

## АНОМАЛЬНОЕ ПРОПУСКАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ОЛОВА

*В.К.Войтовецкий, И.Л.Корсунский, А.И.Нозиков, Ю.Ф.Пакин*

При прохождении рентгеновских лучей через совершенные или почти совершенные кристаллы под углом Брэгга к кристаллографическим плоскостям коэффициент поглощения для прошедшего пучка становится аномально низким.

Это явление, впервые наблюдавшееся Боррманном в монокристаллах кварца [1] и исследованное затем также в кальците, германии и кремнии [2-5], послужило основанием для разработки новых методов изучения термических вибраций в кристалле, определения дебаевской температуры, а также обнаружения и контроля различного типа нарушений периодичности в кристаллической решетке [6-8].

Предполагалось (например, [6]), что anomальное пропускание не должно иметь места в металлических кристаллах, так как такие кристаллы содержат большое число дислокаций и других дефектов. Anomальное пропускание, наблюдавшееся при дифракции рентгеновских лучей на (0002)-плоскостях в толстых кристаллах цинка, рассматривалось как исключение и связывалось с особенностями в характере и расположении дислокаций, не оказывающих в этом случае влияния на дифракционные явления [6]\*.

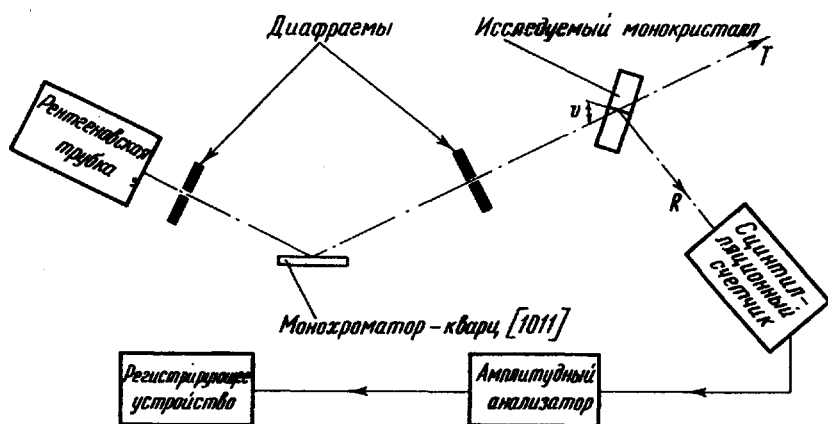


Рис.1. Схема эксперимента

Однако, экспериментально установлено, что связь между числом дислокаций и anomальным коэффициентом поглощения неоднозначна и зависит от вещества кристалла [10].

Нами наблюдалось anomальное пропускание рентгеновских лучей в монокристаллах KCl, содержащих  $6 \cdot 10^3 - 10^4$  дислокаций на  $1 \text{ см}^2$ . Эффект Боррманна в кристаллах KCl пропадает при плотности дислокаций  $\sim 10^5$  на  $1 \text{ см}^2$  [11], в то время как для кристалла германия критическое значение плотности дислокаций  $\sim 1,7 \cdot 10^6$  на  $1 \text{ см}^2$  [8,12]. По-видимому, это связано с характером связи в решетке и для кристаллов, на электрические и оптические свойства которых дефекты структуры влияют слабее, требования к степени совершенства для возможности наблюдения anomального пропускания менее жестки. В [10] заметное различие в зависимости коэффициента anomального пропускания от плотности дислокаций найдено даже для кристаллов одного типа — Ge и Ga As.

В металлах электронный газ сильно экранирует имеющиеся нарушения решетки, поэтому можно было предположить, что эффект Боррман-

\* Эффект Боррманна наблюдался также при дифракции рентгеновских лучей на (111)-плоскостях в очень совершенных медных кристаллах, содержащих менее чем  $10^3$  дислокаций на  $1 \text{ см}^2$  [9].

на удастся наблюдать и в металлических кристаллах, имеющих относительно большое, по сравнению с кристаллами других типов, число дефектов.

Аномальное пропускание нами экспериментально обнаружено в одном из наиболее "деликатных" кристаллов – в монокристаллах олова при дифракции на плоскостях (020) и (220). Несмотря на значительную угловую расходимость пучка ( $\sim 40''$ ) эффект проявляется очень резко.

В экспериментах использована модернизированная рентгеновская установка типа УРС-50ИМ. (Схема эксперимента изображена на рис.1). Положение отражающих кристаллов (1,-1). Исследовалось пропускание характеристического рентгеновского излучения молибдена; кварцевый

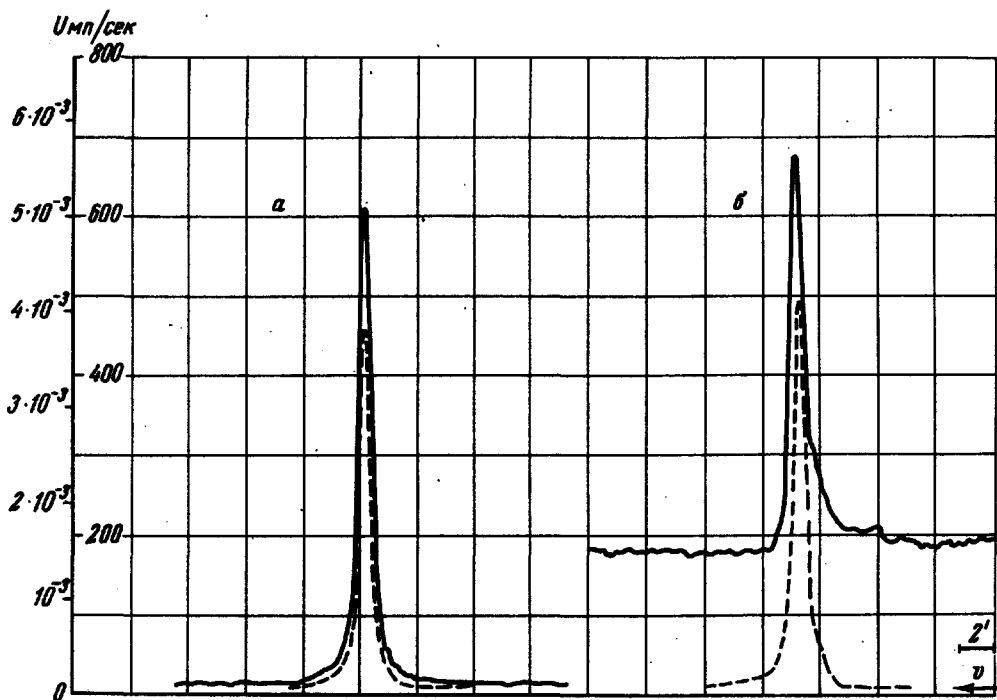


Рис.2. Лауэ-дифракция рентгеновского излучения  $Mo K_{\beta}$  в олове. *a* – толщина кристалла 0,6 мм, плоскости отражения (020), *б* – толщина кристалла 0,4 мм, плоскости отражения (220). Сплошные кривые – пропущенная часть излучения, пунктирные – отраженная часть излучения

монохроматор выделял линию  $K_{\beta}$  (19,6 кэв). Прошедший (*T*) через монокристалл олова и Лауэ-рассеянный (*R*) пучки регистрировались сцинтилляционным счетчиком с записывающим устройством.

Монокристаллы олова были получены методом выращивания ориентированных монокристаллов в оптически полированных формах [13]\*.

\* Авторы благодарны Ю.В.Шарвину и В.Ф.Гантмахеру за полезные советы по методике выращивания ориентированных монокристаллов олова.

На рис.2 приведены относительные интенсивности рассеянного и прошедшего излучения  $Mo K_{\beta}$  при Лауэ-дифракции на плоскостях (020) в монокристалле олова толщиной 0,6 мм и на плоскостях (220) при толщине монокристалла 0,4 мм. Экспериментальные зависимости интенсивности прошедшего пучка от угла поворота исследуемого кристалла около угла Брэгга хорошо согласуются с кривыми динамической теории для соответствующих значений параметра  $\mu t$  ( $\mu$  – линейный коэффициент поглощения,  $t$  – толщина кристалла).

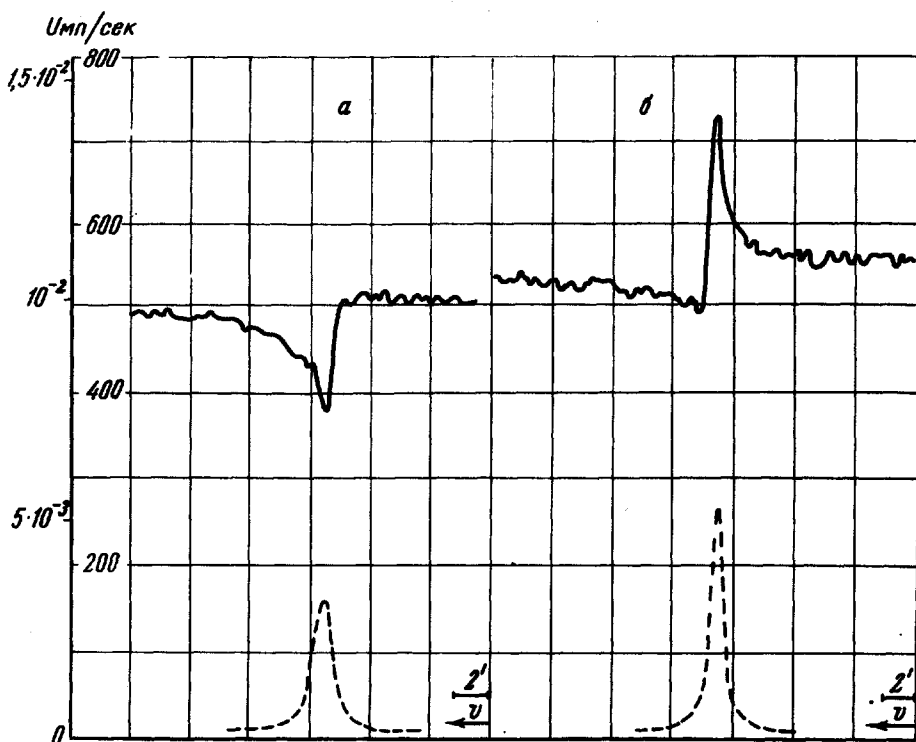


Рис.3. Лауэ-дифракция рентгеновского излучения  $Mo K_{\beta}$  в KCl. Толщина кристалла 2,5 мм, плоскости отражения (020), *a* и *b* – различные по степени совершенства участки кристалла. Сплошные кривые – пропущенная часть излучения, пунктирные – отраженная часть излучения

Исследованные монокристаллы олова неоднородны по степени совершенства структуры; интенсивность и полуширина дифракционных пиков существенно меняется в зависимости от участка кристалла, на который попадает пучок. Топографические снимки по Боррману и Лангу показали, что некоторые кристаллы имеют ячеистую структуру (отдельные ячейки окружены плотной сеткой дислокаций), а в других видны большие прозрачные области с плотностью дислокаций  $\geq 10^6$ .

Увеличение количества дефектов при неизменной толщине кристалла сказывается различно на аномальном пропускании в исследованных нами монокристаллах олова и KCl. В олове при росте числа дефектов, проявляющемся в уширении дифракционного пика, вид кривой относительной интенсивности прошедшего пучка не меняется, изменяется только абсолютная интенсивность аномально прошедшего излучения. Увеличение плотности дислокаций в кристаллах KCl (при этом уширяется дифракционный пик) приводит к существенному изменению характера кривой относительной интенсивности прошедшего пучка; несмотря на неизменную толщину кристалла пик аномального пропускания даже сменяется экстинкционным провалом, уменьшается "эффективное" значение  $\mu t$  (рис.3). Этот эффект, по-видимому, связан с различием в характере нарушений структуры или обусловлен типом связи в решетке.

Полученные результаты подтверждают предположение, что эффект Боррманна можно наблюдать в металлических кристаллах при дифракции на различных плоскостях, для металлов требования к степени совершенства структуры, по-видимому, существенно менее жестки, чем для ионных кристаллов и кристаллов с направленными валентными связями между атомами.

Авторы благодарны А.П.Александрову за интерес к работе, Ю.М.Кагану за обсуждение результатов, И.Л.Шульпиной за топографические съемки кристаллов, а также А.А.Сироткину и Б.И.Барахтяну, участвовавшим в проведении экспериментов.

Поступило в редакцию  
22 февраля 1968 г.

### Литература

- [1] G.Bormann, Zs. Phys., 42, 157, 1941.
- [2] H.N.Campbell, J.Appl. Phys., 22, 1139, 1951.
- [3] G.L.Rogosa, G.Schwarz, Phys. Rev., 87, 995, 1952.
- [4] G.Brogren, Ö.Adell, Arkiv fys., 8, 97, 1954.
- [5] L.P.Hunter, J. Appl. Phys., 30, 874, 1959.
- [6] A.Merlini, S.Pace, Nuovo Cim., 35, 377, 1965.
- [7] B.W.Battermann, Phys. Rev., 126, 1461, 1962.
- [8] О.Н.Ефимов, канд.диссертация, Ленинград, 1964.
- [9] M.C.Wittels, F.A.Sherill, F.W.Young jr. Appl. Phys. Lett., 2, 127, 1963.
- [10] S.Maruuama, J. of the Phys. Soc. of Japan, 21, 2092, 1966.
- [11] Э.Ф.Чайковский, Л.Б.Загарий, ФТТ, 10, 1968 (в печати).
- [12] S.Maruuama, J. of the Phys. Soc. of Japan, 20, 1399, 1965.
- [13] Ю.В.Шарвин, В.Ф.Гантмахер. ПТЭ, № 6, 165, 1963.