

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

НОВЫЕ ИДЕИ В РЕНТГЕНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Работами ряда исследователей в самое последнее время была доказана возможность успешного применения рентгено-спектральных методов в целом ряде областей физического исследования. Помимо применения этих методов для количественного и качественного анализов для решения ряда вопросов теории агрегатных состояний и физики X-лучей за последнее время, повидимому, доказана возможность успешного использования рентгено-спектральных методов для изучения механизма деформации¹. Многообразие направлений, в которых применение спектральных методов оказалось плодотворным, определило то обилие новых путей усовершенствования спектроскопической техники, которым характеризуются последние 5 лет.

В ряде обзоров², появившихся несколько лет назад, подробно освещены принципиальные вопросы, связанные с применением спектрографов, работающих по принципу Иогана или Кошуа, нашедших весьма удачное конструктивное оформление в ряде работ авторов школы Зигбана. Укажем лишь, в добавление к этому, на работу Борисова и Фогеля³, описавших спектрограф своей конструкции, несколько отличной от зигбановской. В спектрографе кристаллодержатель не представляет отдельной детали, и поэтому не требуется специально юстировать его относительно кассеты. Однако, это бесспорное преимущество спектрографа при экспрессных съемках, в лабораторной практике не может быть признано решающим.

Спектрографы, использующие плоский кристалл

Несмотря на большие успехи в области спектроскопии с вогнутым кристаллом, при решении ряда физических задач применение этой методики представляется невозможным. Проблема создания светосильных

спектрографов, обеспечивающих большую интенсивность без недопустимого в ряде случаев изгиба отражающего кристалла, насколько нам известно, впервые была поставлена и остроумно решена Фанкушеном⁴. Применяя обыкновенный спектрограф Брэгга, Фанкушен предложил выкалывать кристалл, отражающий рентгеновские лучи, так, чтобы его поверхность оказывалась под углом к отражающим плоскостям. При этом отраженный пучок составляет меньший угол с поверхностью кристалла, чем падающий. Легко подсчитать интенсивность отраженного пучка. Если Φ — угол, образованный поверхностью кристалла с отражающими поверхностями (рис. 1), а θ — угол Брэгга для падающих лучей, то отношение ширины пучков падающего и отраженного

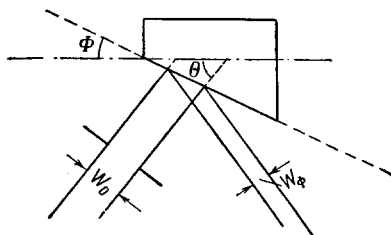


Рис. 1. Ход лучей в спектрографе по методу Фанкушена

раженного пучка. Если Φ — угол, образованный поверхностью кристалла с отражающими поверхностями (рис. 1), а θ — угол Брэгга для падающих лучей, то отношение ширины пучков падающего и отраженного

дается формулой

$$\frac{W_0}{W_\Phi} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta},$$

где $\alpha = \theta + \Phi$ и $\beta = \theta - \Phi$.

Фанкушен показал, что после учета поглощения эффективный выигрыш в интенсивности при его методе по сравнению с обычным брегговским дается выражением

$$P = \frac{2 \sin \alpha}{\sin \alpha + \sin \beta},$$

которое при $\beta = 0$ или $\Phi = 0$ приобретает максимальное значение, равное 2.

Аналогичным путем была проведена работа Д. Гогоберидзе⁵. Автор осуществляет такое расположение прибора, при котором ось щели спектрографа оказывается параллельной поверхности антикатада, имеющего в случае трубок Хаддинга формулу круга диаметром в 2—3 мм, который наблюдается через окошко в виде сильно вытянутого эллипса. Подобное расположение щели должно поэтому, по мысли автора, привести к более рациональному использованию фокусного пятна. На рис. 2 мы приводим схематический вид спектрографа, сконструированного в Л. Х. Т. И., с горизонтальной осью вращения. Идя далее по пути увеличения интенсивности, автор осуществляет спектрограф, отражающий кристалл которого вырезается параллельно различным кристаллографическим направлениям, имеющим малое междуплоскостное расстояние. В случае кристаллов NaCl, вырезанных по ромбодекаэдру, LiF, срезанных по плоскости (110), и кристаллов свинцового блеска автору удалось, действительно, получить значительный выигрыш в интенсивности, позволивший, например, для кристаллов свинцового блеска уменьшить необходимую экспозицию в 6—7 раз по сравнению с каменной солью, отражающей одной из плоскостей (100), (010) или (001). Благодаря такому выигрышу в интенсивности оказалось возможным перейти к съемке в более высоких порядках отражения с повышенной разрешающей способностью.

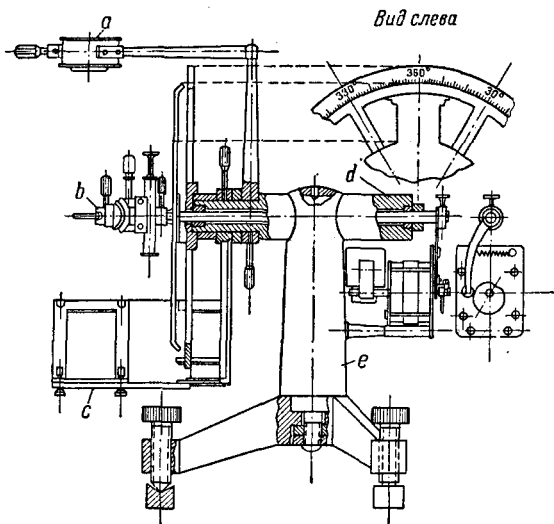


Рис. 2. Спектрограф с плоским кристаллом и горизонтальной осью

а — диафрагма, ограничивающая первичный пучок, б — кристаллодержатель, в — кассета, д — горизонтальная ось спектрографа, укрепленная неподвижно на стойке (е)

Спектрографы с изогнутыми кристаллами

а) Спектрограф с так называемой горизонтальной фокусировкой. Со времени появления первых работ Иогана и Кошуа, разобравших геометрические условия фокусировки в спектрографах с изогнутым кристаллом, усилия исследователей пошли, с одной стороны, в на-

правлении создания конструкций, наиболее пригодных для решения отдельных физических задач, а с другой — в сторону создания универсального рентгеновского спектрографа, позволяющего охватить значительный интервал длин волн.

Не касаясь специальных конструкций, описанных разными авторами⁶, остановимся на последней работе Ингельштама⁷, описавшего свой универсальный спектрограф с большой светосилой. Автор ставит своей

целью создание универсального рентгеновского спектрографа, удобного в работе и способного перекрыть область длин волн до 2500 ХЕ. Последняя заключает

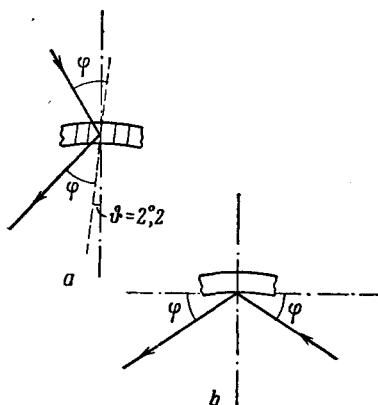


Рис. 3. Схематическое изображение отражения по методам Кошуа и Иогана

а — метод Кошуа, б — метод Иогана

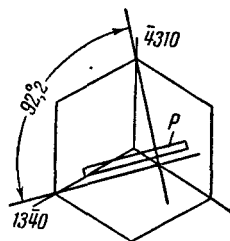


Рис. 4. Отражающие плоскости кварца, используемого в универсальном спектрографе Ингельштама

P — пластинка

весь К-спектр элементов с атомным номером, превышающим 24. Известно, что в области 1100—1500 ХЕ геометрические условия съемки делают более приемлемым применение спектрографов типа Кошуа, работающих по принципу «внешнего отражения». С другой стороны, в области более длинных волн предпочтительнее пользоваться методом Иогана (рис. 3). В первом из методов используется система плоскостей, перпендикулярная к поверхности изогнутого кристалла, во второй — параллельная ей. Автор сводит задачу о конструировании универсального спектрографа, который мог бы с одинаковым успехом быть использован и как спектрограф Иогана, и как спектрограф Кошуа, к выбору таких кристаллов, которые имели бы малое междуплоскостное расстояние для плоскостей, участвующих в отражении по Иогану (для получения достаточной дисперсии в области очень малых λ), и несколько большее d для плоскостей, работающих в методе Кошуа. Оказалось, что пластинка кварца, вырезанная таким образом, как изображено на рис. 4, обладает достаточной симметрией и позволяет отражать X-лучи по мере надобности то от одной, то от другой системы плоскостей, практически не меняя положения кристалла. Угол между двумя системами плоскостей почти не отличается от прямого и составляет $92^\circ, 2$.

В спектрографе Ингельштама (снимок которого приведен на рис. 5) угол между нормалью к поверхности кристалла в его средней точке и падающими лучами может варьироваться до 65° . Автор показывает, что так устроенный спектрограф позволяет исследовать К-спектры элементов $92 \geq Z \geq 24$ и L-спектры всех элементов с Z, лежащими между 62 и 92. Как видно, в области λ , соответствующих К- и L-спектрам легких элементов с $Z < 24$, попрежнему необходимо использовать специальные спектрографы с кристаллами, обладающими большим d . Радиус кривизны спектрографа Ингельштама 30 см. Тщательно пригнанный кристаллодержатель размером $80 \times 34 \times 36$ мм делается из специальной закаленной стали для предотвращения возможной деформации.

б) Спектрографы с вертикальной фокусировкой. Наряду с развитием методов Кошуа и Иогана, относящихся к устройствам с так называемой горизонтальной фокусировкой, Кунцель⁸, Далежейек и Таерле⁹ развили в своих работах теорию метода вертикальной фокусировки. Последние авторы недавно описали достаточно совершенную конструкцию спектрографа, основанного на этом принципе. В подобных устройствах кристалл располагается в вертикальной плоскости, и его фокусирующее действие сводится к уменьшению высоты отраженного от кристалла рефлекса. Таким образом, полная энергия отраженных лучей, распределяющаяся при отражении от плоского кристалла (в методе Брэгга) на длине, равной высоте отражающего участка кристалла, в нашем случае распределяется на линии значительно меньшей длины. За счет такого уменьшения высоты рефлекса можно, теоретически говоря, получить бесконечно большой выигрыш в интенсивности. Эта колоссальная светосила, не зависящая от радиуса кривизны кристалла, отражающего лучи, позволяет применять очень большие расстояния между щелью, кристаллом и фотопленкой, так что практически ширина линии в фокусе становится не зависящей от глубины проникновения X-лучей в кристалл. С другой стороны, это позволяет довести разрешающую силу спектрографа до величины, сравнимой с величиной $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ для двойного

кристалл - спектрографа. Как показал Баковский¹⁰, в случае фокусировки по этому методу величина несовершенства кристалла, употребляемого в качестве отражателя, практически не сказывается. Все изложенное делает этот метод весьма многообещающим и особенно пригодным для измерения таких эффектов, в которых независимость ширины линий от побочных и трудно учитываемых влияний геометрических факторов и фактора несовершенства кристалла особенно желательна.

Как показал Кунцель, характерной особенностью геометрических условий фокусировки X-лучей в таком спектрографе является то, что радиус кривизны цилиндрической поверхности, осуществляющей фокусировку (ρ), связанный с радиусом спектрографа (R) и углом падения θ соотношением $\rho = R \sin \theta$, оказывается различным при работе в различных интервалах длин волн, соответствующих разным θ . Кунцель изгибал слюдяные пластинки между болванками, изогнутыми по определенному радиусу. Тогда же им было показано, что удовлетворительные результаты можно было получить лишь в области углов, отличающихся от расчетного θ на величины $\pm 2^\circ$. Это существенное неудобство метода было преодолено последовательно в двух работах Далежейека и Таерля⁹, построивших спектрограф (рис. 6), в котором радиус кривизны пластинки слюды, служащей отражателем X-лучей, менялся. Кристалл зажимался между двумя тонкими эластичными пластинками из стали так, что во время движения вокруг оси спектрографа специальный механизм изгибал непрерывно пластины, приводя радиус кривизны кристалла в соответствие с углом падения на него X-лучей. Равномерность изгиба супорта с кристаллом достигалась тем, что держателю кристалла придавалась такая форма, чтобы его момент инерции по отношению к центральной оси и изгибаю-

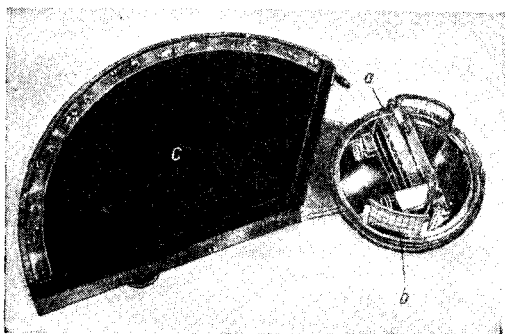


Рис. 5. Фотография универсального спектрографа Ингельштама

а — кристаллодержатель с кристаллом, *б* — флуоресцирующий экран, *с* — кассета с фотопленкой

ший момент в формуле $\rho = \frac{E \cdot J}{M}$ менялись бы одинаково, т. е. линейно от одного конца супорта к другому. Поэтому пластинкам супорта придавалась форма треугольника. Усилие на супорт передавалось системой шестеренок. Небольшие отступления от расчетного радиуса кривизны, соответствующего различным θ , не превышали 1,5% и не оказывали существенного влияния на ширину линий. Исходя из измерений ширины спектральных

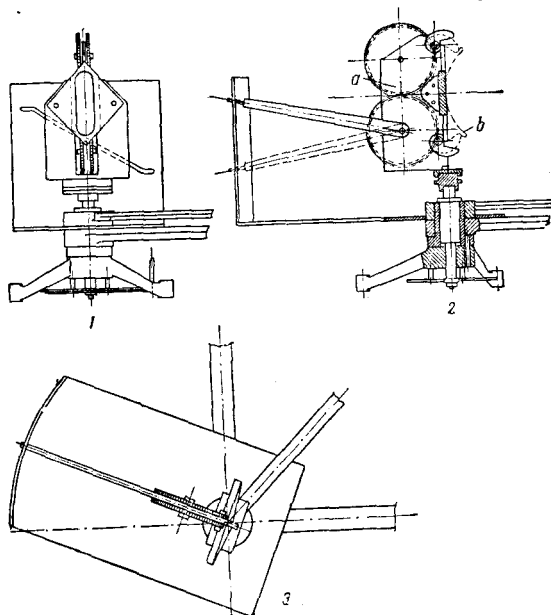


Рис. 6. Спектрограф Далеяжека и Таерля

1—вид спереди, 2—вид сбоку (*a*—механизм для непрерывного изгибания кристалла, *b*—кристалла), 3—вид сверху

линий *K*-серии Мо, авторы оценивают $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ всего спектрографа величиной 2700, что по порядку не отличается от разрешающей способности существующих дубль-кристалл-спектрографов.

Спектрографы со «сферическим кристаллом»

В предыдущих параграфах разбираются современные светосильные спектрографы с цилиндрически-изогнутым кристаллом, по-разному ориентированным по отношению к расходящемуся пучку рентгеновских лучей, исходящих из антикатада трубки. При этом при отражении от плоскостей, перпендикулярных к оси цилиндра, удается показать, что все излучение определенной длины волны, падающее при отсутствии щели на поверхность кристалла под углом Брэгга, фокусируется в узкую полосу на фокальном круге, радиус которого вдвое меньше радиуса кривизны кристалла. Так как монохроматическое излучение, падающее на края и среднюю точку кристалла, не фокусируется в одну точку на круге, то минимальная ширина линии задается геометрическими размерами спектрографа. С другой стороны, известные преимущества имеет щелевой метод вертикальной фокусировки, в котором выигрыш в интенсивности получается за счет сведения в точку (в пределе) лучей, падающих на кристалл и расходящихся в вертикальной плоскости. Здесь ширина линии определяется шириной щели

спектрографа. В последнее время была сделана попытка создания спектрографа, отражающая поверхность которого представляла бы собой сферу. Это позволило бы в известном смысле объединить два вышеуказанных принципа получения спектрографов с большой светосилой. Проводя геометрические подсчеты аналогично тем, которые делал Иоган, в нашем случае применительно к произвольному сечению, можно получить, что относительный выигрыш в интенсивности в спектрографе со сферическим кристаллом, получающийся за счет более рационального использования лучей,

расходящихся в вертикальной плоскости, выражается формулой $J = \frac{J_0}{\cos^2 \theta}$,

где J_0 — интенсивность в методе Иогана и θ — угол Брэгга. Как и следовало ожидать, при малых длинах волн преимущества сферического кристалла практически ничтожны. Зато при больших λ и, следовательно, при θ , приближающихся к 90° , следует считаться с добавочным выигрышем интенсивности в спектрографах со сферическим кристаллом. Вместе с тем здесь, как и в уже разобранном ранее случае вертикальной фокусировки, радиус кривизны ρ зависит от угла Брэгга так, что, комбинируя эту зависимость с формулой Брэгга, получаем

$$\rho = \frac{2da}{n\lambda},$$

где a — длина плеча от источника до кристалла, d — постоянная решетки. Таким образом, при постоянных геометрических условиях съемки радиус кривизны кристалла меняется обратно пропорционально используемой длине волны. Затруднения при изгибании кристаллов согласно требованиям метода привели к необходимости создания искусственных отражающих систем путем нанесения на сферическую поверхность линз равномерных многоатомных слоев различных органических веществ. Пользуясь теоретическими указаниями Лэнгмюра, Адама и др., К. Блодгетт¹¹ разработала технологию процесса отложения последовательных мономолекулярных слоев на твердой поверхности стекла. В последних работах указанных авторов показано, что число слоев может быть в известных условиях доведено до 200—300. Мономолекулярная пленка образуется на стекле нанесением небольшого количества стеариновой кислоты, разбавленной в бензине, на чистую поверхность воды, содержащей соли Са. Стеариновая кислота, быстро образующая тонкую поверхностную пленку, в дальнейшем оседает на стекле, введенном осторожно в ванну. Скорость прилипания пленки к стеклу зависит от кислотности среды (его pH), концентрации ионов Са и температуры воды, на поверхности которой образуется пленка. Лэнгмюром было показано, что молекулы жирных кислот имеют тенденцию ориентироваться под некоторым углом к поверхности твердых тел, на которые они оседают, так что группа — COOH оказывается ориентированной в сторону раствора. В случае соединения Са со стеариновой кислотой подобный «частокол» у поверхности стекла образуют молекулы $(\text{COO})_2\text{Ca}$ и покрывающие их с внешней стороны группы CH_3 . При соблюдении известных предосторожностей авторам удавалось осадить на стекле в правильном порядке последовательные молекулярные слои, создавая таким образом подобие пространственной решетки с постоянной решетки (по данным Бернштейна) порядка 50 Å. Толщина слоя измерялась интерферометром. Детали методики и некоторые новые рецепты обсуждены в статьях К. Блодгетт¹¹, С. Бернштейна¹² и С. Андриуса¹³.

В настоящий момент весьма затруднительно еще оценить возможности и области применения спектрографов описанной конструкции. Недостаточно детально разработанная и еще весьма сложная методика получения кристаллов наряду с некоторыми принципиальными трудностями метода (например, зависимость ρ от θ) делают их пока мало пригодными для решения практических задач. Однако, их использование даже сейчас оправдано в области лучей, длина волн которых превосходит 20 Å.

Э. Е. Вайнштейн, Москва

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Вайнштейн, Д. Гогоберидзе, М. Флерова, ЖЭТФ, **10**, 350, 1940; Э. Вайнштейн, Успехи физич. наук, **23**, 78, 1940.
2. Махалов, Журнал технич. физики, **4**, 895, 1934; Боровский, Заводская лаборатория, № 2, 1938.
3. Борисов и Фогель, Журнал технич. физики, **7**, 165, 1937.
4. Fankuchen, Nature, **139**, 193, 1937.
5. Д. Гогоберидзе, Журнал технич. физики, **9**, 2049, 1940.
6. B. B. Watson, Rev. Sci. Instr., **8**, 480, 1937; S. T. Stephenson, Rev. Sci. Instr., **10**, 45, 1939; Э. Вайнштейн, Д. Гогоберидзе и М. Флерова, ЖЭТФ, **10**, 350, 1940.
7. E. Ingelstam, Rev. Sci. Instr., **11**, 160, 1940.
8. V. Kunzel, C. R., **201**, 656, 1935.
9. { V. Dalejsek et M. Tayerle, C. R., **205**, 605, 1937;
 { V. Dalejsek et M. Tayerle, J. Phys. et Rad., **9**, 465, 1938.
10. J. Bäckovsky, J. Phys. et Rad., **9**, 471, 1938.
11. K. Blodgett, J. Am. Chem. Soc., **57**, 1007, 1935; K. Blodgett and J. Langmur, Phys. Rev., **51**, 964, 1937.
12. S. Bernstein, J. Am. Chem. Soc., **60**, 1511, 1938.
13. C. L. Andrews, Rev. Sci. Instr., **11**, 111, 1940.