутюняном и В. Туманяном (Арутюнян и Туманян, 1963) и независимо в работе Р. Милберном (Milburn, 1963). Вскоре теоретически предсказанный эффект был зарегистрирован экспериментально и с середины 1960-х годов стал применяться для диагностики электронных пучков в ускорителях, но до создания специальных генераторов рентгеновского и гамма-излучения на основе ОКР потребовалось еще два десятилетия технического прогресса. Сечение реакции обратного комптоновского рассеяния очень мало, и для получения существенного выхода гамма-квантов необходима высокая плотность фотонов и электронов во взаимодействующих пучках. Поэтому речь о создании специальных источников гамма-излучения на основе ОКР, назовем их лазерно-электронными источниками рентгеновского излучения или сокращенно ЛЭРИ (которые могли бы выдавать десятки и сотни тысяч фотонов за один импульс взаимодействия) зашла лишь после создания накопительных колец и достаточно мощных лазеров, а также новых принципов усиления лазерного излучения. Создание источников подобного типа стало возможным благодаря изобретению в 1980-х годах нового метода усиления лазерного излучения: технология chirpированного импульса (chirped-pulse amplification (CPA) — см. Mourou et al., 1998; или Mourou and Umstadter, 2002)²⁾, который позволил делать малогабаритные тераваттные оптические лазеры, а также благодаря появлению электронных инжекторов с лазерно управляемыми фотокато-

¹⁾ Обратный комптон-эффект, также называемый обратным комптоновским рассеянием, происходит при столкновении низкоэнергетических фотонов с горячими (ультрарелятивистскими) электронами. В этом столкновении фотоны сильно увеличивают свою энергию, получая ее от электронов. Этим эффектом объясняют, например, в астрофизике некоторые изменения в спектре реликтового излучения. С 1963 года метод обратного комптоновского рассеяния используется для получения поляризованных монохроматических γ -пучков высоких энергий (с энергией до сотен ГэВ и даже нескольких БэВ) путем рассеяния лазерных фотонов на электронах (позитронах), циркулирующих в накопителях (см., например, обзор Недорезов и др., 2004; или Богомягков и др., 1999).

²⁾ Прогресс в развитии лазерной техники, связанный с открытием в 1985 г. новой технологии усиления лазерных импульсов — Chirped Pulse Amplification (CPA), разработанной группой исследователей под руководством Жерара Муру (G. A. Mourou), сделал возможным получение субпикосекундных и фемтосекундных лазерных импульсов тераваттной мощности с интенсивностью $I = 10^{18} - 10^{21}$ Вт·см⁻² без увеличения габаритов лазера, минуя проблему пробоя лазерной среды. С помощью этой технологии стало возможно изготавливать «настольные» тераваттные лазеры.

фокусируется до диаметра 75 мкм (обычный диаметр около 200 мкм), проходят через ячейку комптоновского взаимодействия и направляются в прямолинейную секцию ускорителя для последующего генерирования ИК излучения в оптическом резонаторе. Отбираемое из резонатора ИК излучение транспортируется по специальному каналу к комптоновской ячейке, фокусируется в точку взаимодействия до радиуса 75 мкм и взаимодействует с электронными банчами.

На томсоновское рассеяние расходуется около 10% мощности лазерного пучка, а остальные 90% могут направляться в пользовательскую измерительную установку для проведения измерений на ИК излучении. Таким образом данный лазер может стать генератором, поставляющим одновременно ИК и рентгеновское излучение для параллельного проведения взаимодополняющих структурных исследований. Оценки проведенные авторами предложения показывают, что данная схема может обеспечить получение фемтосекундного квазимонохроматического импульсного излучения с энергией максимума 12,15 кэВ и с яркостью около 10^{11} фотон/с/мм²/мрад²/0,1%λ при частоте следования импульсов 75 МГц (выход около 5000 фотон/импульс).

Выводы. Из физики обратного комптон-эффекта, используемого для генерирования рентгеновских лучей, следует, что когерентность излучения томсоновского рассеяния от лазерно-электронного источника будет гораздо меньше, чем от разрабатывающихся крупных источников четвертого поколения (SASE FEL и источники на базе ЛУР), о которых говорилось в предыдущих параграфах. Но все остальные параметры излучения комптоновских источников, такие как высокая яркость и простота настройки длины волны, крайне интересны. Так как длительность импульсов излучения в лазерно-электронных источниках регулируется длиной электронных банчей, то она может быть доведена до сотен фемтосекунд при использовании линейных ускорителей со специальными электронными пушками с лазерно возбуждаемым фотокатодом, что очень привлекательно для проведения рентгеновских исследований с разрешением по времени.

Из приведенного очень краткого обзора рентгеновских источников на базе ОКР можно сделать два вывода.

1. Фемтосекундные источники квази-монохроматических рентгеновских лучей с настраиваемым спектром весьма интересны для исследования строения веществ в динамике. Они имеют существенное преимущество по сравнению с источниками СИ: способны генерировать на порядки величины более короткие импульсы яркого рентгеновского излучения, с помощью которых уже можно снимать «кино», выявляющее колебательные движения атомов и молекул.

2. Благодаря сравнительно низкой стоимости комптоновские лазерно-электронные источники могут стать серьезными конкурентами большим источникам СИ на базе накопительных колец и ЛУР. Комптоновские источники могут получить широкое распространение и стать локальными источниками коллективного пользования, которые могут быть по карману отдельным университетам или небольшим научным организациям. Справедливость этого предположения можно будет проверить уже скоро после завершения первых пробных проектов, которые сейчас находятся в стадии реализации.

2.9.4. Другие примеры компактных источников синхротронного излучения.

Примером малобюджетного сверхкомпактного источника синхротронного излучения, включающего рентгеновские лучи с энергией до 10 кэВ, которые могут использоваться в рентгеновской кристаллографии, является источник «Аврора» (AURORE), действующий в настоящее время в центре синхротронного излучения университета

ежегодно выполняют свои работы более пяти тысяч входящих исследователей и специалистов, кроме того, что примерно такой же объем различных исследований проводится персоналом самих установок.

Если преобладание в общем объеме исследований той или иной отрасли науки и промышленности зависит от приоритетов страны или ассоциации ¹⁾, которой принадлежит источник излучения, то среди методов исследования во всех случаях лидерами являются рентгеновская дифрактометрия и исследование тонкой структуры спектров поглощения для изучения локальной атомной структуры материалов. Небольшая часть времени работы практически всех источников выделяется для совершенствования самих машин, установленных на них экспериментальных станций, а также для разработки методик.

Развитие парка источников СИ идет по пути строительства многопользовательских источников с большим числом пучков, на которые пользователи могут устанавливать свои экспериментальные станции. Для этого проводится также модернизация существующих источников СИ 2-го поколения, имеющих хорошие параметры. Число портов для вывода СИ больше 20 является сегодня обычным, а крупные источники, такие, как ESRF, APS или SPring-8 имеют многие десятки пучков (например, более 60 на SPring-8, более 40 на ESRF и APS).

Качество и привлекательность источника также определяется наличием достаточно большого числа разнообразных магнитных вставных устройств (ВУ), позволяющих получать СИ с особыми свойствами, нужными потребителю. Несмотря на постоянно растущий парк источников СИ, они пока могут принять чуть более половины пользователей, нуждающихся в проведении измерений на синхротронном излучении. Например, на источнике SPring-8 в 2003 году более 5 тысяч пользователей провели более 800 экспериментов, при этом почти 40% заявок на проведение исследований пришлось отклонить из-за нехватки экспериментальных возможностей (см. SPring-8 frontiers 2003). Примерно такая же ситуация и на других крупных источниках СИ коллективного пользования, таких как CHESS, APS или ESRF.

Как правило, деятельность большинства источников СИ организована таким образом, что часть их каналов арендуется на долгосрочной контрактной основе какими-либо организациями, которые устанавливают на них свои экспериментальные станции и работают на них без ограничения времени. Меньшая часть пучков оборудуется экспериментальными станциями, принадлежащими источникам СИ, которые используются в качестве публично доступных измерительных комплексов, на которых могут проводить исследования специалисты из самых разных организаций, но заявки на исследование отбираются и одобряются специальной комиссией, которая оценивает целесообразность и приоритетность проведения заявленных исследований на данном источнике СИ. Большинство источников СИ (накопительных колец) являются национальными исследовательскими центрами, за исключением источника ESRF, являющимся международной установкой, финансируемой большим числом государств, которое постоянно растет ²⁾, немецкого накопительного кольца ANKA (Göttlicher J. 2003), которое частично финансируется правительством земли Баден-Вюртемберг, но на коммерческой основе доступно любым пользователям, а также

¹⁾ Начиная с 2002 года приоритетными направлениями практически во всех странах стали исследования наночастиц и наноструктур, а также продолжается широкое исследование структуры и свойств биологических макромолекул.

²⁾ Например к Ассоциации ESRF, включающей 14 государств членов консорциума, в 2004 году присоединилась Польша, что позволяет ей иметь своих постоянных специалистов, работающих на данном источнике СИ.

нескольких источников СИ в США, принадлежащих университетам, которые не всегда финансируются государством.

Несмотря на высокую стоимость, строительство источников СИ продолжается во всем мире. Буквально в последние годы введен в эксплуатацию новейший специализированный источник СИ в Канаде — накопительное кольцо CLS. Новые источники СИ 3-го поколения начинают строиться или уже строятся во Франции — накопительное кольцо «Солей» (SOLEIL); Великобритании — накопительное кольцо «Дайэмонд» (DIAMOND); Австралии — накопительное кольцо «Бумеранг» (Australian Synchrotron). Список ряда наиболее известных из действующих и строящихся источников СИ приведен в конце данной книги в таблице 6.9, где указаны как источники 2-го, так и 3-го поколений, используемые для работы с рентгеновским излучением, в том числе для рентгеноструктурного анализа и XAFS спектроскопии. Большинство из представленных в списке синхротронов разрабатывались и строились специально, как источники СИ для научного и промышленного использования, хотя некоторые синхротроны из этого списка построены как установки для физических исследований и лишь часть времени могут работать для генерации СИ. На самом деле число неспециализированных синхротронов, приспособляемых для генерирования используемого СИ, значительно больше, но они не оказывают существенного влияния на объем мирового рынка исследований с помощью СИ и имеют локальное значение даже для государств, где подобные установки есть. Более полный перечень существующих в мире источников СИ, где указаны, как специализированные источники СИ, так и частично приспособленные синхротроны для его генерирования, можно найти, например, в статье (Navrotsky (2.27), 2004), или на ежедневно обновляемом информационном Интернет-сайте (lightsources.org).

В России на сегодняшний день есть накопительное кольцо ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера, которое является частью электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4. На нем работают 13 экспериментальных станций, включая рентгеновскую дифракцию и спектроскопию поглощения. Но на генерацию СИ этот источник работает не более 30 % времени, т. е. не является специализированным источником СИ, и обслуживает главным образом научно-исследовательские институты Новосибирска.

Специализированный источник КИСИ для Курчатовского института также разработан и изготовлен в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера, который на сегодняшний день является признанным в мире разработчиком ускорителей и самых совершенных вставных магнитных устройств для источников СИ. Источник состоит из инжектора ускоренных электронов (ЛИНАК с энергией 80 МэВ), предускорительного накопительного кольца «Сибирь-1» на максимальную энергию 450 МэВ и большого накопительного кольца «Сибирь-2» на 2,5 ГэВ. Проект начал разрабатываться и реализовываться в начале 1980-х годов, т. е. в те же годы, когда строились похожие источники СИ 2-го поколения SRS (Великобритания) и NSLS (США), являющихся на сегодняшний день старейшими из действующих специализированных источников СИ в мире, и параметры накопительного кольца «Сибирь-2» аналогичны исходным параметрам этих синхротронов. Но эти источники после ввода в эксплуатацию прошли уже целый ряд модернизаций, и по характеристикам приблизились к источникам 3-го поколения.

Более современным проектом, реализуемым в России, может стать источник СИ 3-го поколения ДЭЛСИ в ОИЯИ (г. Дубна), разработка которого уже завершена и начата первая фаза строительства, включающая монтаж линейного ускорителя-инжектора и бустерного накопительного кольца для основного накопителя. Схема этого источника построена аналогично современным источникам СИ, в которых энергия электронов в бустерном кольце и основном источнике СИ почти одинакова, что позволяет постоянно подпитывать основной накопитель без остановки работ на

экспериментальных станциях. Схема включает инжектор ЛИНАК, предускорительное накопительное кольцо AmPS с периметром 211,76 м и энергией 0,9 ГэВ, основное накопительное кольцо DELSY с периметром 136,04 м и энергией 1,2 ГэВ. Несмотря на небольшую энергию электронов (1,2 ГэВ), этот источник сможет покрывать диапазон длин волн фотонного излучения вплоть до жесткого рентгена благодаря большому числу прямолинейных секций, в которые будут встроены ондуляторы с малым зазором и вигглеры и с высокой напряженностью магнитного поля. На заключительной 3-й стадии проекта предполагается на базе этого накопительного кольца создать лазер на свободных электронах по режиму SASE, который сможет выдавать фотононое когерентное излучение с длиной волны менее 1 Å. Однако по состоянию на 2006 г. время завершения строительства этого источника не известно.

Поскольку технология строительства источников СИ на базе накопительных колец доведена до совершенства, то этот же опыт копируется при разработке более новых источников, большинство из которых пока строится на накопительных кольцах с большим числом вставных магнитных устройства для генерации излучения (см. табл. 6.9). Однако, в последнее время наиболее злободневной потребностью для науки стало излучение со сверх-короткими импульсами длительностью менее 1 пс, чего накопительные кольца сделать не могут в принципе. Отчасти это способствовало интенсификации работ над рентгеновскими лазерами на свободных электронах, и именно это требование явилось толчком для разработки источников рентгеновского короткоимпульсного СИ на базе ЛУР. Три проекта по строительству машин подобного типа уже реализуются (два в США и один в Германии).

При разработках рентгеновских источников на базе ЛУР выяснилась одна очень интересная и важная деталь. По многим оценкам (см., например, Murphy, 2003 или Gruneg, 2004), оказалось, что строительство источника настраиваемого рентгеновского СИ (с регулируемой яркостью и частотой следования импульсов) на базе линейного ускорителя с возвратом мощности по одной петле в несколько раз дешевле строительства источника СИ на основе накопительного кольца при одинаковых потребительских характеристиках и даже с существенным превосходством ЛУР по яркости и длительности импульса, а модернизация такого источника должна стоить в десятки раз дешевле. Не исключено, что уже в ближайшем будущем после испытаний Корнельского ЛУР источники СИ для исследований веществ и материалов будут строиться преимущественно по этой технологии. Подобные источники могут обеспечить практически такое же количество портов СИ, если в дополнение к основному источнику из большого ондулятора использовать источники из поворотных магнитов возвратной петли и ВУ, встроенных в эту петлю (см. рис. 2.25).

Помимо того, источники на базе ЛУР имеют большие преимущества по сравнению с накопительными кольцами. Размер электронного пучка в них может уменьшаться до дифракционного предела и иметь толщину меньше микрона, что увеличивает яркость микропучков рентгеновских лучей на порядки по сравнению с тем, что можно получить от накопительных колец. Они позволяют оперативно управлять спектром и интенсивностью излучения путем изменения энергии ЛИНАКа и тока инжектора. При желании на этих источниках можно получать полностью поперечно когерентное излучение, как на рентгеновских лазерах. ЛУР сильно упрощают измерения с разрешением по времени, позволяя проводить измерения с любым разрешением вплоть до фемтосекунд путем создания программируемой последовательности электронных пакетов с заранее определенной частотой, длиной и пиковой плотностью электронов в каждом пакете. Это является важнейшим достоинством источника СИ в связи с сегодняшним резким ростом интереса к изучению быстро протекающих процессов и динамики разупорядочения в твердых телах.

Дополнительным средством удовлетворения потребности в ярком короткоимпульсном рентгеновском излучении может стать строительство компактных лазерно-электронных источников излучения на основе обратного эффекта Комптона или тормозного излучения. Реализация первого промышленного проекта комптоновского источника начата на Украине (проект НЕСТОР см. § 2.9.3.3 и табл. 6.9), а синхротронные источники ТИ уже есть в продаже.

Довольно давно стало понятно, что источники СИ коллективного пользования являются не только средством наиболее эффективного решения тех или иных технических и научных проблем, но становятся центрами концентрации самых передовых научных и технологических идей и интеллектуального потенциала со всего мира. Поэтому наличие таких центров в той или иной стране является признаком высокого технологического уровня ее экономики и стремления повышать этот потенциал, а также интенсифицирует научный и технологический обмен. Как видно из табл. 6.9, источники СИ сегодня существуют и строятся не только в наиболее технически и экономически развитых странах, таких как США, Германия, Великобритания, Франция или Япония, но и в странах, которые лишь становятся на путь высокотехнологического развития. Ярким примером может быть строительство источников СИ в Австралии, Иордании, Испании и Индии, а также стремление Армении включиться в число международных центров, обладающих современными источниками СИ.