

В. Вагнер, В. Б. Дунин, Г. Карраш, Д. Крейзелер, Н. А. Невская, Г. Щорнак*, В. Шульце

КРИСТАЛЛДИФРАКЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР В ГЕОМЕТРИИ ИОГАНССОНА

Запущен кристаллдифракционный спектрометр /КДС/ в фокусирующей геометрии Иоганссона. Радиус фокальной окружности Роуанда составляет $R = 324$ мм. Для любых углов Брэгга в диапазоне $7^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ выполняется условие фокусировки. КДС через интерфейсы в стандарте КАМАК связан с ЭВМ МЕРА 60/30. Изменение угла θ измеряется лазерным интерферометром. Минимальный шаг измерения угла составляет $0,01''$ в перестраиваемом диапазоне 12° . Система пьезопривода устанавливает требуемое значение θ с минимальным шагом $0,23''$ в диапазоне угла $3'$. Исследования разрешения спектрометра проводились с кристаллом SiO_2 , вырезанным по плоскости $/1340/$ $d = 2,178 \text{ \AA}$ и согнутым по методу Иоганссона. Полуширина линии $\text{CuK}_{\alpha 1}$ от рентгеновской трубки составила 4,6 эВ. Оптико-механическая система спектрометра обеспечивает точность повторяемости углового масштаба $\Delta\theta \leq 2''$. Светосила КДС с источником на круге R составляет, в зависимости от θ , $/4 \div 8/ \cdot 10^{-5}$. Параметры установки позволяют разделять К-линии соседних зарядовых состояний при степени ионизации $I \geq Z/2$ для $Z \geq 30$.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Curved Crystal Spectrometer of Johansson Type

W. Wagner et al.

A curved crystal spectrometer of Johansson type has been put into operation. The radius of Rowland focus circle is $R = 324$ mm. For any Bragg angle in the $7^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ range the focus condition is realised. The spectrometer is connected to a MERA-60/30 computer via CAMAC interfaces. The deviation of angle θ is measured by a laser interferometer. The smallest

* Технический университет, Дрезден, ГДР.

step of angle measuring comprises $0.01''$ in a variable range of 12 degrees. A system with the piezodriver sets the needed value θ with minimum step of 0.23 arc sec in the $3'$ angle range. The study of spectrometer resolution was carried out with SiO_2 crystal cut over (1340) plane ($d = 2.178 \text{ \AA}$) and curved by Johansson principle. FWHM of $\text{CuK}\alpha_1$ reflex given by X-ray tube had 4.6 eV value. The spectrometer optical mechanical system gives an accuracy of repeated angle scale $\Delta\theta \leq 2$ arc sec. The spectrometer light efficiency with X-ray source, placed on a focal circle R, is of the order of $(4-8) \cdot 10^{-5}$, depending on θ . The parameters of apparatus permit to separate K lines of neighbouring charge states with ionization values $I \geq Z/2$ for $Z \geq 30$.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

В отделе новых методов ускорения ОИЯИ запущен кристалл-дифракционный спектрометр /КДС/. Он предназначен для анализа характеристического рентгеновского излучения высокозаряженных ионов ^{1,2/}, получающихся, например, в электронно-ионных кольцах коллективного ускорителя ^{3/} или в криогенном электронно-лучевом ионизаторе КРИОН-II ^{4/}.

Были исследованы следующие основные параметры прибора в разных режимах работы: энергетическое разрешение, точность восстановления угла, светосила.

Представлены результаты измерений с первичным и вторичным характеристическим K_X -излучением элементов ^{29}Cu , ^{30}Zn , ^{42}Mo .

1. Принцип работы и состав КДС

Принцип работы КДС основан на явлении дифракции рентгеновских лучей на кристалле. Условием отражения излучения с длиной волны λ_X от кристалла-анализатора является закон Вульфа-Брэгга

$$n \frac{hc}{E_X} = n \lambda_X = 2d \sin \theta_B, \quad //1/$$

где θ_B - угол скольжения Брэгга, d - постоянная кристаллической решетки, n - порядок отражения, E_X - энергия излучения, h - постоянная Планка, c - скорость света.

Следовательно, определение энергии X-излучения для заданного λ сводится к точному измерению угла Брэгга.

КДС реализован в фокусирующей геометрии Иоганссона^{/5/}. Радиус фокальной окружности Роуланда составляет $R = 324$ мм. Кинематика движения элементов КДС состоит в том, что при повороте кристалла входная щель перемещается линейно вдоль прямой от внешнего источника излучения до центра кристалла и всегда находится на круге R . При этом детекторная щель синхронно движется по циклоиде так, чтобы для любых θ_B в диапазоне от 7 до 70° выполнялось условие фокусировки^{/5/}.

Процесс управления спектрометром, контроль установленных параметров, накопление данных и отображение измеренного спектра полностью автоматизированы^{/7/}.

В состав КДС входят система установки и измерения угла, стандартная спектроскопическая электроника, расширенная функциями снятия временных распределений измеренных событий и разделению их по трем порядкам отражения. Двухступенчатая система стабилизации температуры кристалла поддерживает ее постоянство с точностью $\Delta T = \pm 0,05^\circ \text{K}$, что соответствует изменению межплоскостного расстояния кристалла $|\Delta d/d| < 10^{-6}$.

КДС через интерфейсы в стандарте КАМАК подключен к линии ЭВМ МЭРА-60/30^{/8/}.

Цветной дисплей управляется микро-ЭВМ и позволяет работать в интерактивном режиме при измерении и предварительной обработке спектров.

ЭВМ МЭРА-60/30 подключена к большой ЭВМ ЕС-1055 для передачи измеренных данных и детальной обработки спектров.

Поворот кристалла осуществляется шаговым двигателем через передачу так, что одному шагу соответствует среднее изменение угла $\Delta\theta_B \approx 0,15''$. Этот способ служит для быстрого вращения кристалла^{/9/}.

В режиме измерения спектров начальный угол и шаг его изменения задается программно.

Изменение угла θ_B измеряется лазерным интерферометром с точностью $0,01''$ в перестраиваемом диапазоне угла 12° ^{/10/}. Текущее значение θ_B сравнивается с заданным и шаговый двигатель совместно с системой пьезопривода устанавливает требуемое значение θ_B . Минимальный шаг системы пьезопривода /коррекции θ_B / составляет $0,23''$ в диапазоне угла 3° ^{/11/}. Положение входной и выходной щелей по отношению к кристаллу юстируется оптико-механической системой с наведением по лазерному лучу. Перемещение, открытие и закрытие щелей осуществляется 4 миниатюрными шаговыми двигателями. При этом входная диафрагма стабилизируется на фокальном круге с точностью $\pm 2,5$ мкм. Ширина щели $S \geq 0,03$ мм задается программно^{/12/}.

2. Исследование физических параметров

Достижимое разрешение рефлексов на КДС определяется естественной шириной линии рентгеновских переходов, мозаичностью кристалла и расширением рефлекса, обусловленным геометрическими aberrациями. Как aberrации, так и дисперсия /2/ КДС зависят от θ_B :

$$\left| \frac{\Delta E}{\Delta \theta_B} \right| = \frac{nhc}{2d} \left(\frac{\cos \theta_B}{\sin^2 \theta_B} \right), \quad /2/$$

поэтому наблюдается зависимость разрешения от выбранного углового диапазона и типа кристалла.

Исследования проводились с кристаллом SiO_2 , вырезанным по плоскости /1340/ и согнутым по методу Йоганссона / $d = 1,178 \text{ \AA}$ /.

При ширине входной щели 0,1 мм полуширина линии $^{29}\text{Cu K}_{\alpha 1}$ от рентгеновской трубки составляла 4,6 эВ/рис.1/. Угол θ_B задан в условных единицах (I.E.) лазерного интерферометра.

Спектр $^{42}\text{Mo K}_{\alpha 1/2}$ снимался в трех порядках отражения $n = 1, 2, 3$. Угловой масштаб определялся в инкрементах шагового двигателя основного привода (M.E.) /рис.2/. Таким путем перекрывался диапазон углов от 17,5 до 65,1°. Из спектров видна угловая зависимость разрешения и зависимость дисперсии от n .

Наблюдаемое расширение рефлексов, особенно при малых θ_B , объясняется геометрическими aberrациями. Соответствующие расчеты были проведены методом статистического моделирования с помощью программы VERDI-1 /18/.

Точность определения энергии E_x зависит от точности фиксированного угла θ_B . Особый интерес представляет поэтому стабильность оптико-механических систем спектрометра при последовательных измерениях. Повторяемость положения рефлекса была исследована на флуоресцентной линии $^{30}\text{Zn K}_{\alpha 1}$. Сдвиг центра тяжести рефлекса был меньше 0,4 доли цены канала спектра /1000 I.E./. Этой величине соответствует $\Delta \theta_B < 2''$, $\Delta E < 0,2 \text{ эВ}$ и $|\Delta E/E| < 2 \cdot 10^{-5}$.

Большую точность углового масштаба можно достигнуть, объединяя измерение с калибровкой /внутренняя калибровка/.

Светосила КДС для заданной геометрии была оценена по формуле

$$S = \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \frac{R_C}{w} \epsilon e^{-\mu x}, \quad /3/$$

где $\Delta \Omega$ - реализуемый телесный угол, R_C - интегральная отражательная способность кристалла, w - ширина рефлекса,

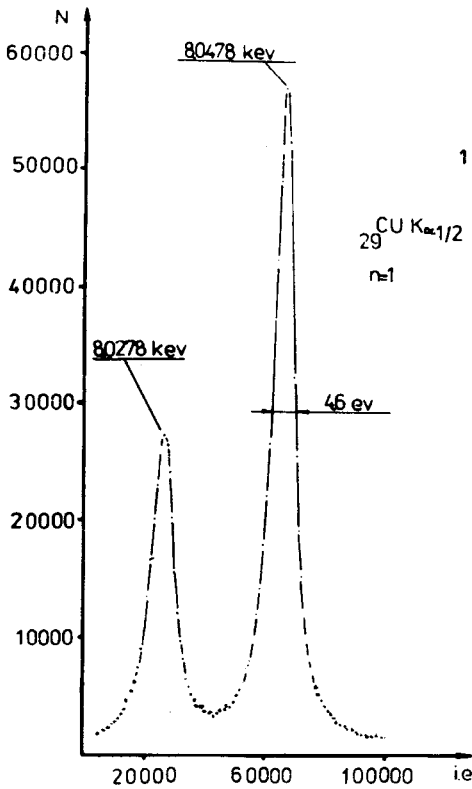


Рис. 1. Спектр излучения линий $\text{Cu } K_{\alpha 1} K_{\alpha 2}$ при $n = 1$.

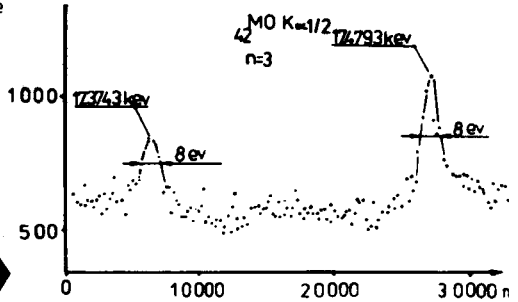
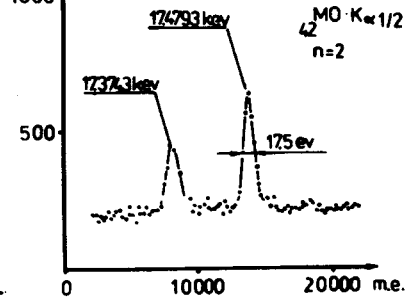
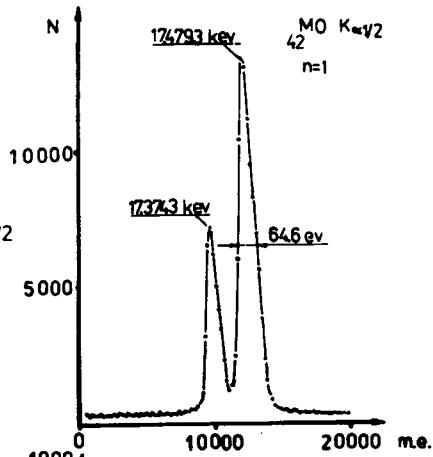


Рис. 2. Спектр излучения линий $\text{Mo } K_{\alpha 1} K_{\alpha 2}$ при $n = 1, 2, 3$.

ϵ - эффективность детектора, $e^{-\mu X}$ - фактор, учитывающий поглощение излучения в материалах. Отражательная способность кристалла была вычислена программой BRAGG^{/14/}. Без учета поглощения и эффективности детектора светосила КДС с источником на круге R составляет, в зависимости от θ_B , $/4 \div 8/ \cdot 10^{-5}$.

При работе с внешними источниками уменьшение $\Delta \Omega$ ведет к дополнительному фактору $10^{-3} - 10^{-4}$.

Заключение

Разработан и введен в физическую эксплуатацию новый рентгеновский спектрометр. Параметры прибора и его разрешение позволяют проводить измерения спектров характеристического рентгеновского излучения высокозаряженных ионов и разделять К-линии соседних зарядовых состояний при степени ионизации $I \geq Z/2$ для $Z \geq 30$.

Литература

1. Musiol G., Wagner W., Zschornack G. TU-05-12-84, Technical Univ. of Dresden, 1984.
2. Zschornack G., Müller G., Musiol G. Nucl. Instr. and Meth., 1980, 173, p.457.
3. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов. Атомиздат, М., 1979.
4. Донец Е.Д. ЭЧАЯ, 1982, т.13, вып.5, с.941.
5. Johansson T. Z.f.Phys., 1933, 82, p.185.
6. Musiol G. et al. ZfK-503, Rossendorf, 1983, p.105.
7. Карраш Г. и др. ОИЯИ, P13-83-474, Дубна, 1983.
8. Карраш Г. и др. ОИЯИ, P13-83-473, Дубна, 1983.
9. Карраш Г., Щорнак Г. ОИЯИ, 13-82-104, Дубна, 1982.
10. Мюллер Г., Пильц Р., Щорнак Г. ОИЯИ, P13-81-698, Дубна, 1981.
11. Карраш Г. и др. ОИЯИ, P13-83-484, Дубна, 1983.
12. Karrasch G. et al. Gemeinsamer Jahresbericht 1984. ZfK Rossendorf, 1985.
13. Reichmann A. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 1984.
14. Щорнак Г., Полерс А., Рейхманн А. ОИЯИ, P10-83-75, Дубна, 1983.