

АНИЗОТРОПИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РОСТА И ПОВЕРХНОСТНОЙ ЖЕСТКОСТИ КРИСТАЛЛОВ ${}^4\text{He}$

О.А. Андреева, К.О. Кешишев, С.Ю. Осипьян

В настоящей работе продолжено изучение анизотропии равновесных и кинетических свойств поверхности кристаллов ${}^4\text{He}$, имеющих гексагональную плотноупакованную (ГПУ) структуру. Измерены угловые зависимости поверхностной жесткости и коэффициента роста для нескольких сечений, проходящих через основные элементы симметрии кристалла — оси C_6 и C_2 .

Использовавшийся в экспериментах прибор позволял выращивать ориентированные образцы, исследовать интересующие нас свойства плоской поверхности кристалла известной кристаллографической ориентации, а также изменять эту ориентацию путем поворота экспериментальной камеры. Конструкция прибора и детали эксперимента описаны в предыдущей работе ¹. Для определения поверхностной жесткости $\tilde{\alpha}$ и коэффициента роста K использовался метод возбуждения и регистрации кристаллизационных волн ², обеспечивающий измерение их спектра и затухания. Напомним, что при распространении по поверхности плоской кристаллизационной волны указанная методика позволяет регистрировать конфигурацию поверхности (в произвольном масштабе по оси ординат) в некоторый заданный момент времени и определять тем самым длину волны λ и затухание. Добавим, что в контрольном эксперименте независимо была измерена амплитуда регистрируемых кристаллизационных волн. Ее максимальное значение в нашем случае составляет 1,5 мкм.

Используя выражение для спектра кристаллизационных волн ³ и пренебрегая в нем гравитацией и затуханием, получаем формулу для экспериментального определения поверхностной жесткости $\tilde{\alpha}$:

$$\tilde{\alpha} = \rho_l k^3 / (\rho_s - \rho_l)^2 \omega^2, \quad (1)$$

где ω — частота волны (в наших экспериментах $\omega \approx 1$ кГц), $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор, ρ_l , ρ_s — плотности жидкости и кристалла. Заметим, что учет гравитации и затухания дает поправку к поверхностной жесткости, не превышающую 5%.

Учитывая тот факт, что затухание кристаллизационных волн связано в основном с конечностью коэффициента роста, и, считая затухание малым, имеем для коэффициента роста K поверхности данной ориентации ³:

$$K = \frac{\rho_s \rho_l^{1/3} \omega^{1/3}}{\tilde{\alpha}^{2/3} (\rho_s - \rho_l)^{2/3}} \kappa^{-1}, \quad (2)$$

где κ^{-1} — длина затухания кристаллизационной волны.

Измеряя длину и затухание кристаллизационных волн для каждой ориентации поверхности, получаем зависимости поверхностной жесткости и коэффициента роста от угла в различных сечениях кристалла. Важно отметить, что поворот экспериментальной камеры производится вокруг оси, перпендикулярной плоскости, образованной вектором нормали к поверхности \mathbf{n} и волновым вектором волны \mathbf{k} . Поэтому поверхностная жесткость, определяемая экспериментально по формуле (1), выражается через поверхностную энергию α соотношением $\tilde{\alpha} = \alpha + \partial^2 \alpha / \partial \theta^2$, при этом угол θ лежит в плоскости (\mathbf{n}, \mathbf{k}) .

Измерения проводились при температуре $T = 0,4$ К. Температура ограничения базисной плоскости (0001) составляет $T_{R1} = 1,3$ К, плоскости (10 $\bar{1}0$) — $T_{R2} = 0,9$ К ^{2,4,5}.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости поверхностной жесткости от угла в двух взаимно перпендикулярных сечениях. В сечении 1 векторы нормали к исследуемым поверхностям лежат в плоскости, проходящей через ось C_6 ; θ — угол наклона поверхности от

носителю плоскости (0001). Ориентация этого сечения относительно осей C_2 произвольна. В силу симметрии кристалла функция $\tilde{\alpha}(\theta)$ симметрична относительно точки $\theta = 90^\circ$. Точка $\theta = 0$ является особой точкой зависимости $\tilde{\alpha}(\theta)$ и соответствует атомногладкой грани (0001). Минимальное значение угла, для которого удалось определить величину $\tilde{\alpha}$, составляет 2° . Измерениям в области меньших углов препятствует возрастание затухания. В сечении 2 векторы нормали к исследуемым поверхностям перпендикулярны оси C_6 ; θ — угол наклона поверхности относительно плоскости (10 $\bar{1}$ 0). Зависимость $\tilde{\alpha}(\theta)$ в этом сечении должна быть, очевидно, симметрична относительно точки $\theta = 30^\circ$. Минимальный угол, на который удалось подой-

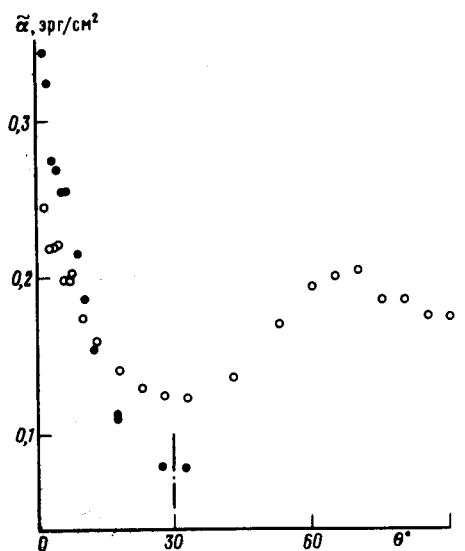


Рис. 1

Рис. 1. Угловая зависимость поверхностной жесткости в двух взаимно перпендикулярных сечениях: \circ — сечение 1; \bullet — сечение 2

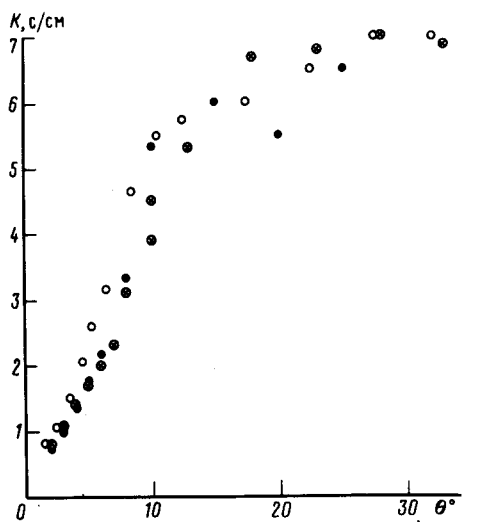


Рис. 2

Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента роста кристалла вблизи особых граней: \circ , \bullet — сечения 3, 4; \oplus — сечение 5

ти к грани (10 $\bar{1}$ 0), составляет $1,5^\circ$.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости коэффициента роста от угла в трех различных сечениях кристалла. Сечения 3 и 4 проходят через ось C_2 и различаются ориентацией относительно оси C_6 . Сечение 5 проходит через ось C_6 . Угол θ во всех трех случаях определяет отклонение поверхности от соответствующей атомногладкой грани.

В теоретической работе Ф.Нозьера и М.Уваги ⁶ анизотропия коэффициента роста кристаллов ⁴He вблизи особых граней получена из рассмотрения рассеяния фононов жидкости на дефектах поверхности кристалла (изломах, ступенях). Качественная зависимость $K(\theta)$, предсказываемая в этой работе, характеризуется линейным поведением при малых углах, слабой зависимостью от угла вдали от особых граней и перегибом кривой в промежуточной области углов. Экспериментальные кривые $K(\theta)$ на рис. 2 демонстрируют все три предсказанных свойства. Однако мы не можем констатировать полного согласия эксперимента с теорией в данном вопросе. Дело в том, что при выводе линейной зависимости $K(\theta)$ в области малых углов авторы существенно пользуются условием независимости ступеней, образующих vicinalную грань, то есть малостью ширины размытия ступеней по сравнению с расстоянием между ними. В эксперименте линейная зависимость наблюдается вплоть до $\theta \approx 7^\circ$. Но из экспериментальных кривых $\tilde{\alpha}(\theta)$ (рис. 1) видно, что ступени остаются сильно взаимодействующими по край-

ней мере вплоть до угла $\theta \approx 1,5^\circ$. Критерием слабости взаимодействия ступеней является величина поверхностной жесткости $\tilde{\alpha}$. Слабовзаимодействующим ступеням vicинальной грани должна отвечать малая поверхностная жесткость (по сравнению с ее значением вдали от особой грани). Большая величина $\tilde{\alpha}$, наблюдаемая при $\theta < 7^\circ$ в обоих сечениях (рис. 1) означает сильное взаимодействие ступеней в этом диапазоне углов. При $\theta \approx 7^\circ$ происходит лишь изменение степени зависимости $\tilde{\alpha}(\theta)$ (рис. 3). В области малых углов для обоих сечений $\tilde{\alpha} \propto \theta^{-1,5 \div -1,6}$; в области больших углов вид зависимости $\tilde{\alpha}(\theta)$ различен в разных сечениях и

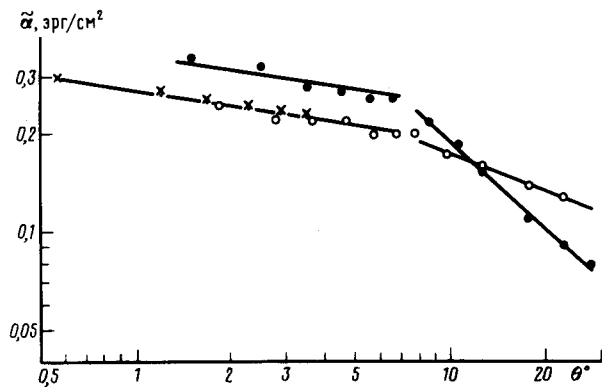


Рис. 3. Угловая зависимость поверхностной жесткости вблизи особых граней в двойном логарифмическом масштабе: \circ – вблизи грани (0001); \bullet – вблизи грани (1010); \times – данные работы ⁷ вблизи грани (0001)

отвечает, по-видимому, естественной анизотропии кристалла. На рис. 3 приведены также экспериментальные данные Бабкина и др. ⁷, полученные в результате анализа равновесной формы кристаллов при $T \approx 1,2$ К. Хорошее согласование приведенных результатов позволяет констатировать отсутствие заметной температурной зависимости поверхностной жесткости в интервале температур $0,4 \div 1,2$ К.

Литература

1. Андреева О.А., Кешишев К.О. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 160.
2. Кешишев К.О., и др. ЖЭТФ, 1981, 80, 716.
3. Андреев А.Ф., Паршин А.Я. ЖЭТФ, 1978, 75, 1511.
4. Avron J.E., et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 814.
5. Balibar S., Castaing B. J. de Phys. Lett., 1980, 41, 329.
6. Nozieres P., Uwaha M. J. de Phys., 1987, 48, 389.
7. Бабкин А.В. и др. ЖЭТФ, 1985, 89, 2288.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
11 мая 1989 г.