

УДК 533.9.082.5

Рентгеновский спектрограф на диапазон энергий 1,5—400 кэВ

Е. О. Баронова, М. М. Степаненко
РНИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

Разработан и опробован рентгеновский спектрограф на широкий диапазон энергий — 1,5—400 кэВ. Основой прибора является кристалл кварца, работающий одновременно в оптических схемах Кошуа и Иоганссона. Приведены спектры молибдена и хрома, зарегистрированные с помощью такого комбинированного диспергирующего элемента.

Фокусирующие рентгеновские спектрографы Иоганна (Иоганссона) и Кошуа широко применяются в диагностике плазмы [1]. В качестве диспергирующих элементов в этих приборах используются так называемые рентгеновские кристаллы, изогнутые в виде цилиндрических, сферических или тороидальных поверхностей.

В приборах Иоганна рабочие плоскости кристалла параллельны, а в приборах Кошуа — перпендикулярны его механической поверхности. Приборы Иоганна (Иоганссона) применяются для достаточно мягкой области спектра $E < 10$ кэВ и нуждаются в вакуумной откачке при $E < 5$ кэВ, что обусловлено поглощением изучаемых квантов воздухом. Спектрографы Кошуа используются для исследования области спектра $E > 10$ кэВ и, как правило, не откачиваются.

Указанные особенности обуславливают принципиально различный дизайн приборов, работающих на прохождение (Кошуа), и приборов, работающих на отражение (типа Иоганн, Иоганссон).

Настоящая работа посвящена исследованию энергетического диапазона комбинированного рентгеновского спектрографа, предназначенного для работы в схеме как Иоганссона, так и Кошуа. Для обоих режимов сконструирован один и тот же металлический корпус, рассчитанный на широкий диапазон рабочих углов $\pm (25-75)$ град. Диспергирующим элементом является кристалл кварца, приклеенный к цилиндрической подложке.

Показано, что разработанный и впервые опробованный универсальный кварцевый кристалл может успешно работать как в схеме Иоганссона, так и в схеме Кошуа—Иоганссона. Энергетический диапазон прибора составляет 1,5—400 кэВ и является рекордным среди существующих аналогов.

В отличие от общепринятой схемы Кошуа—Иоганна, ширина и положение линии на детекторе не зависят от размера и положения источника. Это исключает ошибку при определении ширины линии или абсолютной длине волны, особенно в экспериментах, когда положение источника и/или его размер могут существенно меняться за время экспозиции.

Прибор обладает высокой светосилой и может быть эффективно использован для диагностики плотной высокотемпературной плазмы.

Диспергирующий элемент типа Кошуа—Иоганссон

Дадим краткое описание трех традиционно используемых типов спектрографов — спектрографов Иоганна и Иоганссона, работающих на отражение, и спектрографа Кошуа—Иоганна, или просто спектрографа Кошуа, работающего на пропускание [2].

На рис. 1, *а* представлена схема спектрографа Иоганна, используемого для регистрации излучения $E < 10$ кэВ. Рентгеновское излучение точечного источника А, согласно закону Брэгга, разлагается в спектр кристаллом К. При этом под углом θ отражается излучение с длиной волны λ , удовлетворяющей условию $2d \sin \theta = k\lambda$. Спектр фокусируется на круге Роуланда радиуса R : радиус отражающих поверхностей кристалла $2R$, радиус механической поверхности кристалла — R . Если источник находится на круге Роуланда, то данная длина волны отражается всей поверхностью кристалла. Даже в случае идеально изготовленного кристалла линия на детекторе слегка размыта, так что точки B_1 и B_2 на детекторе не совпадают. Это обусловлено в основном расфокусировкой, вносимой краями кристалла, не лежащими на круге Роуланда.

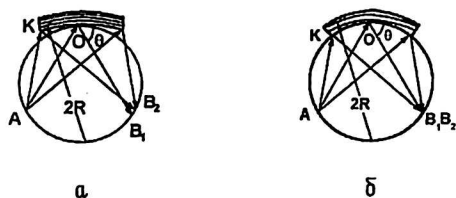


Рис. 1. Оптическая схема:
а — спектрографа Иоганна;
б — спектрографа Иоганссона

В приборе Иоганссона (см. рис. 1, *б*) радиус механической поверхности кристалла совпадает с радиусом круга Роуланда R , радиус рентгеновских отражающих плоскостей равен $2R$. В случае идеально изготовленного кристалла качество фокусировки существенно выше, чем в приборе Иоганна, и определяется сферическими aberrациями и кривой отражения изогнутого кристалла.

На рис. 2, *а* представлена оптическая схема прибора Кошуа, широко применяемого для излучения энергий $E > 10$ кэВ. Рентгеновское излучение протяженного источника A_1A_2 частично проходит через кристалл К напрямую, частично разлагается в спектр, который затем фокусируется на окружности Роуланда радиусом R . Фотоны с энергией E фокусируются в области B_1B_2 на окружности Роуланда под углом Брэгга:

$$E = 12,4 / (2d \sin \theta),$$

где E — энергия в кэВ;

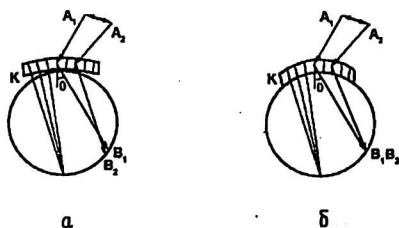
$2d$ — межплоскостное расстояние кристалла, в ангстремах;

θ — угол Брэгга.

Рабочие плоскости кристалла перпендикулярны его механической поверхности и при продолжении пересекаются в одной точке на круге Роуланда. Радиус цилиндрической поверхности кристалла равен диаметру окружности Роуланда $2R$. Фокусировка линий в этой схеме невысока вследствие влияния краев кристалла, не лежащих на круге Роуланда. Эта схема во многом ана-

логична схеме прибора Иоганна, поэтому назовем ее для определенности схемой Кошуа—Иоганна.

Рис. 2. Оптическая схема:
а — спектрографа Кошуа—Иоганна;
б — спектрографа Кошуа—Иоганссона



Для прибора Кошуа нами разработан и впервые изготовлен усовершенствованный цилиндрический кристалл кварца, схематически показанный на рис. 2, б. Оптическая поверхность кристалла лежит на круге Роуланда (сравни с рис. 2, а) аналогично тому, как это реализовано в схеме Иоганссона (см. рис. 1, б), рабочие плоскости при продолжении пересекаются в одной точке на круге Роуланда, как это имеет место в приборе Кошуа—Иоганна.

Учитывая эти особенности, разработанный диспергирующий элемент назвали кристаллом типа Кошуа—Иоганссон. Его преимущества по сравнению с обычно применяемым в приборе Кошуа кристаллом, изображенным на рис. 2, а, состоят в том, что ширина линии и ее местоположение на детекторе не зависят ни от размеров источника, ни от его положения в пространстве. Аналогичными преимуществами обладает кристалл, применяемый в приборе Иоганссона, по сравнению с кристаллом, применяемым в приборе Иоганна.

Длина нашего кристалла 70 мм, ширина 10 мм и толщина 350 мкм, радиус круга Роуланда 250 мм, межплоскостное расстояние для схемы Кошуа $2d = 3,6 \text{ \AA}$, что соответствует срезу кварца 0001.

Данный кристалл кварца имеет еще одно важное свойство — он изготовлен таким образом, что его механическая поверхность ориентирована вдоль плоскостей 10 (-1)0. Следовательно, он может служить диспергирующим элементом с межплоскостным расстоянием $2d = 8,5 \text{ \AA}$ в приборе Иоганссона.

Такие комбинированные диспергирующие элементы для фокусирующих спектрографов могут быть изготовлены только из кварца, который обладает высокой упругостью, необходимой для изгиба, и большим количеством срезов с высокими коэффициентами отражения.

Энергетический диапазон прибора

Мы проанализировали энергетический диапазон прибора в схеме Иоганссона с учетом возможности использования так называемых наклонных срезов семейства $h\alpha(-h)\lambda$. Называем здесь наклонными срезы, составляющие некоторые углы α с основным рабочим срезом кристалла. Относительные коэффициенты отражения от наклонных срезов могут быть достаточно высоки, и использование таких срезов может существенно расширить как энергетический диапазон прибора, так и другие диагностические возможности.

Рентгеновские лучи отражаются от наклонных рентгеновских срезов под углом Брэгга θ , $2d\sin\theta = k\lambda$, где λ — длина волны.

Прибор в этом случае работает в так называемой несимметричной схеме отражения, когда угол падения излучения на поверхность кристалла $\varphi = \theta + \alpha$, где θ — угол Брэгга; α — угол между отражающей плоскостью и поверхностью кристалла, а угол отражения $\phi = (\theta - \alpha)$.

Энергетический диапазон прибора при работе в схеме Иоганссона составляет 1,5–13,2 кэВ для диапазона углов 25–75 град и срезов 10(-1)0, 20(-2)1, 30(-3)1, 40(-4)1, 50(-5)1.

Были проанализированы также срезы, наклоненные по отношению к срезу 0001, которые могут быть использованы для регистрации излучения при работе в несимметричной схеме Кошуа—Иоганссона. Для диапазона углов 25–75 град и срезов 0001, 10(-1)2, 10(-1)3, 10(-1)4, 10(-1)5, 10(-1)6 энергетический диапазон прибора при работе в схеме Кошуа—Иоганссона составляет 10–400 кэВ.

Общий же энергетический диапазон данного прибора с комбинированным диспергирующим элементом, вырезанным вдоль 10(-1)0, составляет 1,5–400 кэВ.

Мы планируем детально исследовать относительные коэффициенты отражения в различных порядках отражения от срезов 10(-1)0 и 0001 кристалла типа Кошуа—Иоганссон, а также относительные коэффициенты отражения от различных наклонных срезов. Подобная характеристика прибора очень важна с практической точки зрения для расшифровки сложных спектров и выбора рабочего среза с оптимальными разрешением и светосилой для регистрации линии с заданной длиной волны и яркостью свечения.

Экспериментальные результаты

Предложенный комбинированный кристалл работает как в схеме Иоганссона, так и в схеме Кошуа—Иоганссона, для которых используется один и тот же металлический корпус прибора. На рис. 3, а представлен спектр К-альфа линий хрома, зарегистрированных во втором порядке отражения от среза 10(-1)0 комбинированного кристалла Кошуа—Иоганссона, работающего в схеме, приведенной на рис. 1, б. Качество полученного спектра достаточно высоко и сравнимо с качеством К-альфа линий хрома, полученных при отражении от кристалла кварца 10(-1)0, поставленного на оптический контакт на сферическую подложку радиуса 250 мм.

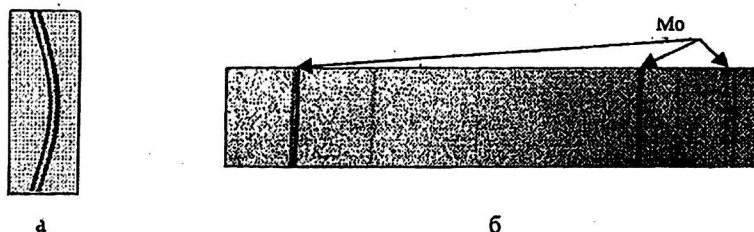


Рис. 3. Спектр: а — линии К-альфа хрома во втором порядке отражения от 10(-1)0; б — линии К-альфа Мо и Си, зарегистрированные при отражении от семейства срезов кристалла Кошуа—Иоганссона в схеме, изображенной на рис. 2, б

На рис. 3, б представлен спектр К-альфа линий молибдена, полученный при отражении от семейства срезов кристалла Кошуа—Иоганссона, работающего в схеме, показанной на рис. 2, б. На спектре присутствуют также флуоресцентные линии меди, эмиттируемые медной оправой молибденового анода. Мы не ставили задачу расшифровать весь спектр, но хотели продемонстрировать способность данного кристалла работать в схемах, указанных на рис. 1, б и рис. 2, б одновременно.

Выводы

Таким образом, создан комбинированный спектрограф, который может работать как в схеме Иоганссона, так и Кошуа—Иоганссона. Основой прибора служит специально изготовленный кристалл кварца, вырезанный параллельно срезу 10(-1)0. Прибор обладает широким энергетическим диапазоном 1,5—400 кэВ и может обеспечить высокое спектральное разрешение. Он имеет высокую светосилу и может быть эффективно использован в диагностике высокотемпературной плазмы.

Литература

1. Бойко В. А., Виноградов А. В., Пикуз С. А. *др.*//Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М. 1980. Т. 27.
2. Боровский И. Б. Физические основы рентгеноспектральных исследований. — М.: изд-во Московского университета, 1956.

X-ray spectrometer for the 1,5—400 keV energy range

E. O. Baronova, M. M. Stepanenko
Kurchatov's institute, Moscow, Russia

X-ray spectrometer for the 1,5—400 keV energy range was designed. It is based on quartz crystal working both in Cauchois and Johansson optical schemes. The Mo and Cr spectra registered with the given spectrometer are presented.