

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СИНХРОТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ». ЧАСТЬ 1. EXAFS В ДИСПЕРСИОННОЙ МОДЕ

*В. Л. Аксенов^{a,б}, С. И. Тютюнников^б, В. Н. Шалыпин^{б,1},
А. Д. Беляев^б, А. Н. Артемьев^б, Н. А. Артемьев^з, Б. Ф. Кириллов^б,
М. В. Ковальчук^{б,д}, А. А. Демкив^б, Г. А. Князев^б*

^a Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б НИЦ «Курчатовский институт», Москва

^з Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Lab, Berkeley, USA

^д Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Описывается усовершенствованная рентгеновская оптика, система регистрации и методика измерений многофункционального синхротронного спектрометра в EXAFS дисперсионной моде. Приводятся результаты измерения энергетического разрешения спектрометра. Проанализированы достоинства и недостатки традиционных и дисперсионной схем EXAFS-спектрометров. Приведены примеры EXAFS-спектров, измеренных в дисперсионной моде.

The improved X-ray optical scheme, the system of registration and measurement procedure of multifunctional synchrotron radiation spectrometer in dispersive EXAFS mode are described. The results of the energy permission measurements of spectrometer are given. The advantages and disadvantages in the traditional and dispersion schematics of spectrometers EXAFS are analyzed. Examples of the EXAFS spectra measured in the dispersion mode are given.

PACS: 61.05 cp; 61.46-w

ВВЕДЕНИЕ

С появлением современных высокоинтенсивных синхротронных источников рентгеновского излучения возрастает роль EXAFS-спектроскопии как мощной методики определения атомной структуры, которая может быть применима к любым типам материалов: твердым, аморфным, растворам, газам, полимерам. EXAFS — важный инструмент для исследования материалов, так как знание локальной атомной структуры, разновидности атомов и их локализации неотъемлемо от прогресса во многих областях науки, таких как биология, химия, электроника, геофизика, металлургия, материаловедение.

¹E-mail: shal@sunse.jinr.ru

Впервые метод энергодисперсионной спектроскопии для измерения тонкой структуры спектров поглощения рентгеновского излучения был описан в 1981 г. [1]. В дальнейшем этот метод распространился в области химии, материаловедения, биофизики, геологии. Временное разрешение, в случае измерения EXAFS-спектров в дисперсионной моде, практически ограничивается только временем считывания детектора, что позволяет проводить исследования кинетики процессов. Малые размеры используемого сфокусированного пучка позволяют проводить исследования материалов в камерах высокого давления. Физический пуск EXAFS-спектрометра в дисперсионной моде [2] был произведен в Курчатовском синхротронном центре [3]. Впоследствии спектрометр был существенно дооборудован. Проведены детальные исследования его характеристик в различных модах, именно — EXAFS-исследования.

EXAFS В ДИСПЕРСИОННОЙ МОДЕ

Рентгенооптическая схема энергодисперсионного EXAFS-спектрометра показана на рис. 1.

Белый пучок СИ (1) через щели (2) падает на изгибаемый кристалл-монокроматор (3). Отраженный от монокроматора сходящийся полихроматический пучок СИ (4) падает на зеркало (5). Отраженный от зеркала пучок (6), пройдя через помещенный в точку фокуса образец (7), вновь расходится (8). Вер пучка после образца анализируется позиционно-чувствительным детектором (9).

Стукок электронов в накопителе — источник СИ — имеет размеры: по вертикали — 200 мкм и по горизонтали — 1,4 мм. Кристалл-монокроматор — кристалл Si (111), треугольной формы с основанием 50 мм, длиной 250 мм, толщиной 1 мм.

Монокроматор отъюстирован так, что пучок СИ проходит вдоль его большой медианы, а середина кристалла совпадает по вертикали с осью гониометра и с осью вращения гранитного плеча на воздушной подушке, на котором размещаются зеркало, щели, камера для образцов и детектор. Монокроматор находится в вакуумном (или газонаполненном)

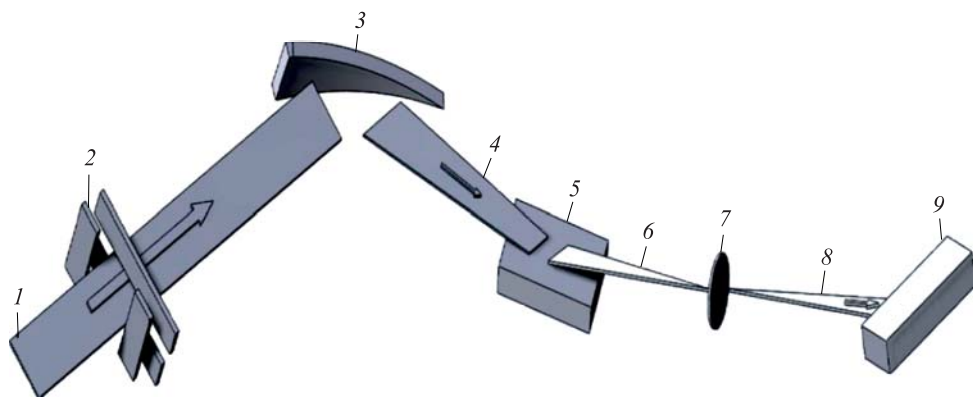


Рис. 1. Схема энергодисперсионного EXAFS-спектрометра. 1 — белый пучок СИ; 2 — щели; 3 — изгибаемый кристалл-монокроматор; 4 — сходящийся полихроматический пучок СИ; 5 — зеркало; 6 — отраженный от зеркала пучок; 7 — образец; 8 — расходящийся пучок; 9 — позиционно-чувствительный детектор

объеме, окно которого обеспечивает выход монохроматизированного пучка в горизонтальной плоскости от 6 до 30° относительно оси прямого пучка. В этих же пределах с небольшими запасами может поворачиваться гранитное плечо.

Энергетический диапазон ΔE спектрометра можно выбрать из условия [4]:

$$\Delta E = E \left(\frac{l}{R} - l \sin \frac{\theta}{p} \right) \operatorname{ctg} \theta, \quad (1)$$

где l — длина освещаемой пучком СИ части (вдоль медианы) кристалла-монокроматора; $p = 22$ м — расстояние от источника СИ до центра монокроматора; θ — угол Брэгга; R — радиус кривизны кристалла, определяемый как

$$R = \frac{2pq}{\sin \theta(p + q)}, \quad (2)$$

где q — фокусное расстояние.

Вдоль изогнутого кристалла происходят небольшие изменения угла падения, и в точку полихроматического фокуса собираются кванты со средней энергией E и шириной ΔE , которая зависит от радиуса изгиба кристалла и длины освещенного пучком участка монокроматора. При работе в EXAFS-моду в качестве детектора использован сцинтиллятор, оптически сочлененный с камерой ProDia модели HS101H с охлаждаемой матрицей CCD 1024×122 пикселей. Размер пикселя детектора — 31 мкм.

Горизонтальный размер пучка в фокусе не превышает 150 мкм, фокусирующие способности изгибаемого кристалла монокроматора детально исследованы в работе [3].

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ПО ЭНЕРГИИ

Прямым способом энергетической калибровки детектора является измерение двух различных по энергии краев поглощения. Разумеется, оба этих края должны регистрироваться детектором в одной и той же геометрии эксперимента. Приведем пример калибровочной процедуры.

1. Расстояние от источника СИ до кристалла-монокроматора Si(111) $p = 22$ м.
2. Расстояние от Si(111) до образца (и до фокуса) $q = 1$ м.
3. Расстояние от образца до экрана камеры ProScan $l = 1,7$ м.
4. Брэгговский угол $\theta = 8,44^\circ$ ($E_0 = 13,46$ кэВ, $\lambda = 0,921$ Å).

Для калибровки взяты линии Bi L_3 ($E = 13,420$ кэВ) и Pb L_3 ($E = 13,035$ кэВ). Образцы, прокатанные металлические фольги, ставились поочередно без нарушения геометрии спектрометра. L_3 — край Bi зафиксирован в 114-м пикселе, а L_3 — край Pb в 597-м пикселе. В первом приближении можно считать, что разрешение спектрометра при данном угле θ составляет 0,797 эВ/пиксель. При полной длине изображения пучка в 837 пикселей имеем диапазон энергии для измерения EXAFS-спектра $\Delta E = 667$ эВ.

Сравним экспериментальные данные с рассчитанными по формулам, предложенным Tolentino H. [4]. Диапазон энергии ΔE_1 найдем из соотношения

$$\Delta E_1 = E_0 \operatorname{ctg} \theta \delta \theta,$$

где $\delta\theta = \frac{L}{R} \left(1 - \frac{R \sin \theta}{p}\right)$; $R = \frac{2qp}{\sin \theta(q+p)}$ — радиус кривизны кристалла Si(111); $L = b_0 / \sin \theta$ — длина освещенного пучком СИ участка Si(111); b_0 — ширина белого пучка СИ, $b_0 = 15,2$ мм.

Результаты вычислений: $L = 104$ мм, $R = 13,0$ м, $\delta\theta = 0,00728$ и $\Delta E_1 = 660$ эВ. Можно видеть хорошее согласие в величинах ΔE и ΔE_1 .

Полный энергетический интервал EXAFS-спектра ^{83}Bi составил $\Delta E = 667$ эВ. Расчет по формулам (1) и (2) привел к результату $\Delta E_1 = 660$ эВ. Отметим, что при переходе к другому элементу калибровку необходимо проводить заново.

РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА

Идеальная схема энергодисперсионного метода предполагает наличие «точечного» источника излучения и «идеальную» эллиптическую форму фокусирующего изогнутого кристалла-монокроматора. В таких «идеальных» условиях фокус также «точечный» и полихроматический веер расходящегося после фокуса излучения имеет строго однозначное соответствие между углом луча и его энергией. Эта «идеальная» картина нарушается из-за конечных размеров источника излучения (т. е. конкретной характеристики источника СИ) и несовершенства изгиба кристалла. Под одним и тем же углом веера могут распространяться кванты несколько различных энергий и ухудшать разрешение всего спектрометра. Оценка влияния на разрешение размера источника может быть сделана, однако влияние на разрешение несовершенства изгиба кристалла простой оценке не поддается.

Мы измерили разрешение монокроматора, а точнее всего спектрометра, в схеме, приведенной на рис. 2.

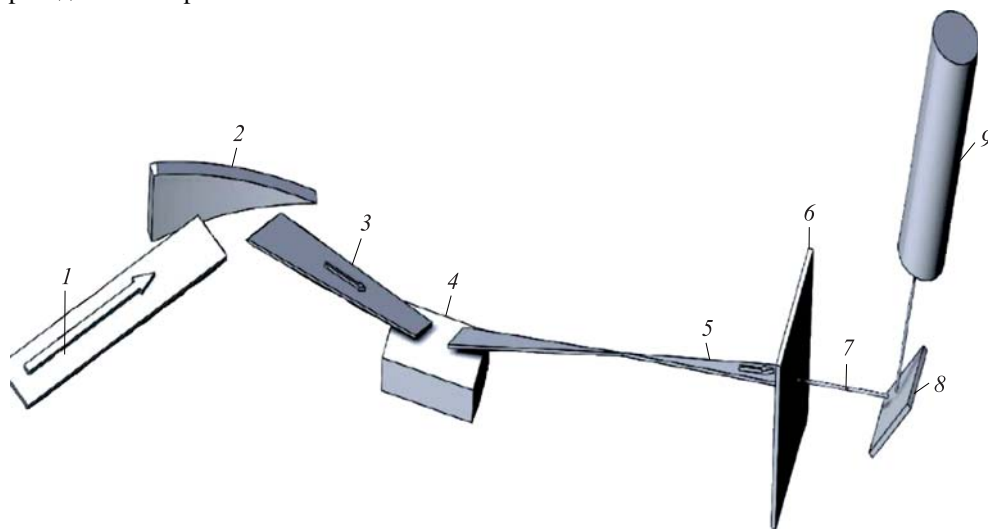


Рис. 2. Измерение энергетического разрешения спектрометра. 1 — белый пучок СИ; 2 — изогнутый кристалл-монокроматор; 3 — сходящийся пучок; 4 — зеркало; 5 — расходящийся пучок; 6 — малое отверстие; 7 — часть расходящегося веера; 8 — анализирующий монокристалл SiO_2 (1011); 9 — детектор (NaI + ФЭУ)

Белый пучок СИ (1) после отражения от изогнутого кристалла-монохроматора (2) становится сходящимся (3). После отражения от зеркала (4) сходится в фокусе и затем снова расходится (5). В экране (6) сделано малое отверстие, выделяющее часть (7) расходящегося веера. Пучок (7) падает на анализирующий монокристалл SiO_2 (1011) (8). Дифрагированное на кристалле-анализаторе излучение регистрируется детектором ($\text{NaI} + \text{ФЭУ}$) в счетном режиме (9). Кристалл-анализатор и детектор вращаются дифрактометром [5] вокруг горизонтальной оси по закону $\Theta-2\Theta$. Размер отверстия в экране (6) выбран равным размеру пикселя позиционно-чувствительного детектора. Таким образом, получаемая величина разрешения практически будет характеризовать разрешение не монохроматора, а спектрометра в целом.

На рис. 3 показан вид дифрактометра, использованного для измерения энергетического разрешения EXAFS-D-спектрометра.

На рис. 4 приведена зависимость интенсивности отраженного от анализирующего кристалла излучения от угла падения.

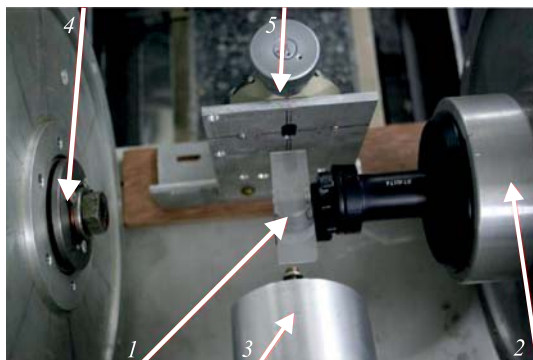


Рис. 3. Дифрактометр, использованный для измерения энергетического разрешения EXAFS-D-спектрометра. 1 — монокристалл; 2 — поворотное устройство кристалла; 3 — детектор; 4 — двухповоротное устройство детектора; 5 — отверстие перед кристаллом

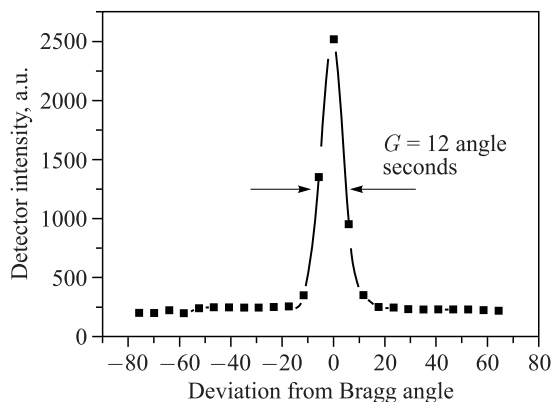


Рис. 4. Энергетическое разрешение спектрометра

Ширина этой кривой составляет 12 угловых секунд, что соответствует энергетическому интервалу $\Delta E = 2,4$ эВ. Это и есть разрешение спектрометра, измеренного на энергии 9,7 кэВ. Такое энергетическое разрешение оказывается вполне достаточным для задач экспрессного исследования материалов, для которых в основном и предназначен EXAFS-D-спектрометр в дисперсионной моде.

Зеркало, установленное после монохроматора, очищает отраженный пучок от высших гармоник. Так как высшие гармоники находятся далеко по энергии от исследуемого края поглощения, они не влияют на величину разрешения регистрируемого EXAFS-спектра. Их присутствие только уменьшает величину наблюдаемого эффекта в спектре EXAFS. Более принципиальную роль играют высшие гармоники в дифракционных исследованиях. Там они дают лишние — паразитные отражения, существенно затрудняющие расшифровку дифрактограмм. Поэтому детальное описание зеркала и его эффективности мы отнесли в нашу следующую работу, посвященную дооборудованию спектрометра для дифракционных измерений.

ТРЕБОВАНИЯ К ПОГЛОТИТЕЛЮ

Рассмотрим EXAFS-спектрометр в традиционной моде измерения спектра с изменением энергии монохроматором точка за точкой. Пусть измеряется очередная точка спектра по энергии E_i . Интенсивность прошедшего излучения I_T определяется выражением

$$I_T(E_i) = I_0(E_i) \exp \{-\mu(E_i)t_M\}, \quad (3)$$

где $I_0(E_i)$ — интенсивность падающего на образец излучения с энергией E_i ; $I_T(E_i)$ — интенсивность прошедшего через образец излучения с энергией E_i ; $\mu(E_i)$ — коэффициент поглощения исследуемого образца на энергии E_i ; t_M — средняя по освещаемому пятну толщина образца.

При измерении следующей точки по энергии E_{i+1} интенсивность прошедшего излучения будет определяться выражением такого же вида:

$$I_T(E_{i+1}) = I_0(E_{i+1}) \exp \{-\mu(E_{i+1})t_M\}. \quad (4)$$

Падающие интенсивности $I_0(E_i)$ и $I_0(E_{i+1})$ отслеживаются мониторным детектором, и их изменения, например, с током накопителя, учитываются при нормировке спектра.

Важно подчеркнуть, что освещаемое пятно на исследуемом образце не меняется от точки к точке спектра. (Это сравнительно легко достигается соответствующими средствами стабилизации, например, постоянством вертикального положения выходного пучка монохроматора.) Поэтому средняя толщина поглотителя в выражениях (3) и (4) одинакова и значения $\mu(E_i)$ и $\mu(E_{i+1})$ представляют значения искомого EXAFS-спектра. Очевидно, что если в освещаемой области образца существуют участки с меньшей, например, толщиной, то это повлияет на величину всех значений $\mu(E_i)$ одинаково и это никак не отразится на форме спектра.

Рассмотрим EXAFS-спектрометр в дисперсионной моде. Принципиально схема энергодисперсионного метода предполагает наличие «точечного» источника излучения и «идеальную» форму изогнутого кристалла-монохроматора. При этом можно ожидать, что размер сфокусированного пятна на образце в плоскости изгиба кристалла-монохроматора

тоже «точка». (Здесь мы пока не рассматриваем вторую (перпендикулярную) плоскость и также не будем учитывать очень малые по сравнению с рассматриваемыми величинами дифракционные ограничения.) Тогда «все» сфокусированные лучи проходят через одну и ту же «точку» исследуемого поглотителя. В действительности сфокусированное пятно имеет заметные размеры. В нашем случае это около 150 мкм. Полихроматический «веер» лучей сходится в фокусное пятно в районе исследуемого образца. Разные лучи этого веера, имеющие разные энергии, проходят через образец в разных точках. Поглощение каждого луча пропорционально произведению коэффициента поглощения на соответствующую локальную толщину.

Оценим масштаб необходимой однородности. Удобными для измерения EXAFS-спектров являются не слишком толстые образцы с μt меньше или порядка единицы. Такие образцы не дают заметного уширения пиков в спектрах поглощения и позволяют в полной мере использовать разрешение спектрометра. При таких малых толщинах мы можем разложить экспоненту, описывающую поглощение в ряд, и ограничиться только одним линейным по толщине членом. Примем, что величина пиков сверхтонкой структуры поглощения (т.е. EXAFS) составляет порядка 10 % от скачка на краю поглощения. Пусть далее допустимое изменение высот этих пиков за счет изменения толщины может составлять не более 10 %. Отсюда следует, что величина μt не может изменяться (за счет изменения толщины) более чем на 1 % от единицы, так мы получили ограничение на допустимую неоднородность толщины образца при сканировании по освещаемому пятну. Отметим, что принятые в процессе оценки допущения имеют весьма грубый характер и в действительности требования на однородность образца оказываются еще выше.

Практика показала, что изготовление порошкового образца с такой высокой однородностью оказывается очень трудной, если и вообще разрешимой задачей. Удовлетворительной неоднородностью толщины по образцу обладали в нашем случае только хорошо прокатанные фольги металлов.

Таким образом, EXAFS-спектрометр в дисперсионной моде оказывается очень чувствительным к неоднородности поглотителя, и наоборот, EXAFS-спектрометр в традиционной моде измерения спектра точка за точкой к степени неоднородности поглотителя практически не чувствителен.

ПРИМЕРЫ РАБОТЫ СПЕКТРОМЕТРА В EXAFS ДИСПЕРСИОННОЙ МОДЕ

Cu. На рис. 5 представлены участки спектров поглощения в медном образце (прокатанная фольга толщиной 15 мкм).

Видно, что спектры практически совпадают. Однако бросается в глаза кардинальная разница во временах измерения при близком качестве спектров — 100 мс и 30 мин. Время измерения в дисперсионной моде оказывается более чем в 10^4 раз короче времени измерения в традиционной пошаговой моде. Именно это обстоятельство обеспечивает возможность измерений относительно быстро протекающих процессов.

Осцилляции в ближней области края поглощения (XANES) прописаны на спектре в дисперсионной моде с разрешением, практически обеспечивающим такое же качество спектра, как и спектр с пошаговым измерением. Небольшая разница в разрешении спектрометров обнаруживается только в районе середины края поглощения, где пик,

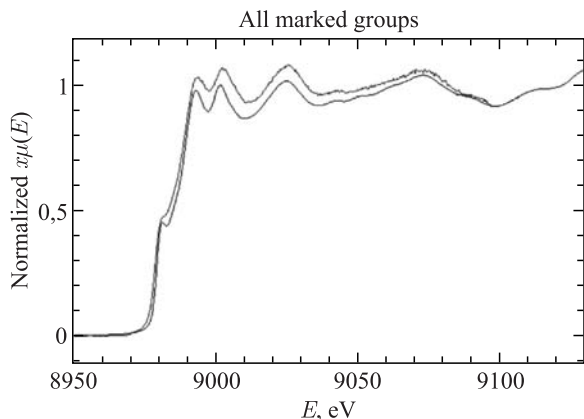


Рис. 5. Участки спектров поглощения в медном образце (прокатанная фольга толщиной 15 мкм). Верхняя кривая — спектр, измеренный на описываемом спектрометре EXAFS-D в дисперсионной моде. Размер пучка на образце — 150×200 мкм. Время экспозиции 100 мс при токе накопителя электронов 22 мА и энергии электронов 2,5 ГэВ. Нижняя кривая — спектр, измеренный примерно в тех же условиях на установке STM Курчатовского центра СИ [6] в традиционной моде поглощения с пошаговым прохождением энергетического диапазона за время 30 мин

измеренный в традиционной моде, оказывается более острым за счет более высокого разрешения спектрометра в этой моде. Этот пик в точности соответствует опубликованным EXAFS-спектрам металлических фольг [7].

Следует отметить несколько меньший диапазон энергий, измеренный в дисперсионной моде, — 170 эВ. Полный спектр в традиционной моде измерения простирается более чем на 500 эВ.

Zn. Влияние окисного состояния цинка на положение К-края поглощения можно видеть на рис. 6, где приведены участки спектров поглощения для образцов цинка и окиси цинка.

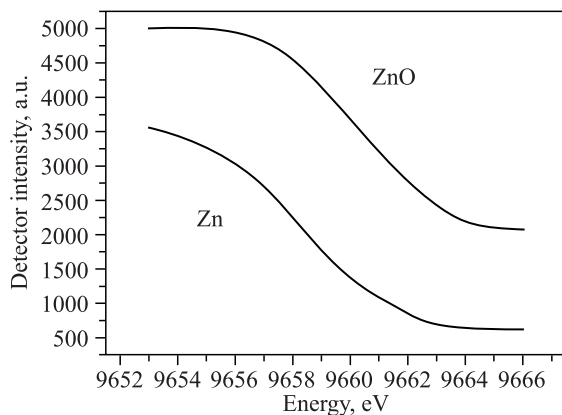


Рис. 6. Участки спектров поглощения Zn (нижняя кривая) и ZnO (верхняя кривая). Для цинка энергия края поглощения $E_K = 9659$ эВ, для окиси цинка — $E_K = 9660$ эВ

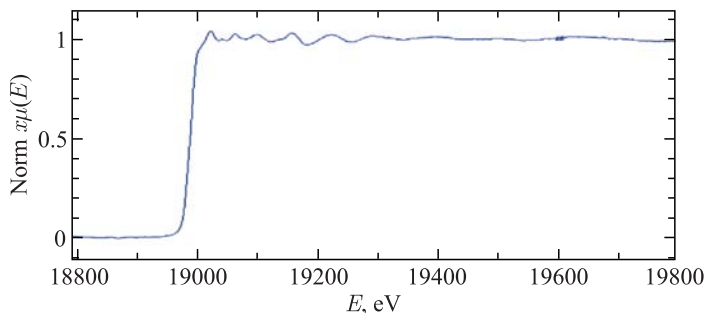


Рис. 7. Нормализованный EXAFS-спектр L_3 -края ниобия, измеренный на рассматриваемом спектрометре

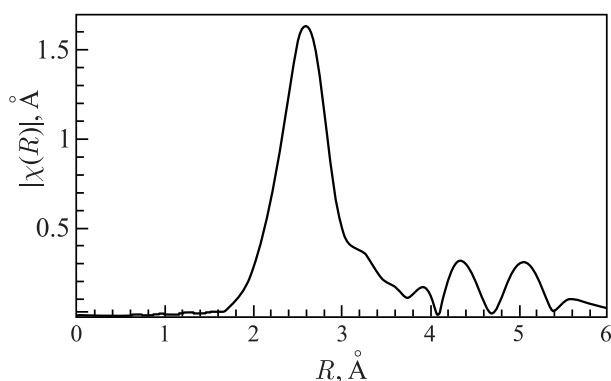


Рис. 8. Результат обработки спектра рис. 7 — фурье-трансформанта нормализованного EXAFS-спектра

Величина химического сдвига определена по смещению центров пиков дифференцирования линий К-краев и составила 1,52 эВ.

Nb. На рис. 7 приведен нормализованный EXAFS-спектр L_3 -края ниобия, измеренный на рассматриваемом спектрометре.

Ширина измеренной энергетической полосы составляет 1200 эВ. На рис. 8 приведен результат обработки — фурье-трансформанта нормализованного EXAFS-спектра.

Использовалась программа IFEFFIT [8]. Определенный здесь радиус первого окружения атома ниобия с учетом поправки на сдвиг фазы обратно отраженной электронной волны составил $(2,898 \pm 0,04)$ Å. Это значение хорошо согласуется с соответствующим значением 2,8638 Å, определенным в работе [9]. Координационное число первой сферы — 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. СРАВНЕНИЕ EXAFS-МЕТОДИК. ВОЗМОЖНОСТЬ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ДИСПЕРСИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Рассмотрим два известных метода получения EXAFS-спектров. Первый метод (традиционный) использует монохроматизированный пучок и механическое движение монохроматора для пошагового прохождения необходимого диапазона энергии. При этом

на каждом шаге регистрируется интенсивность прошедшего через образец (или рассеянного образцом) пучка. Отметим, что в Курчатовском центре СИ также работает EXAFS-спектрометр в этой традиционной моде с регистрацией рассеянного излучения [10]. Такая мода предпочтительна для исследований разбавленных образцов, т.е. образцов с малым содержанием исследуемого элемента.

Второй метод (дисперсионный) использует полихроматическое излучение, выделенное из белого пучка СИ изогнутым кристаллом. Каждый из методов обладает своим набором достоинств и недостатков. В таблице представлены сравнительные характеристики EXAFS-спектрометров и методик в традиционной и энергодисперсионной моде.

Основное достоинство традиционных методик заключается в возможности с высоким разрешением тщательного измерения протяженной структуры края рентгеновского погло-

Оценочное сравнение некоторых типов EXAFS-спектрометров и методик

Характеристика	EXAFS-D	Традиционный EXAFS (поглощение)	Традиционный EXAFS (рассеяние)
Получаемая информация	Химические сдвиги рентгеновских линий. Радиусы одно- и двухкоординатных сфер вокруг исследуемого атома	Радиусы трех- и четырехкоординатных сфер вокруг исследуемого атома	Радиусы трех- и четырехкоординатных сфер вокруг исследуемого атома
Применение	Кинетика процессов (давление, температура, химические реакции, облучение), микрообразцы, картирование	Исследование структуры (высокие концентрации исследуемого элемента)	Исследование структуры (малые концентрации исследуемого элемента)
Оценка количества спектрометров в мире	Единицы	Сотни	Десятки
Локальность по площади образца	До единиц мкм	$\sim 1 \text{ мм}^2$	$\sim 1 \text{ мм}^2$
Время измерения спектра	Доли секунды	Минуты	\sim Десятки минут
Энергетический диапазон измеряемого спектра	Вблизи края поглощения (NEXAFS)	Протяженный (EXAFS)	Протяженный (EXAFS)
Сложность прибора	Высокая	Умеренная	Умеренная
Требования к образцу	Очень высокая однородность	Однородность по толщине мало существенна	Однородность по толщине не существенна
Качество спектров	Высокое	Очень высокое	Очень высокое

щения исследуемого атома. Это отражено в названии методики — EXAFS — Extended X-ray Absorption Fine Structure. «Платой» за эту возможность является сравнительно большое время измерения, обусловленное применением механических устройств для изменения энергии монохроматора. Кардинально сократить это время не представляется возможным.

Главным преимуществом энергодисперсионной методики является отсутствие механического движения во время измерения спектра, обуславливающее возможность использования коротких времен экспозиций (десятки миллисекунд). Этому также способствует высокая светосила метода, при котором фотоны всех энергий спектра регистрируются одновременно. Совокупность этих обстоятельств позволяет проводить исследования быстропротекающих процессов в режиме «on line». К сожалению, энергетическое разрешение дисперсионных EXAFS-спектрометров все же несколько хуже, чем традиционных. Тем не менее, этого энергетического разрешения вполне достаточно для широкого цикла задач в области химии и других быстро протекающих процессов.

Описанный выше спектрометр полностью налажен. Приведенные примеры измерения EXAFS-спектров доказывают высокое качество оборудования и его готовность к измерениям.

Следует также упомянуть возможность дальнейшего совершенствования рассматриваемого дисперсионного EXAFS-спектрометра в Курчатовском центре СИ.

Для увеличения измеряемого энергетического диапазона EXAFS-спектра на невысоких энергиях К-краев исследуемых элементов достаточно увеличить апертуру входного на монохроматор «белого» пучка СИ с имеющихся 13 мм до примерно 30 мм. Остальные элементы спектрометра, в частности изгибаемый кристалл-монохроматор, увеличенному пучку соответствуют.

Более сложная переделка, скорее реконструкция, может заключаться в постановке перед имеющейся рентгенооптической схемой двух рентгеновских зеркал в геометрии Киркпатрика–Баеза. Использование вместо источника излучения его уменьшенного изображения может кардинально повысить спектральное разрешение прибора. Пример использования зеркал в EXAFS-спектрометре и некоторые физические результаты приведены в [11].

Благодарности. Измерения проведены на оборудовании НИЦ «Курчатовский институт», частично финансируемом за счет средств Соглашения о предоставлении субсидии от 15 августа 2014 г. № 14.619.21.0002 (уникальный идентификатор RFMEFI61914X0002) между Министерством образования и науки Российской Федерации и НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsushita T., Physzackerley R. P. // Japan J. Appl. Phys. 1981. V. 20. P. 2223–2228.
2. Aksenov V. L. et al. Universal Energy-Dispersive EXAFS Spectrometer on the SR Beam at the “Kurchatov Institute” National Center // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 448. P. 122–125.
3. Tyutyunnikov S. I. et al. Physical Startup of Energy Dispersive EXAFS Spectrometer at Kurchatov Center of Synchrotron Radiation and Nanotechnologies // Phys. Part. Nucl. Lett. 2009. V. 6, No. 6. P. 483–487.
4. Tolentino H. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 307–316.

5. Artemiev A. N. *et al.* Station for Investigation with High Spatial Resolution on Kurchatov SR Source // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 575. P. 228–230.
6. Chernyshov A. A., Veligzhanin A. A., Zubavichus Y. V. “Structural Materials Science” End-Station at the Kurchatov Synchrotron Radiation Source: Recent Instrumentation Upgrades and Experimental Results // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 603. P. 95–98.
7. <http://exafsmaterials.com/ReferenceSpectra.html>
8. Newville M. *et al.* // Physica B. 1995. V. 208&209. P. 154.
9. Bazanella N. *et al.* // J. Nanomaterials. 2011. V. 2011. Article ID 865969.
10. Artemiev A. N. *et al.* Fluorescence EXAFS Spectrometer for Kurchatov Synchrotron Radiation Center. First Experiments // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 543. P. 212–215.
11. <http://www.synchrotron-soleil.fr/images/File/recherche/ligneslumiere/ode/BL16.pdf>

Получено 30 марта 2016 г.