538.56

ИЛЛЮСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ СЪЕМКИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КРИСТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ САНТИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В настоящей работе описаны два варианта лекционной демонстрации, иллюстрирующей с помощью сантиметровых волн получение рентгенограммы по методу вращающегося кристалла. Справедливость закона Вульфа — Брэгга для этих волн была впервые экспериментально доказана в начале 20-х годов Н. А. Капцовым [1-2].

Установка (рис. 1) включает в себя заводской генератор 3-*см* волн *1* с блоком питания *2*, приемную рупорную антенну *3*, соединенную с осциллографом С1-1. и модель кристалла *4*, состоящую из 477 медных диполей, собственная частота которых

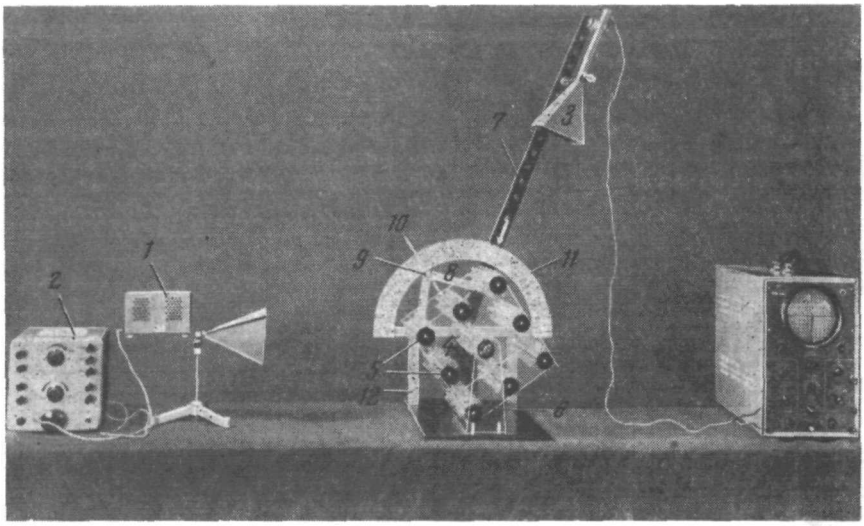


Рис. 1. Установка для демонстрации рентгеновской съемки вращающегося кристалла.
1 — излучатель 3-*см* волн; *2* — блок питания; *3* — приемная рупорная антенна; *4* — модель кристалла; *5* —«атомы» модели кристалла; *6* — стойки для крепления оси «кристалла»; *7* — рейка; *8* — пантограф; *9* — ползун; *10* — штанга, связанная с «кристаллом»; *11* — шкала; *12* — стойки для крепления шкалы.

совпадает с частотой излучения генератора [3]. Диполи изготовлены из двухмиллиметровой медной проволоки и имеют длину 60 *мм*. Излучатель, как и рентгеновская трубка, располагается неподвижно на демонстрационном столе. Горизонтальная ось вращения «кристалла» с помощью подшипников крепится на двух вертикальных стойках *6* из органического стекла. Сзади образца на его оси вращения на отдельном подшипнике крепится рейка *7*, удерживающая приемную рупорную антенну *3*. Для наблюдения рассеяния под всевозможными углами перемещают приемную антенну вместе с рейкой *7* в вертикальной плоскости по окружности с центром на оси вращения образца. Вращение приемной антенны *3* при помощи пантографа *8* может быть синхронизовано с вращением образца *4* так, что поворот антенны на угол θ вызывает поворот образца на угол $\theta/2$, или они могут вращаться независимо. По шкале *11*, укрепленной на двух стойках *12*, отсчитывается двойной брэгговский угол рассеяния.

Диполи «кристалла» расположены в узлах тетрагональной решетки с трансляциями $a = b = 10$ *см* и $c = 0{,}5$ *см*. Ось вращения «кристалла» параллельна трансляции c. При помощи приемной антенны фиксируется положение интерференционных максимумов рассеяния на нулевой слоевой линии, поэтому интерференционный индекс l всегда равен нулю [4]. Зафиксировать положение интерференционных максимумов первой слоевой линии не представляется возможным, так как $c/a \ll 1$.

При первом знакомстве учащихся с получением рентгенограмм по методу вращающегося кристалла методически целесообразнее предлагаемую модель кристалла рассматривать как «двумерную» с девятью «атомами», расположенными в вертикальной плоскости и образующими квадратную элементарную ячейку с «постоянной» решетки $a = b = 10$ *см*. Каждому из девяти «атомов» в направлении, перпендикулярном

вертикальной плоскости, поставлена в соответствие совокупность 53 медных диполей (рис. 2, *а*), укрепленных на диэлектрической штанге длиной 300 *мм*. Диполи каждого «атома» повернуты относительно друг друга на угол 45°. Это сделано для того, чтобы распределение амплитуды рассеяния каждого «атома» в плоскости, перпендикулярной его оси, было ближе к радиально симметричному. Все девять диэлектрических штанг

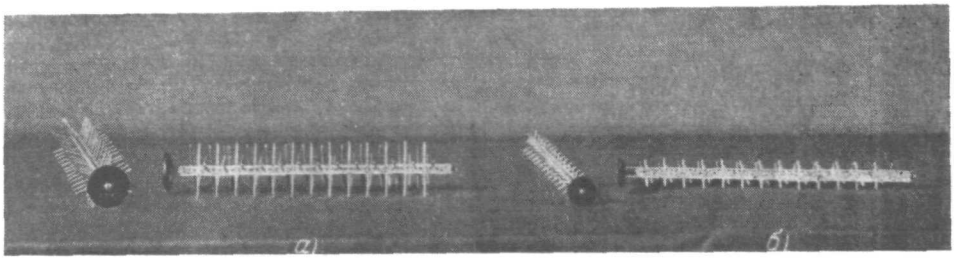


Рис. 2. «Атомы кристалла».

с медными диполями крепятся при помощи винтов к передней и задней квадратным пластинам (см. рис. 1) из органического стекла размером 240 × 240 *мм*².

Облучение «кристалла» производится волной, электрический вектор которой E лежит в вертикальной плоскости.

1. Первая демонстрация состоит в наблюдении интерференционных максимумов, обусловленных отражением от плоскостей кристалла с индексами (10), (20) и т. д.

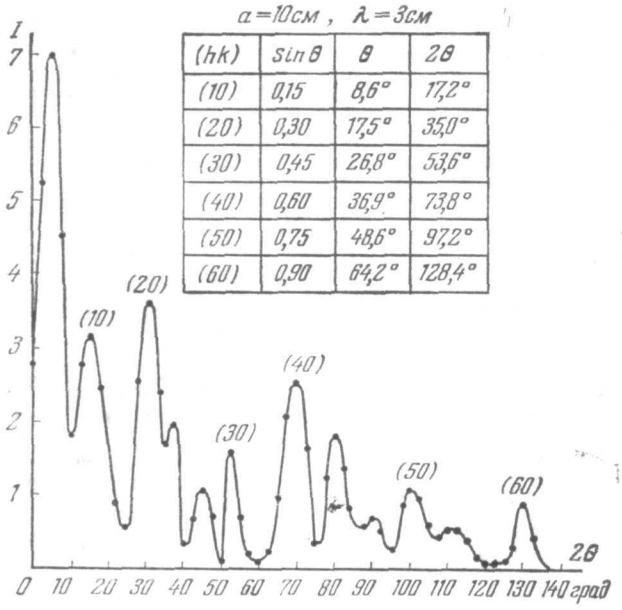


Рис. 3.

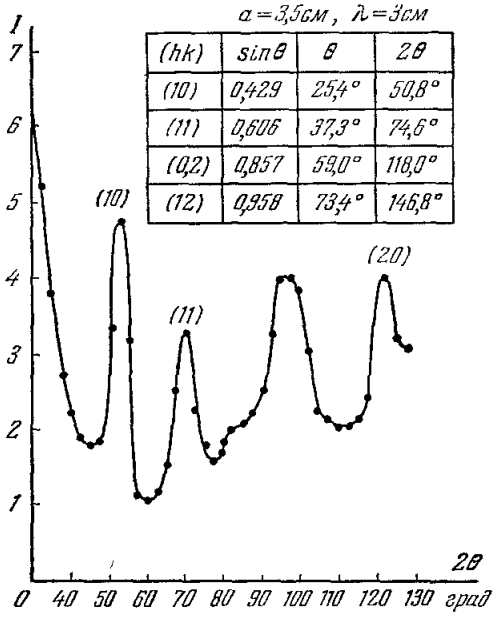
по схеме, используемой в дифрактометрах приемной антенны, вращающейся по окружности с центром на оси вращения образца. В этом опыте вращение образца и приемной антенны синхронизованы. Начальная установка кристалла показана на рис. 1. На рис. 3 показаны результаты расчета углов рассеяния для «кристалла» с «постоянной решетки» $a = 10$ *см* и длины волны применяемого излучения $\lambda = 3$ *см*. Расчет углов рассеяния произведен по известной [4] формуле рентгенографии

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2a}\sqrt{h^2+k^2}, \qquad (1)$$

где a —«постоянная решетки», λ — длина волны применяемого излучения, (hk) — миллеровские индексы плоскостей.

На том же рисунке показана и экспериментальная «рентгенограмма», т. е. зависимость отклонения луча на экране осциллографа от угла 2θ, отсчитываемого по шкале прибора. Положение большинства интерференционных максимумов полностью согласуется с табличными значениями углов. Однако наблюдается два дополнительных максимума под углами 45 и 80°, возникновение которых обусловлено побочными эффектами.

Для наблюдения интерференционного максимума, обусловленного отражением от диагональной плоскости с миллеровскими индексами (11), поворачивают «кристалл» на оси его вращения на угол 45° относительно неподвижных излучателя и приемника, после чего опять синхронизуют вращение образца и приемной антенны. Наблюдаемый интерференционный максимум от плоскости (11) под углом $2\theta = 25°$ находится в полном согласии с рассчитанным по формуле (1), которая дает для него значение 24,4°.



(hk)	sinθ	θ	2θ
(10)	0,429	25,4°	50,8°
(11)	0,606	37,3°	74,6°
(0,2)	0,857	59,0°	118,0°
(12)	0,958	73,4°	146,8°

Рис. 4.

2. Установка второго варианта демонстрации, предназначенная для иллюстрации получения рентгенограммы от вращающегося кристалла фотометодом, состоит из тех же основных элементов. Однако вращение приемной антенны демонстратором и образца происходит независимо друг от друга. Образец вращается при помощи двигателя с постоянной скоростью 1 *об/мин*. Диполи «кристалла» образуют также тетрагональную решетку с трансляциями $a = b = 3{,}5$ *см* и $c = 0{,}5$ *см*. Малая «постоянная решетки» достигается применением медных диполей длиной 3 *см* (рис. 2, *б*). Использование образца с малой «постоянной решетки» позволяет получить меньшее количество интерференционных максимумов и более резко их разграничить.

Демонстрация в этом случае проводится следующим образом. После включения генератора сантиметровых волн, двигателя, вращающего образец, и осциллографа перемещают медленно приемную антенну по окружности с центром на оси вращения образца. При этом на экране осциллографа замечают величину кратковременных импульсов приема, находят положения приемной антенны, при которых импульсы приема максимальны. Эти положения антенны будут соответствовать положению интерференционных максимумов.

На рис. 4 приведены углы рассеяния для «постоянной решетки» $a = 3{,}5$ *см* и $\lambda = 3$ *см*, рассчитанные по формуле (1), и экспериментальная «рентгенограмма», снятая для той же «постоянной решетки». На общем фоне рассеяния сантиметровых волн отчетливо выделяются первые три максимума. Интерференционный максимум под углом $2\theta = 146{,}8°$, обусловленный отражением от плоскости (12), отчетливо не выделяется в силу его слабости. Дополнительное рассеяние под углом 95° обусловлено побочными эффектами.

Кроме непосредственной иллюстрации способов получения рентгенограмм, описанная установка позволяет наблюдать понижение интенсивности излучения, прошедшего через кристалл в момент максимального отражения его от того же кристалла, и наоборот. Для этого, остановив «кристалл» и приемник в положении максимального отражения при любом угле Вульфа — Брэгга, передвигают приемную антенну при неподвижном образце в горизонтальное положение и замечают интенсивность проходящего луча при максимальном отражении. Затем, повернув немного «кристалл» (это нарушит условие максимального отражения), наблюдают увеличение интенсивности проходящего луча. Более эффективно это можно сделать при наличии двух приемных антенн, одна из которых улавливает проходящий луч, а вторая — отраженный под углом Вульфа — Брэгга; тогда при вращении «кристалла» наблюдают противоположное друг другу изменение интенсивностей проходящего и отраженного лучей.

«Кристаллы» описанных установок позволяют изменять «постоянную решетки» перестановкой восьми периферийных «атомов». Тогда максимальное рассеяние излучения наблюдается под другими углами.

На обеих установках имеется возможность показать сущность обратной съемки, т. е. наблюдение интерференционных максимумов под углами Вульфа — Брэгга, удовлетворяющих условию $90° < 2\theta < 180°$.

Комсомольский-на-Амуре педагогический институт

Н. Я. Молотков

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Капцов, О дифракции электромагнитных волн в пространственной решетке, Труды 3-го съезда Российской ассоциации физиков в Нижнем Новгороде, 1923.
2. Н. А. Капцов, Ann. d. Phys. **69** (4) (1922).
3. Н. М. Шахмаев, Физика в школе, № 4, 67 (1960).
4. Г. С. Жданов, Я. С. Уманский, Рентгенография металлов, М.—Л., 1941.