

Д.64

28

АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

препринт 175

Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко

**Техника исследования мягкого
рентгеновского излучения плазмы**

Новосибирск
1967

Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко

ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается принцип работы брэгговского спектрометра с разложением в спектр по методу Соллера. Обсуждаются разрешающая способность, угловая дисперсия и особенности коллиматоров Соллера. Приводится сравнение брэгговского спектрометра с решеточным; показано, что последний уступает брэгговскому спектрометру в светосиле при одинаковой разрешающей способности. Описываются разработанные и испытанные спектрометры мягкого рентгеновского излучения; особенности работы их элементов; методы юстировки; метод определения отражательной способности кристаллов.



§ I. Брэгговские спектрометры.

Применение брэгговских спектрометров для исследования мягкого рентгеновского излучения плазмы удобно ввиду относительной простоты их конструкции, высоких оптических качеств и большой светосилы при использовании разложения рентгеновских лучей в спектр по методу Соллера /1/.

Разложение рентгеновских лучей в спектр с помощью кристалла, применяемое в брэгговском спектрометре, описывается уравнением Вульфа-Брэггов. Коллиматор Соллера позволяет выделить пучок лучей, заключенных в узком угловом интервале. Если в качестве диспергирующего элемента используется монокристалл, необходим только один коллиматор, расположенный либо между источником излучения и кристаллом для задания определенного брэгговского угла (угла скольжения по отношению к поверхности кристалла) рентгеновскому пучку, либо между кристаллом и детектором - для выделения дифрагированного монохроматического пучка. Оба расположения коллиматора равноценны, и выбор какого-либо из них диктуется удобством. При использовании поликристалла - мозаики из мелких монокристаллов - необходимы два коллиматора - перед и за кристаллом.

Коллиматор Соллера представляет собой либо набор плоско-параллельных пластин со строго одинаковыми зазорами между ними, либо набор расположенных параллельно друг другу трубок одинакового диаметра. Пластинчатый коллиматор /2/, /3/, /4/, /5/, /6/ проще трубчатого /5/, /7/, /8/, позволяет получать более высокие разрешения при одинаковой светосиле и не требует при настройке спектрометра регулировки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Разрешающая способность брэгговского спектрометра находится из уравнения Вульфа-Брэггов:

$$R = \frac{\frac{2d \sin \vartheta}{n}}{\frac{2d \cos \vartheta \Delta \vartheta}{n}} = \frac{\operatorname{tg} \vartheta}{\Delta \vartheta} = \frac{1}{\Delta \vartheta \sqrt{\frac{4d^2}{n^2 \lambda^2} - 1}},$$

где d - постоянная решетки кристалла - монохроматора; ϑ - брэгговский угол; $\Delta \vartheta$ - угловой раствор коллиматора Соллера; n - порядок спектра; λ - длина волны. Например, при регистрации линии

$OK_{d_{1,2}}$ ($\lambda = 23,6 \text{ \AA}$) с помощью кристалла кислой калиевой соли фталевой кислоты (КАР) с постоянной решетки $d = 13,3 \text{ \AA}$ /3/, /4/, /9/, /10/, /11/, /12/ разрешающая сила:

$$R = \frac{1,94}{\Delta\vartheta},$$

что при использовании коллиматора с угловым раствором $5'$ дает $R = 1340$.

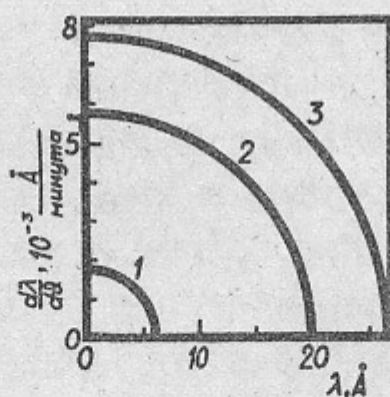


Рис. I.

Обратная угловая дисперсия брэгговского спектрометра при $n = 1$ — кальцит ($d = 3,029 \text{ \AA}$); 2 — слюда ($d = 9,95 \text{ \AA}$); 3 — КАР ($d = 13,3 \text{ \AA}$).

Обратная угловая дисперсия прибора равна:

$$\frac{d\lambda}{d\vartheta} = \lambda \sqrt{\frac{4d^2}{n^2\lambda^2} - 1}.$$

Из рис. I видно, что брэгговские спектрометры выгодно характеризуются небольшой обратной угловой дисперсией.

Рассмотрим дифракционную ширину кристалла, которая в конечном счете определяет разрешающую способность брэгговского

спектрометра. Дифракционная ширина определяется числом атомных плоскостей кристалла, участвующих в образовании спектра. Чем больше λ , тем для данного кристалла больше брэгговский угол, то-есть (рис.2) тем меньше число отражающих плоскостей N , так как с ростом λ величина глубины проникновения луча в кристалл

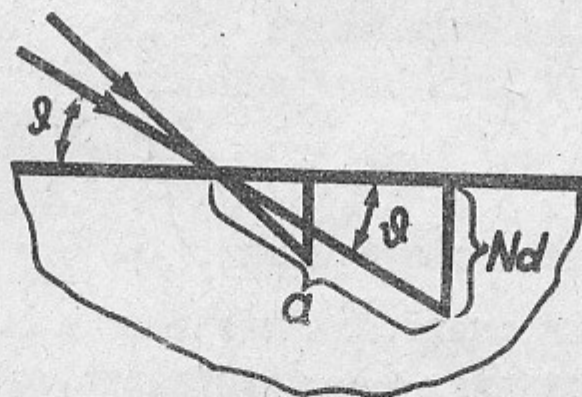


Рис.2.

a падает за счет фотоионизационного поглощения. Рост величины $\sin \theta$ при возрастании λ оказывается более слабым, чем уменьшение a . Как известно, теоретическая разрешающая сила дифракционной решетки:

$$R_{\text{теор}} = Nn, |13|$$

где N - число штрихов на рабочей поверхности решетки. Отсюда следует увеличение дифракционной ширины кристалла с ростом λ , так как $N = a \sin \theta / d$. Например, дифракционная ширина берилла ($d = 7,98 \text{ \AA}$), измеренная на двойном кристалл-спектрометре, составляет для линии $\text{Cu K}_{\alpha 1}$ ($1,54 \text{ \AA}$) $40''$ |2|, а для $\lambda \approx 13 \text{ \AA}$ - $5'$ |3|; дифракционная ширина кристалла КАР составляет несколько минут для $\lambda \sim 15 \text{ \AA}$.

Аппаратурное разрешение брэгговского спектрометра с коллиматором Соллера, определяемое угловым раствором коллиматора и

дифракционной шириной кристалла, может быть определено по методу, описанному в работе /3/.

§ 2. Сравнение брэгговского спектрометра с решеточным.

Установка косоугольного падения вогнутой дифракционной решетки — единственная установка для рентгеновской области спектра. Только она обеспечивает малые углы скольжения, необходимые для того, чтобы имело место явление полного внешнего отражения от материала решетки для самой жесткой части λ_{min} разлагаемого в спектр излучения. Необходимый угол скольжения:

$$\varphi_n \approx 10^5 \lambda_{min} \sqrt{2\rho} \quad |14|, |15|$$

где ρ — плотность вещества решетки.

Верхняя граница спектрального интервала, в котором применимы брэгговские кристаллы, приблизительно равна 100Å (самое большое из известных межплоскостное расстояние — $d = 64,2\text{Å}$ — у псевдокристалла *ML* /9/). Нанесение золота (толщина $300 - 1000\text{Å}$) или титана на стеклянные решетки позволяет получить более высокие коэффициенты отражения при тех же углах скольжения и избавиться от искажения спектров краями поглощения стекла /16/, /17/, /18/. Золочение решетки расширяет область спектра до 15Å при угле скольжения $5^{\circ}30'$ /17/. Так как имеются данные о коэффициенте отражения и эшелеттов лишь для $\lambda \geq 23,6\text{Å}$ золоченых решеток /16/, то есть смысл сравнивать золоченый эшелетт и один из длинноволновых кристаллов (например, псевдокристалл стеарата свинца с $2d \approx 99\text{Å}$ /19/) в интервале $23,6 + 99\text{Å}$. Пусть в брэгговском спектрометре используется коллиматор Соллера с угловым раствором $\Delta\vartheta = 2'$. Меньшие угловые растворы, вероятно, не нужны из-за больших дифракционных ширин кристаллов. При этом разрешающая сила прибора равна:

$$R = \frac{1720}{\sqrt{\frac{9800}{\lambda^2} - 1}}, \quad [\lambda] = \text{Å}, \quad n = 1.$$

Пусть сечение коллиматора и размеры кристалла — $4 \times 4 \text{ см}^2$. Положим, что толщина пластин коллиматора — $0,01 \text{ см}$ и что исследуемый

объект перекрывает телесный угол коллиматора. Число квантов, соответствующих данной длине волны, попадающих в I сек на детектор, равно:

$$N_k \approx B_\lambda (bh_1 n_1) \frac{bh_1}{L^2} \sin \vartheta \Gamma_{k\lambda},$$

где $B_\lambda, \frac{I}{\text{сек.см}^2 \cdot \text{стерад}}$ - число квантов с энергией hc/λ , испускаемых I см² объекта в I сек в телесном угле I стерад; b - ширина щели коллиматора; h_1 - высота щели коллиматора; n_1 - число щелей коллиматора; h - длина коллиматора; $\Gamma_{k\lambda}$ - отражательная способность кристалла по отношению к данной λ . Положим:

$$\Delta \vartheta \approx \frac{2b}{h} \sqrt{20} \quad \text{и} \quad h = 20 \text{ см.}$$

Тогда $b = 0,0058$ см и $n_1 = 254$. $h_1 = 4$ см.

$$N_k \approx 0,25 B_\lambda \Delta \vartheta^2 h_1^2 n_1 \sin \vartheta \Gamma_{k\lambda} \approx 3,4 \cdot 10^{-4} B_\lambda \sin \vartheta \Gamma_{k\lambda}.$$

На основании данных работ /4/ и /19/ для стеарата свинца имеем:

$\Gamma_{k8,3\text{Å}} = 2,7\%$ и $\Gamma_{k11,9\text{Å}} = 6,4\%$. Для всех кристаллов отражательная способность растет с увеличением λ , испытывая скачки вниз в областях краев поглощения элементов, входящих в вещество кристалла. Пренебрежем ростом $\Gamma_{k\lambda}$ и скачками поглощения, положив повсюду $\Gamma_{k\lambda} \approx 0,06$. Тогда:

$$N_k \approx 2 \cdot 10^{-5} B_\lambda \sin \vartheta.$$

Перейдем к вогнутой решетке в схеме косого падения. Пусть это будет золоченый эшелетт с постоянной решетки $d_p = 1,67 \cdot 10^{-4}$ см (600 штрихов/мм), установленный под углом падения $\alpha = 85^\circ$ (угол скольжения 5°), имеющий коэффициент отражения $\Gamma_{p\lambda} = 10\%$ /16/, не зависящий от λ . Допустим, радиус кривизны эшелетта $\rho = 100$ см. Выберем входную щель прибора S такой, чтобы оба прибора - кристалльный и решеточный - обладали одинаковой разрешающей способностью. Выходная щель - перед детектором - устанавливается перпендикулярно дифрагированному лучу; в этом случае линейная дисперсия равна:

$$D_e = \frac{\rho}{d_p} \sqrt{21}$$

Решетка не дает линейного увеличения в плоскости круга Роуланда; поэтому разрешающая способность при ширине щели S равна:

$$R = \frac{\lambda}{s/d_e} = \frac{\lambda n \rho}{s d_p}$$

В первом порядке:

$$s = \frac{\lambda \rho}{R_p d_p}$$

Положим, $R_p = 2500$ при $\lambda = 80 \text{ \AA}$. Тогда:
 $s \approx 2 \text{ мк.}$

Число квантов с энергией hc/λ , попадающих в I сек на детектор, равно:

$$\mathcal{N}_p = B_\lambda (sh_2) \frac{ac \cos \alpha}{\rho^2 \cos^2 \alpha} \Gamma_{p\lambda} = B_\lambda (sh_2) \frac{ac}{\rho^2 \cos \alpha} \Gamma_{p\lambda},$$

где h_2 - высота входной щели; a и c - высота и ширина решетки соответственно. Не принимая в расчет астигматизма решетки, накладывающего ограничение на величину h_2 , и aberrации, ограничивающей рабочую ширину решетки, примем: $h_2 = 2 \text{ см}$, $a = c = 4 \text{ см}$.

$$\mathcal{N}_p = 7,34 \cdot 10^{-7} B_\lambda$$

Сравнение \mathcal{N}_p с \mathcal{N}_k показывает неоспоримое преимущество брегговского спектрометра в светосиле. Решеточный спектрометр может иметь преимущество в случае исследования точечных источников ультрамягкого рентгеновского излучения (например, плазма, созданная лазерным лучом на мишени).

§ 3. Описание приборов.

I. Рентгеновский спектрометр с вынесенным детектором^{/5/}. Это первый из выполненных нами монохроматоров, подобный описанным в работах /2/, /3/ и /22/ (рис.3). Мертвые углы между окнами не позволяют непрерывно регистрировать весь спектр. Имеется вторая камера, окна которой расположены между окнами первой. В этом спектрометре использовались трубчатый коллиматор с угловым раствором $\Delta \vartheta = 30,6'$ (рис.4 и 5) и пластинчатый коллиматор, имеющий $\Delta \vartheta = 7,65'$ (рис.6,7,8,9).

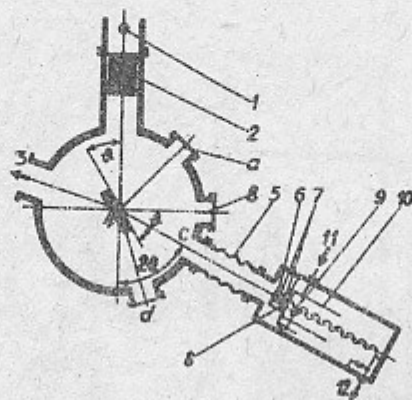


Рис. 3.

1 - источник излучения; 2 - коллиматор Соллера; 3 - вакуумная откачка; а, в, с и d - окна для присоединения детектора; 4 - кристалл; 5 - сильфон для изменения двойного брэгговского угла; 6 - фильтр; 7 - конденсатор из двух пластин /23/; 8 - сетка для выпрямления эквипотенциалей в окне перед фотока - тодом 9 электронного умножителя; 10 - экран; 11 - питание дели - теля ВЭУ; 12 - сигнальный выход.

2. Источник монохроматического мягкого рентгеновского излучения. Прибор был выполнен для измерений квантовых выходов фотокатодов, пропускания фильтров и отражательной способности кристаллов. Он представляет собой спектрометр с подвижной рентгеновской трубкой в качестве источника излучения; детектор - любой - неподвижен (рис. 10). Катод имеет потенциал земли; анти - катод, на который подается высокий положительный потенциал, не охлаждается; тем не менее прибор способен работать непрерывно, если в качестве насадок на антикатоде - источников характерис - тического излучения - не используются легко испаряющиеся метал - лы типа Al , Ag и т.д.. Пары этих металлов выводят из строя электронный умножитель. Здесь использовались пластинчатые кол - лиматоры (рис. 11, 12 и 13).

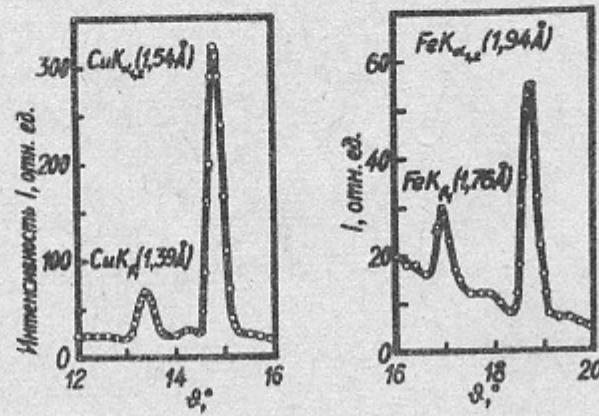


Рис. 4.

Детектором служил счетчик Гейгера типа МСТР-4.
Кальцит. Фильтр - *Be* 0,3 мм.

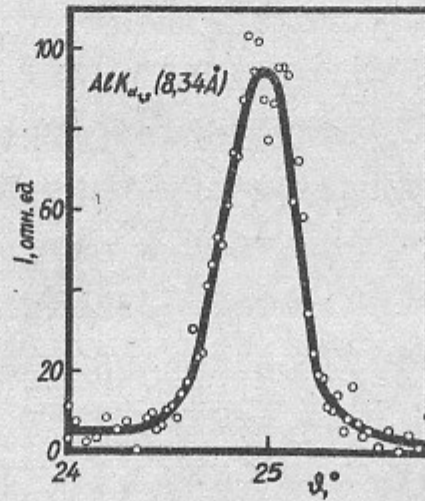


Рис. 5.

Слюда. Фильтр - *Al* II мк.

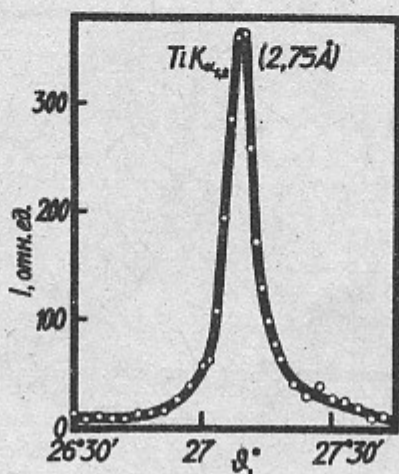


Рис.6.

Кальцит. Фильтр - *Be* 0,1 мм.

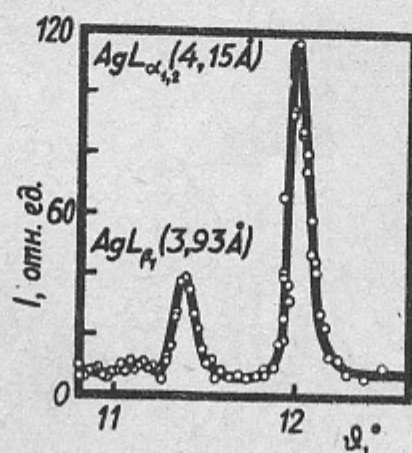


Рис.7.

Слюда. Фильтр - *Be* 0,1 мм.

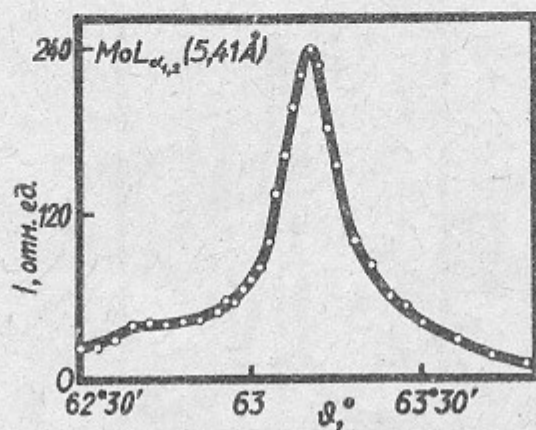


Рис. 8.
Кальцит. Фильтр - *Be* 0,1 мм.

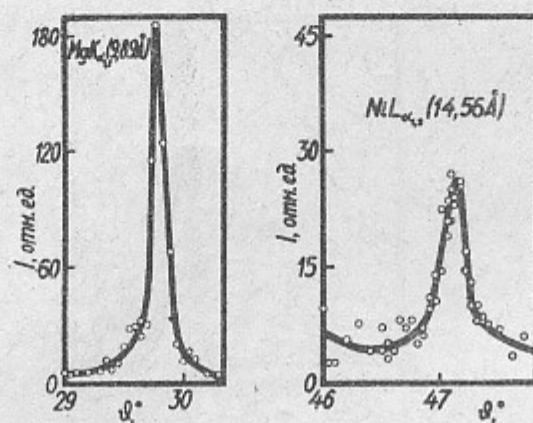


Рис. 9.
Слюда. Фильтр - четырехслойная нитроцеллюлоза.

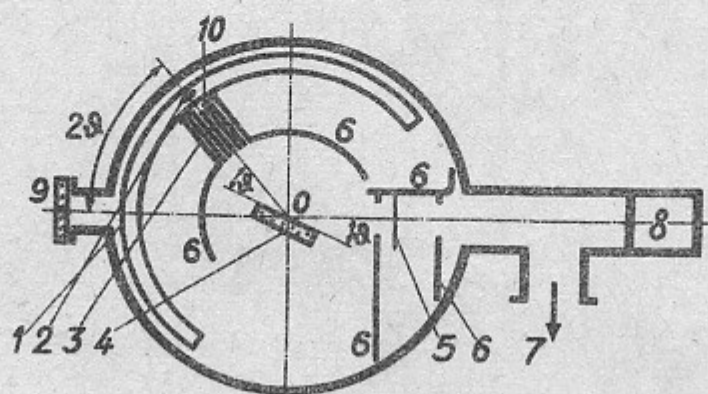


Рис.10.

1 - *Сu* - антикатод, введенный в камеру через изолятор в днище; 2 - фокусное пятно рентгеновской трубки, катод которой вместе с коллиматором 3 вращается вокруг оси 0, питание накала трубки вводится через крышку камеры; 4 - кристалл; 5 - фильтр; 6 - перегородки, исключая попадание рассеянного излучения на детектор; 7 - вакуумная откачка; 8 - детектор (счетчик, ВЭУ); 9 - смотровое окно; 10 - диафрагма.

3. Спектрометр с ВЭУ, помещенным внутрь камеры (рис.14). Этот прибор, как и источник монохроматического излучения, имеет шкалу 2ϑ на 360° и шкалу ϑ на 180° , а также кристаллодержатель-шаблон, позволяющий использовать прибор для определения отражательных способностей кристаллов. Ввод питания делителя ВЭУ и вывод сигнала осуществлены через крышку камеры. На рис.15 изображены линии серебра, снятые при настройке прибора с помощью рентгеновской трубки.

4. Спектрометр для исследования рентгеновского излучения плазмы. Прибор представляет собой модификацию (рис.16) пре-

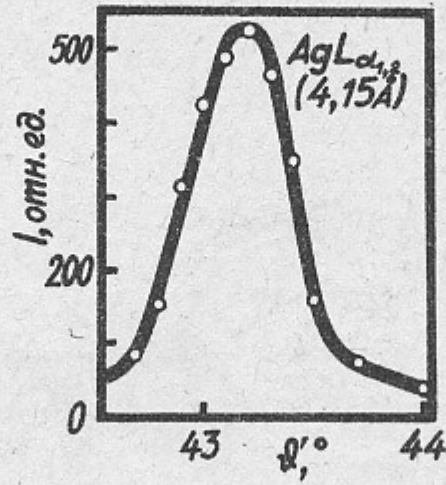


Рис. II.

Кальцит. Фильтр - Be 0,1 мм. Детектор-счетчик МСТР-4.
 $\vartheta' = \vartheta - 0^{\circ}06'$.

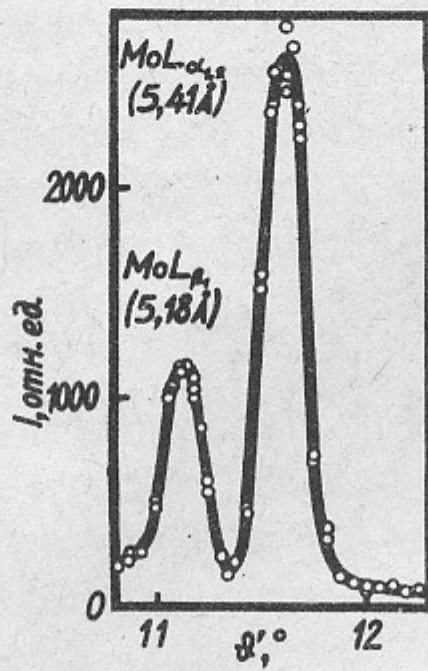


Рис. I2.

КАР. Фильтр - Be 0,1 мм.
 $\vartheta' = \vartheta - 0^{\circ}06'$.

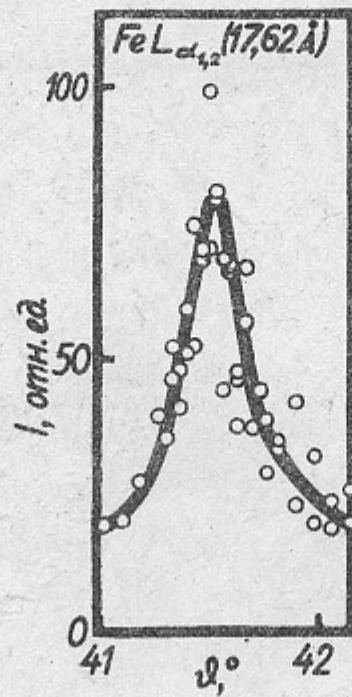


Рис.13.

КАР. Фильтр - трехслойная нитроцеллюлоза.

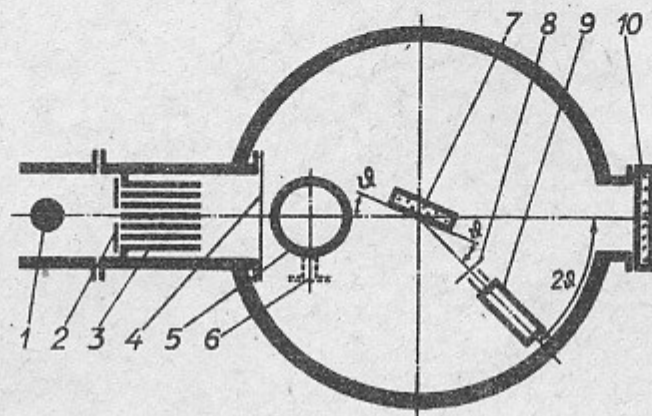


Рис.14.

1 - источник излучения; 2 - диафрагма; 3 - коллиматор Соллера; 4 - фильтр-перегородка; 5 - вакуумная откачка; 6 - напускатель воздуха; 7 - кристалл; 8 - фильтр; 9 - ВЭУ с конденсатором перед фотокатодом; 10 - смотровое окно.

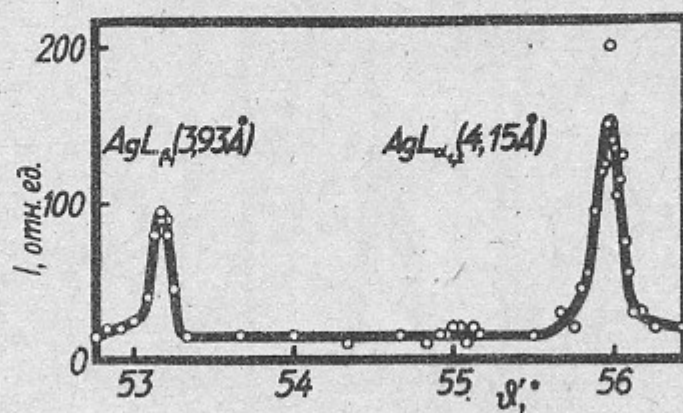


Рис.15. Кальцит. Фильтр - Be 0,1мм. $\vartheta' = \vartheta + 12^{\circ}40'$.

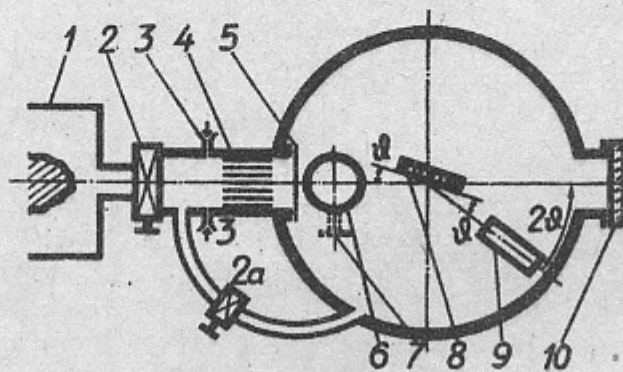


Рис.16. 1 - плазменная установка; 2, 2а - вакуумные клапаны; 3 - натекатели для напуска рабочего и примесного газов для создания плазмы /24/; 4 - коллиматор Соллера; 5-фильтр-перегородка; 6-вакуумная откачка; 7-напуска - тель воздуха; 8-кристалл; 9-ВЭУ с фильтром и конденса- тором перед фотокатодом; 10-смотровое окно.

дыдущего, выполненную после проведения предварительного плазменного эксперимента. На рис. I7 показаны линии меди, снятые при настройке прибора с рентгеновской трубкой.

5. Универсальный спектрометр. Столик с кристаллодержателем может заменяться устройством для крепления плоской дифракционной решетки. Имеется, кроме входного, выходной коллиматор Соллера, вращающийся вместе с детектором (ВЗУ). В качестве поворотно-отсчетного устройства используется гониометр ГУР-2.

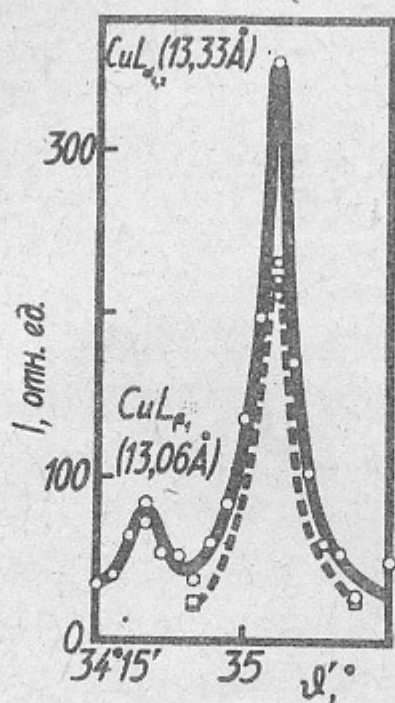


Рис. I7.

КАР. Фильтр - пятислойная нитроцеллюлоза (штриховая линия - с напыленным на пленку Al). $2\theta' = 2\theta + 5^{\circ}05'$.

§ 4. Описание и особенности некоторых элементов приборов.

1. Кристалл. Описание кристаллов вообще можно найти в монографиях /14/ и /20/. Новые данные о длинноволновых кристаллах, кроме кристалла КАР, библиографию о котором мы привели ранее, имеются в статьях /9/, /12/, /19/, /25/, /26/.

2. Фильтр. Используется для выделения определенной линии или спектрального интервала, для повышения контрастности линий из-за наличия более мягкого фонового излучения, обязанного: а) рассеянию излучения на элементах конструкции прибора; б) отражению ультрафиолета от кристалла по законам оптики и в) полному внешнему отражению ультрамягкого рентгеновского излучения от кристалла при малых брэгговских углах /23/. Мы не будем здесь приводить обширную библиографию по фильтрам, их пропусканию и изготовлению. Укажем лишь на данные по коэффициенту поглощения нитроцеллюлозы в области $8 \div 410\text{Å}$ /27/ и на применение для фильтрации полного внешнего отражения /28/.

3. Фильтр-перегородка. Выяснилось, что плазма из исследуемой установки проникает через коллиматор в объем спектрометра, заполняя его и регистрируясь ВЭУ. Отсюда вытекает необходимость фильтра-перегородки. Его роль в наших приборах играет трехслойная нитроцеллюлозная пленка. Однако оказывается, что при этом ВЭУ, будучи чувствительным к излучению с $\lambda \approx 2000\text{Å}$ (*Pt* - фотокатод), дает очень большой сигнал, растущий по мере уменьшения брэгговского угла, причем с помощью кристалла КАР не удалось выделить структуру этого излучения. Замена нитроцеллюлозного фильтра фтористым литием дала снижение интегрального сигнала ВЭУ (при $2\vartheta = \vartheta = 0^\circ$) приблизительно в 50 раз. Отсюда следует, что основным был вклад в излучение мягкого рентгеновского излучения и ультрафиолета с $\lambda \approx 1200\text{Å}$. Для фильтрации этого излучения на трехслойную нитроцеллюлозную пленку был напылен слой $Al \sim 0,5 \text{ мк}$ (рис. 17). Нитроцеллюлозная пленка выдерживает перепад давлений, соответствующий 10^{-1} мм Hg в плазменной установке и 10^{-5} мм Hg в приборе.

Известно, что в плазменных установках постепенно выгорают всякого рода тонкие пленки (типа фильтра-перегородки) или на них осаждаются примеси плазмы. Поэтому коллиматор, стоящий меж-

ду плазмой и фильтром-перегородкой, играет роль дросселя, предохраняющего этот фильтр от выгорания и загрязнения.

4. Вторично-электронный умножитель типа ВЭУ-0Т-8М с диодами из бериллиевой бронзы /23/, /29/, /30/, /31/. В качестве фотокатодов в наших приборах используются Та, Pt и W. Данные по квантовым выходам различных фотокатодов в мягкой и ультрамягкой рентгеновской областях приведены в работах /23/, /30/, /31/, /32/. Здесь следует остановиться на явлении усталости ВЭУ. На фотокатод умножителя направлялся пучок интегрального излучения рентгеновской трубки, которая до этого тренировалась в течение нескольких часов для того, чтобы процесс провисания вольфрамовой спирали катода закончился; это обеспечивало постоянство интенсивности излучения. На рис.18 изображена зависимость счета импульсов от времени t между моментом подачи напряжения на делитель умножителя и моментом включения пересчетного прибора. Счет производился в течение 10 сек. Оказалось, что при этом не имеет значения, падало на фотокатод ВЭУ излучение до момента включения пересчетного прибора или нет. Из рис.18 видно, что максимальная чувствительность ВЭУ имеет место при $t \approx 20$ сек. Она восстанавливается после 13 + 15 минут отдыха, если t составляет несколь-

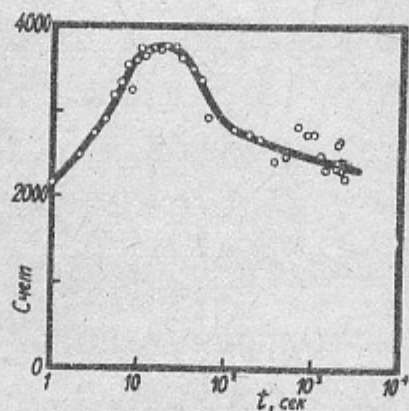


Рис.18.

ко десятков минут. Время отдыха тем меньше, чем меньше t . При $t = 30$ сек максимальная чувствительность умножителя восстанавливается через 1,5 - 2 минуты.

5. При откачке прибора открытый клапан 2а (рис.16) обеспечивает целостность фильтра-перегородки. При плазменных исследованиях клапан 2а закрыт, а клапан 2 открыт.

§ 5. Методы настройки приборов.

1. Оптическая настройка рентгеновского спектрометра с вынесенным детектором (§ 3-1). С помощью уровня ось вращения столика с кристаллодержателем устанавливается вертикально с точностью $\pm 0,5'$; затем столик устанавливается горизонтально с точностью $\pm 1'$ под брэгговским углом $\vartheta = 90^{\circ}00'$. На столик помещается стеклянная призма с углом $90^{\circ} \pm 0^{\circ}00'20''$ так, чтобы одна из граней, образующих прямой угол, лежала на столике, а другая была обращена к входному патрубку прибора. Перед этим патрубком устанавливается автоколлиматор. Регулируя последний, добиваются помещения отраженного от вертикальной грани призмы креста в центре светового поля автоколлиматора. Затем во входной патрубок помещается коллиматор Соллера, и его положение регулируется так, чтобы через него в автоколлиматоре был виден отраженный от призмы крест. Вместо призмы на столик помещается кристаллодержатель с алюминированной стеклянной пластинкой вместо кристалла; положение столика регулируется так, чтобы снова был виден в автоколлиматоре крест - теперь уже отраженный от пластинки; кристаллодержатель закрепляется. Теперь достаточно, заменив кристаллом пластинку, при работающей рентгеновской трубке просканировать детектор в области угла 2ϑ , соответствующего определенной спектральной линии; эта операция позволит определить нуль шкалы 2ϑ .

2. Юстировка с помощью рентгеновского излучения трубки. Этот метод хорошо известен и состоит из определения нуля шкалы 2ϑ в первую очередь; нуль шкалы ϑ определяется по рентгеновской линии.

3. Определение отражательной способности кристалла с помощью источника монохроматического излучения (§3-2). В этом приборе параллельная установка двух одинаковых кристаллов - крист -

талла-монохроматора и исследуемого кристалла - осуществлялась на кристаллодержателе-шаблоне (рис.19).

Последовательность юстировки источника монохроматического рентгеновского излучения в режиме двухкристального спектрометра была следующей. Коллиматор Соллера и рабочая плоскость кристалла-монохроматора устанавливались параллельно оси Z , на которой находится фотокатод электронного умножителя. Такая установка производилась с помощью собственного рентгеновского излучения прибора (рис.19а). Таким образом, становился известным нуль отсчета двойного брэгговского угла 2ϑ . Затем коллиматор Соллера устанавливался под углом 2ϑ к оси Z , соответствующим рентгеновской линии, на длине волны которой определялась отражательная способность кристалла (рис.19б), и вращением кристалла-монохроматора (вместе с кристаллодержателем-шаблоном) вокруг оси O отыскивалась данная рентгеновская линия. Следовательно, становился известным и нуль отсчета брэгговского угла ϑ . После этого с кристаллодержателя-шаблона снимался кристалл-монохроматор и устанавливался исследуемый кристалл (рис.19в), который разворачивался

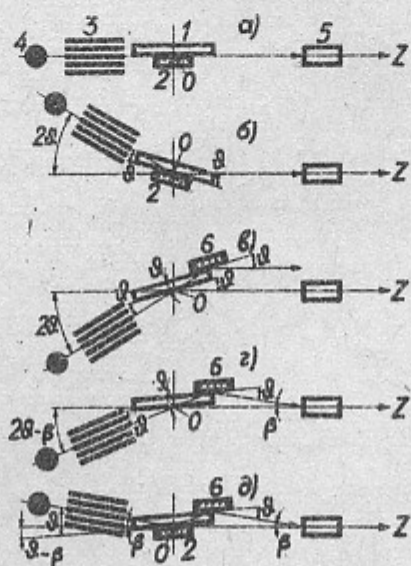


Рис.19. 1 - кристаллодержатель-шаблон; 2-кристалл-монохроматор; 3 - коллиматор Соллера; 4-фокусное пятно рентгеновской трубки; 5-электронный умножитель; 6-исследуемый кристалл.

против часовой стрелки на угол 2ϑ ; коллиматор разворачивался на угол 4ϑ в ту же сторону (рис. I9в). Но при этом линия не регистрируется детектором, так как рентгеновский луч не попадает на него. Малыми одинаковыми перемещениями по углу коллиматора и исследуемого кристалла по часовой стрелке отыскивается рассматриваемая линия (рис. I9г). Наконец, на шаблон ставился снова кристалл-монохроматор (рис. I9д), а коллиматор поворачивался по часовой стрелке на угол 2ϑ ; теперь детектор регистрировал дважды отраженную от кристаллов линию.

В заключение авторы благодарят В.А.Трапезникова за присланные рекомендации по рентгеноспектроскопии и образцы исландского шпата, когда начиналась работа над данной темой; А.Б.Гильварга и Г.С.Беликову за выращивание кристаллов КАР и В.А.Ушакова за помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

11/ W. Soller, A New Precision X-Ray Spectrometer, *Phys. Rev.* 24, 158-167 (1924).

12/ F. L. Ribe, G. A. Sawyer, and T. F. Stratton, X-Ray Spectroscopic Measurements of High-Temperature Plasma, Fifth Inter. Conf. on Ion. Phen. in Gases, Munich, 1961.

13/ G. A. Sawyer, A. J. Bearden, I. Henins, F. C. Jahoda, and F. L. Ribe, X-Ray Crystal Spectroscopy of a Theta-Pinch Plasma in the Region 15-25 Å, *Phys. Rev.* 131, 1891 (1963).

14/ Г.С.Беликова, А.Б.Гильварг, Г.Г.Долгов-Савельев и В.Е.Панченко. Об отражательной способности кристалла кислой калиевой соли фталевой кислоты, *Опт. и сп.*, в печ..

15/ Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Прибор для исследования мягкого рентгеновского излучения плазмы. Докл. на Всесоюзной конференции по диагностике плазмы, Харьков, 1966.

16/ R. C. Elton, E. Hintz, and M. Swartz, Vacuum Ultraviolet and Soft X-Ray Spectroscopic Measurements in a Magnetic Compression Experiment, *Proc. of the Seventh Inter. Conf. on Phen. in Ionized Gases, Beograd, 1965, vol. III, page 190.*

17/ H. Friedman and L. S. Birks, A Geiger Counter Spectrometer for X-Ray Fluorescence Analysis, *Rev. Sci. Instr.* 19, 5, 323-330 (1948).

- /8/ Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Сечение возбуждения К-серии аргона электронным ударом. *Опт. и сп.*, в печ..
- /9/ R. L. Blake, T. A. Chubb, H. Friedman, and A. S. Unzicker, *Spectral and Photometric Measurements of Solar X-Ray Emission below 60 Å*, *The Astrophysical J.*, vol. 142, July 1, 1965, number 1.
- /10/ J. Eggs, K. Ulmer, *Z. angew. Phys.*, 1965, 20, № 2, 118 — 128
- /11/ Бирден и Хаффман. Прецизионные измерения межплоскостного расстояния для плоскостей спайности в кристалле кислого фталата калия. Приборы для науч. исслед., № II, 1963, стр. 64.
- /12/ Экспериментальные диспергирующие системы и приемники для мягких рентгеновских лучей, "Advances X-Ray Analysis. Vol. 7." Denver, Colo., 1964, 489-496.
- /13/ Соьер Р., *Экспериментальная спектроскопия*, ИИЛ, 1953.
- /14/ Боровский И.Б., Блохин М.А.. Рентгено-спектральный анализ, ГОНТИ, 1939.
- /15/ G. Sraque, D. H. Tombovlian, D. E. Bedo, *J. Opt. Soc., Amer.*, 45, 756, 1955.
- /16/ А.П.Лукирский, Е.П.Савинов и Ю.Ф.Шепелев, Работа эшелеттов с золотым и титановым покрытиями в области длин волн от 23,6 до 113А, *Опт. и сп.*, 15, 543, 1963.
- /17/ А.П.Лукирский, Т.М.Зимкина и И.А.Брытов. Исследование рентгеновских спектров в области длин волн больше 15А на спектрометре с дифракционной решеткой с золотым покрытием, *Опт. и сп.*, 16, 688, 1964.

- /18/ А.П.Лукирский, Е.П.Савинов, О.А.Ершов, И.И.Жукова, В.А.Фомичев. Отражение рентгеновских лучей с длинами волн от 23,6 до 190,3Å. Некоторые замечания о работе дифракционных решеток, *Опт. и сп.*, 19, 425, 1965.
- /19/ Франс и Дэвидсон. Оптимальная толщина стеаратовой "решетки" для мягких рентгеновских лучей. *Приборы для науч.исслед.*, № 2, 1965, стр. 105.
- /20/ М.А.Блохин. Методы рентгено-спектральных исследований, Физматиз, 1959.
- /21/ И.М.Нагибина, В.К.Прокофьев. Спектральные приборы и техника спектроскопии, Машгиз, 1963, стр. 97.
- 122) *A. J. Bearden, F. L. Ribe, G. A. Sawyer, and T. F. Stratton, X-Ray Continua and Line Spectra from Highly Stripped Atoms in a Magnetically Compressed Plasma, Phys. Rev. Let., v. 6, №6, March 15, 1961, p. 257.*
- /23/ А.П.Лукирский, М.А.Румш и И.А.Карпович, *Опт. и сп.*, 1960, т. IX, вып. 5, стр. 653.
- /24/ Г.Г.Долгов-Савельев и В.Е.Панченко. Об определении функции распределения электронов по энергиям по характеристическому рентгеновскому излучению плазмы. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1967.
- 125) *Nicholson James B., Wittry David B., "Advances X-Ray Analysis. Vol. 7." Denver, Colo., 1964, 497-511.*
- 126) *J. W. Ruderman, K. J. Ness, J. C. Lindsay, Analyzer Crystals for X-Ray Spectroscopy in the Region 25-100 Å, Appl. Phys. Let., 1965, 7, №1, 17-19.*
- /27/ А.П.Лукирский, В.А.Фомичев и И.А.Брытов. *Опт. и сп.*, 1966, т. XX, вып. 2, стр. 366.

- /28/ А.П.Лукирский и Ю.А.Омельченко. Опт. и сп., 1960, т.УШ, вып. 4, стр. 563.
- /29/ А.М.Тютиков и А.И.Ефремов, ДАН СССР, 1958, том II8, № 2, стр. 286.
- /30/ А.П.Лукирский, М.А.Румш, и Л.А.Смирнов, Опт. и сп., 1960, № 4, том IX, стр. 5II.
- /31/ А.П.Лукирский, М.А.Румш и И.А.Карпович. Завод. лаб., 1963, № 4, стр. 456.
- /32/ Е.П.Савинов и А.П.Лукирский. Опт. и сп., т.ХХШ, вып. 2, 1967 (303).

Ответственный за выпуск В.Е. ПАНЧЕНКО
Подписано к печати 27.XI.1967 г.
Усл. 2,1 печ. листа, тираж 100 экз.
Заказ № 175, Бесплатно
