

УДК 535.8: 537.531

КОМПАКТНЫЙ ПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕЗОНАНСНОМУ РАССЕЯНИЮ В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2000 г. Н. В. Коваленко¹, О. А. Ли¹, А. Д. Николенко¹, В. А. Чернов²

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Сибирский центр СИ при ИЯФ СО РАН,

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 06.07.99 г.

Описывается компактный поляриметр на базе поляризующего многослойного зеркала для экспериментов по аномальному рассеянию в мягком рентгеновском диапазоне. Малые вес и габариты поляриметра реализованы благодаря применению оригинальной кинематической схемы, компенсирующей движение пучка по окну детектора. Схема компенсации обеспечивает неизменность точки входа в детектор лучей отраженных от зеркала при его небольших отклонениях от 45° (угол Брюстера в мягком рентгеновском диапазоне). Поляриметр позволяет проводить поляризационные измерения монохроматического и перестраиваемого в небольших пределах по энергии (~ 20 эВ), пучка. Приведены результаты испытаний поляриметра.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ поляризации рентгеновского излучения, резонансно рассеянного на исследуемом образце, может дать богатую информацию о свойствах образца. Как правило, эксперименты такого рода проводятся в некотором диапазоне энергий вблизи исследуемого резонанса. Сканирование по энергии позволяет разделить вклады резонансного и нерезонансного рассеяния и выявить природу резонанса. В качестве примера успешного применения этой техники в экспериментах по резонансному (аномальному) рентгеновскому рассеянию можно отметить работы по исследованию магнитной сверхструктуры материалов, керровского вращения поляризации в магнитных материалах и локальной электронной анизотропии атомов в кристаллах [1]. Основные результаты были получены с использованием жесткого рентгеновского излучения.

Наши предыдущие работы по исследованию дифракции мягкого рентгеновского (МР) излучения на молекулярных кристаллах показали возможность изучения ориентационной сверхструктуры органических соединений. В частности, было показано, что рассеяние фотонов с энергий вблизи резонансов K -края поглощения легких атомов (С, N, O) органических молекул обладает рядом интересных особенностей. Анализ поляризации фотонов, испытавших рассеяние на образце, в этом случае позволяет получить более полную картину.

В случае фиксированного положения источника (синхротронного излучения СИ) эта техника

требует дополнительного движения всего поляриметра, для того чтобы отследить угловое движение дифрагированного от образца пучка в процессе его сканирования по энергии. При этом должны соблюдаться жесткие требования на соосность оси поляриметра и направления дифрагированного пучка. В жестком рентгеновском диапазоне такого рода эксперименты легко реализуются с помощью коммерческого многократного гониометра, так как, благодаря прозрачности воздуха, легко осуществить механическую развязку движений образца, дифрактометра и самого поляриметра. Однако в МР-диапазоне подобные исследования затруднены из-за необходимости измерений в условиях высокого вакуума.

В данной работе описывается поляриметр, разработанный специально для экспериментов по резонансному рассеянию МР-излучения. Поляриметр удовлетворяет вакуумным требованиям и имеет малые вес и габариты. Приводятся результаты экспериментального тестирования изготовленного прототипа поляриметра.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛЯРИМЕТРОВ

В основе действия обычного поляриметра линейной поляризации лежит явление селективного отражения S -компоненты пучка света зеркалом, установленным под углом Брюстера. Измерение азимутальной зависимости интенсивности отраженного света дает информацию о степени линейной поляризации пучка. Этот способ измерения поляризации широко применяется в вакуум-

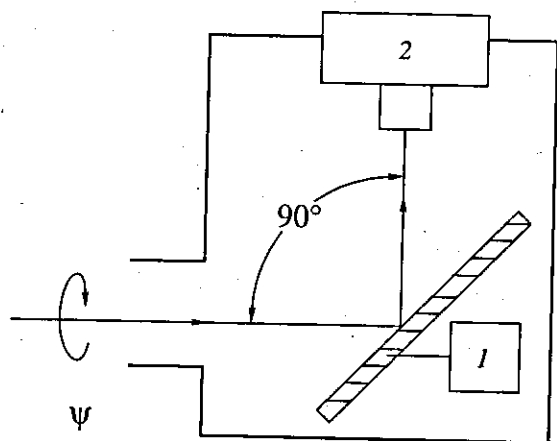


Рис. 1. Простейший поляриметр для измерения линейной поляризации МР-излучения: 1 – многослойное зеркало, 2 – детектор. Зеркало и детектор размещены внутри вакуумного объема, который вращается вокруг оси пучка.

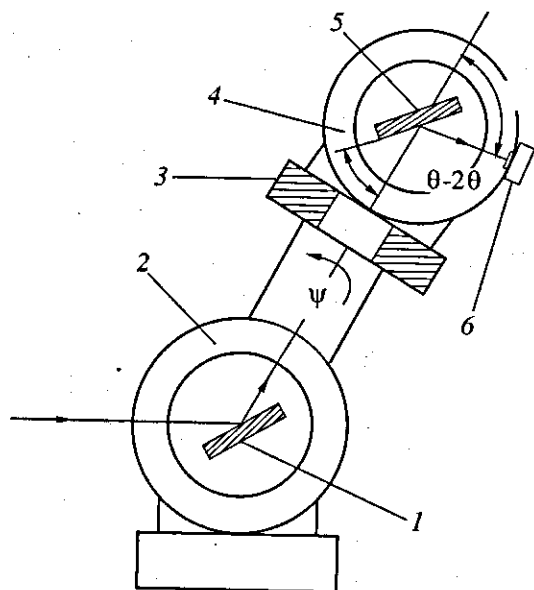


Рис. 2. Общий вид дифрактометра с анализирующим поляриметром для экспериментов по резонансному рассеянию в жесткой рентгеновской области: 1 – исследуемый образец, 2 – дифрактометр, 3 – ψ -гонометр поляриметра, 4 – θ - 2θ -гонометр поляриметра, 5 – поляризующий кристалл, 6 – детектор.

ной ультрафиолетовой (ВУФ) области. Резкое уменьшение коэффициента отражения с увеличением энергии фотонов не позволяет использовать обычные зеркала для измерений в МР-области. Появление многослойных зеркал (МСЗ) позволило создать линейные поляриметры для этого диапазона.

Типичный линейный поляриметр для МР-диапазона, использовавшийся в ранних экспериментах [2–4] по исследованию поляризации синхро-

тронного и ондуляторного излучений, показан на рис. 1. МСЗ, зафиксированное под углом 45° (угол Брюстера в МР-диапазоне) по отношению к падающему пучку, избирательно отражает его S-компоненту. Интенсивность отраженного на 90° пучка регистрируется детектором. МСЗ и детектор закреплены на одной вращающейся оси, которая используется для изменения азимутального угла ψ . Ось вращения поляриметра должна быть точно совмещена с направлением падающего пучка рентгеновского излучения. Поляриметр очень прост и компактен. Такая конструкция представляет собой слегка модифицированный вариант поляриметра Рабиновича [5], применяемого в ВУФ-области. В данном случае фиксация угла отражения зеркала не препятствует поляризационным измерениям с изменяемой частотой света, так как зеркало отражает в широкой области ВУФ-диапазона. В то же время, из-за узкой спектральной селективности отражения МСЗ в МР-диапазоне такая конструкция подходит лишь для измерений либо монохроматического пучка, либо “белого” пучка, имеющего широкий спектр с очень слабо меняющимися спектрально-поляризационными свойствами.

В экспериментах с монохроматическим и в то же время перестраиваемым по энергии МР-пучком из-за узкой энергетической полосы отражения МСЗ необходимо изменять его угол отражения в процессе сканирования по энергии. Это можно проиллюстрировать на примере Cr/Sc МСЗ, предназначенного для поляризационных измерений вблизи К-края углерода (285 эВ). В этом случае энергетическая полоса отражения многослойника равна 3–5 эВ, что недостаточно для работы во всей энергетической области эксперимента (~20 эВ). Кроме того, исследуемый пучок, как правило, имеет сильно различающиеся горизонтальную и вертикальную угловые расходимости. Следовательно, для точного определения поляризации необходимо измерение не пикового, а интегрального коэффициента отражения, т.е. необходимо прописывать всю кривую отражения МСЗ. Такая возможность полезна также для повышения точности измерения поляризации при использовании МСЗ интерференционного типа с углом Брэгга, слегка отличающимся от 45° [6]. Наконец, это позволяет отделить полезный сигнал от фона при измерениях слабого пучка.

На рис. 2 схематично показан дифрактометр с поляриметром для экспериментов по резонансному рассеянию в жестком рентгеновском диапазоне. Функцию поляризующего зеркала в данном случае выполняет кристалл-анализатор. Кристалл и детектор размещены на двухкружном θ - 2θ -гонометре, который, в свою очередь, установлен на ψ -гонометре. Для регистрации интегрального коэффициента отражения производится одновременное вращение кристалла и детектора.

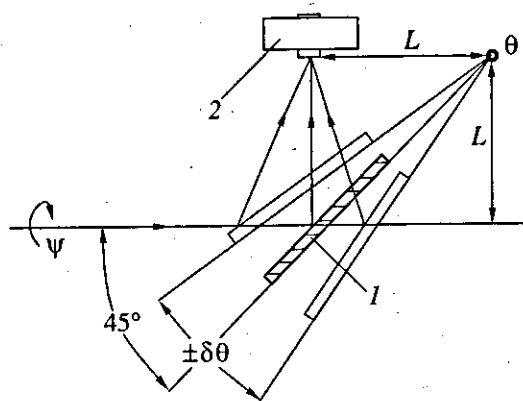


Рис. 3. Принцип схемы с фиксированной точкой входа в детектор лучей, отраженных от зеркала при его углом "покачивания" вблизи угла 45° . 1 – многослойное зеркало, 2 – детектор.

Кривые отражения прописываются для каждого значения азимутального угла и на каждой энергии фотонов. Такие измерения в полной мере удовлетворяют требованиям эксперимента по изучению поляризационных свойств дифрагированного пучка в условиях аномального рассеяния.

Простое повторение данной конструкции для МР эксперимента ведет к большим габаритам и весу экспериментального оборудования. Дейст-

вительно, использование двухкружного гониометра приводит к большим весу и габаритам вакуумной камеры поляриметра, что, в свою очередь, приводит к необходимости использования мощного ψ -гониометра для вращения вакуумной камеры с θ - 2θ -гониометром. В результате приходится использовать мощный и "жесткий" дифрактометр. Следовательно, для уменьшения габаритов и стоимости всей экспериментальной установки необходимо, в первую очередь, уменьшить вес и габариты самого поляриметра. Это можно сделать только отказавшись от использования двухкружного гониометра в поляриметре, сохранив, тем не менее, возможность сканирования по углу отражения МСЗ.

СХЕМА ПОЛЯРИМЕТРА

Сконструирован поляриметр с неподвижным детектором. Как правило, входное окно детекторов МР-излучения имеет либо малые размеры (газовый пропорциональный счетчик), либо существенную пространственную неравномерность регистрации. Поэтому необходимо обеспечить постоянство точки входа в детектор лучей, отраженных от МСЗ. Так как измерения поляризации с помощью МСЗ имеют смысл только в узком угловом интервале вблизи 45° , θ -гониометр можно

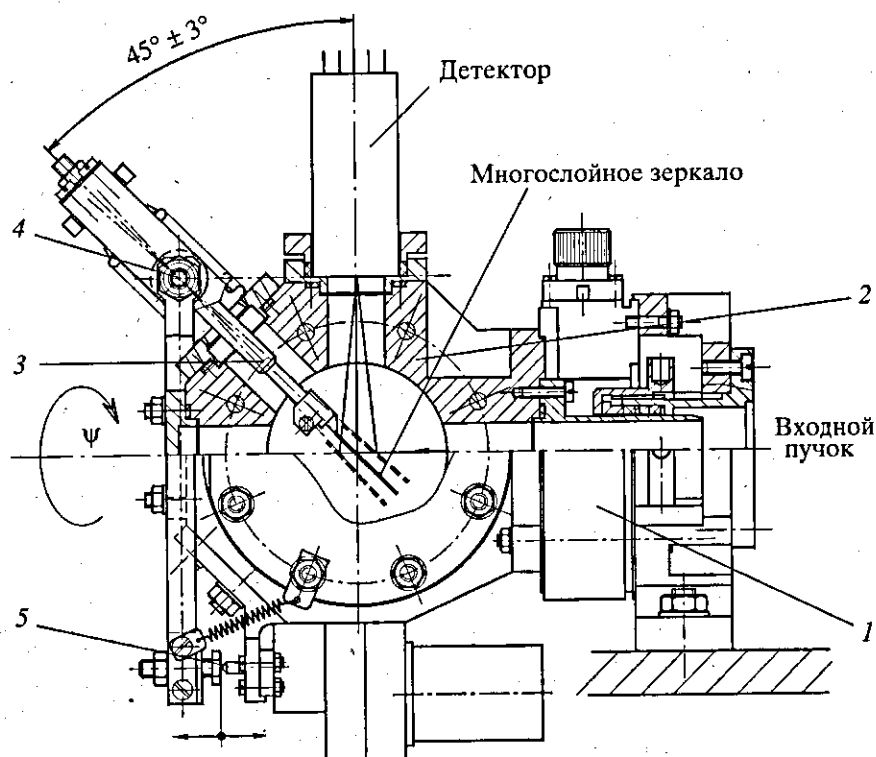


Рис. 4. Общий вид конструкции поляриметра для экспериментов по аномальному рассеянию в мягком рентгеновском диапазоне. 1 – ψ -гониометр, 2 – вакуумная камера, 3 – рычаг с многослойным зеркалом, 4 – θ -ось вращения рычага, 5 – синусный механизм для сканирования по углу.

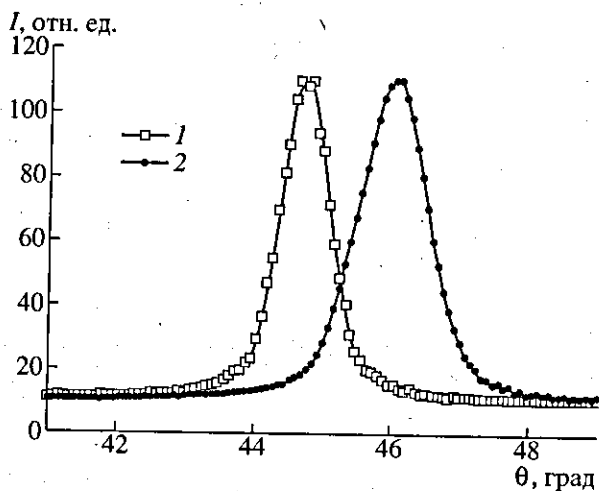


Рис. 5. Кривые качания Cr/Sc многослойного зеркала, полученные для двух энергий фотонов: 1 – 281, 2 – 275 эВ. Узкая спектральная селективность зеркала не позволяет использовать фиксированный угол отражения даже в столь малом диапазоне энергий.

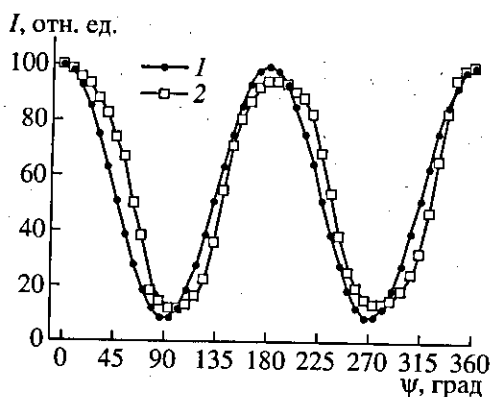


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных по измерению степени поляризации почти линейно-поляризованного пучка 281 эВ фотонов для двух техник измерения отражения от МСЗ поляриметра: 1 – измерения пикового коэффициента, 2 – измерения интегрального коэффициента отражения.

заменить на рычажный механизм вращения. Покажем, что существует решение, удовлетворяющее нашим условиям. Такая кинематическая схема показана на рис. 3.

МСЗ, закрепленное на конце рычага, вращается вокруг другого конца рычага. Пусть θ -ось вращения рычага отстоит на расстоянии L от ψ -оси поляриметра. Как видно из рис. 3, для всех значений угла θ вблизи 45° ($\theta = \pi/4 \pm \delta\theta$) существует точка, где все отраженные лучи пересекаются. Точка пересечения расположена на одинаковом расстоянии L от ψ -оси поляриметра и от θ -оси.

Поперечное отклонение Δ (уход) луча по окну детектора при угловом отклонении МСЗ от 45°

можно выразить математически:

$$\Delta/L = \operatorname{tg}(-2\delta\theta) - 1 + 1/\operatorname{tg}(\pi/4 - \delta\theta).$$

Так как $\delta\theta \ll 1$, пренебрегая квадратичными и выше членами в разложении, получаем:

$$\Delta/L \approx -2\delta\theta + 2\delta\theta = 0.$$

Очевидно, что появление “точки” кроссовера является следствием компенсации ухода луча при повороте МСЗ сдвигом луча в обратном направлении из-за движения точки отражения МСЗ. Компенсация выполняется только для линейных по θ членов разложения. Учет высших членов приводит к небольшому разбросу лучей в области кроссовера.

КОНСТРУКЦИЯ ПОЛЯРИМЕТРА И ЕГО ИСПЫТАНИЯ

Рис. 4 схематично изображает конструкцию поляриметра. Маленькая вакуумная камера, изготовленная из легкого сплава, укреплена на гониметре UR-100 фирмы Microcontrol, используемом для азимутального вращения. Поляриметр соединяется с вакуумным каналом дифрактометра с помощью фланца. Исследуемый МР-пучок проходит внутрь камеры через полый ввод вращения с двойным вильсоновским фторопластовым уплотнением. Детектор, находящийся вне вакуумного объема, монтируется на боковом фланце камеры. МСЗ находится внутри вакуумного объема и закреплено на конце стального стержня, введенного через гибкий сильфон внутрь камеры. Стержень, образующий угол 45° с осью поляриметра, выполняет функцию рычага. Ось вращения рычага вынесена за пределы камеры и задается двумя подшипниками, расположенными снаружи камеры. Такая конструкция обеспечивает возможность изменения угла отражения МСЗ в пределах $45 \pm 5^\circ$. Поворот осуществляется с помощью синусного механизма, закрепленного снаружи камеры. С этой целью на противоположной стороне камеры закреплен микровинт с приводом от шагового двигателя. Полный вынос всех механизмов за пределы вакуумного объема обеспечивает высокий вакуум внутри камеры. Общий вес поляриметра ~ 3 кг, габариты не превышают $20 \times 20 \times 15$ см.

С целью проверки работы поляриметра мы использовали лабораторный источник почти линейно поляризованного МР-излучения [7]. Источник представлял собой рентгеновскую трубку с анодом из ориентированного пирографита (HOPG) и поляризатора-монокроматора на основе Cr/Sc МСЗ. Измерения проводились на двух энергиях фотонов 275 и 281 эВ. Энергетическая ширина линий ~ 4 и ~ 3 эВ, соответственно. В поляриметре было использовано 100-периодное Cr/Sc МСЗ с периодом 3.14 нм. Чтобы продемон-

стрировать возможность работы поляриметра на различных энергиях фотонов, на рис. 5 показаны кривые качания МСЗ поляриметра для двух энергий анализируемого пучка. Как легко понять из рисунка, поляриметр с фиксированным углом отражения МСЗ не был бы способен функционировать даже в таком узком энергетическом интервале (6 эВ).

На рис. 6 показано сравнение измерений поляризации на энергии 281 эВ в случае регистрации пикового и проинтегрированного по углу отражений от МСЗ. Легко видеть, что измерения интегрального отражения позволяют избавиться от ошибок измерения поляризации, связанных как с расходимостью пучка, так и с небольшой несоосностью направления пучка и оси вращения поляриметра. Они дают бóльший контраст осцилляций и не зависят от ошибок установки поляриметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан поляриметр для экспериментов по аномальному рассеянию в мягком рентгеновском диапазоне. Малые вес и габариты поляриметра реализованы благодаря применению схемы компенсации движения пучка по окну детектора. Схема обеспечивает неизменность точки входа в детек-

тор лучей, отраженных от поляризующего МСЗ в процессе его сканирования по углу отражения. Приведены результаты испытаний прототипа поляриметра.

Авторы благодарят С.В. Мытниченко (ИХТТИМ) за плодотворные обсуждения, а также искренне признательны А.И. Федоренко (ХПИ) и Н.Н. Салащенко (ИФМ) за предоставление многослойных зеркал. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97-02-18454.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lovesey S.W., Collins S.P.* X-ray Scattering and Absorption by Magnetic Materials. Oxford: Oxford Univ. Press, 1996. 397 с.
2. *Gluskin E.S., Gaponov S.V., Dhez P. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 1986. V. A246. P. 394.
3. *Dhez P.* // Nucl. Instr. and Meth. 1987. V. A261. P. 66.
4. *Alexandrov Yu.M., Vinogradov A.V., Zorev N.N. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 1989. V. A282. P. 551.
5. *Rabinovitch K., Canfield L.R., Madden R.P.* // Appl. Opt. 1965. V. 4. P. 1005.
6. *Виноградов А.В., Кожевников И.В.* Угловые, дисперсионные и поляризационные свойства многослойных зеркал мягкого рентгеновского диапазона. Препринт № 102. М.: ФИАН, 1986. 65 с.

Compact Polarimeter for Soft X-Ray Resonant Scattering Studies

N. V. Kovalenko, O. A. Li, A. D. Nikolenko, V. A. Chernov

A very compact, energy-tunable polarimeter based on a linear multilayer-mirror-polarizer has been built for soft X-ray resonant scattering studies. Little weight and size of the polarimeter were obtained using an original mechanical scheme of multilayer rotation. The scheme allows to keep the constant position of polarimeter detector during the multilayer angular scanning in the vicinity of 45° angle (Brewster angle for soft X-ray range). This property is ideally suited for polarization measurements since it permits to record the integrated reflectivity of the beam under study. Some experimental results are shown to illustrate the performance of the polarimeter at the C K-edge energy range.