

АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЖЕСТКОСТИ КРИСТАЛЛОВ He^4

О.А.Андреева, К.О.Кешишев

Измерена угловая зависимость поверхностной жесткости гпу-кристаллов He^4 .

Поверхностная энергия кристалла α и непосредственно связанная с ней поверхностная жесткость $\tilde{\alpha}_{ij} \equiv \alpha \delta_{ij} + (\partial^2 \alpha / \partial \theta_i \partial \theta_j)$ ($i = 1, 2$, θ_i – углы, определяющие кристаллографическую ориентацию поверхности) являются важнейшими характеристиками, определяющими равновесные свойства кристаллической поверхности. До сих пор, однако, прямых измерений анизотропии этих двух величин не производилось.

В настоящей работе измерена угловая зависимость поверхностной жесткости кристаллов He^4 , имеющих гексагональную плотноупакованную структуру. Величина поверхностной жесткости определялась путем измерения спектра кристаллизационных волн¹. Конструкция прибора, процедура выращивания ориентированных образцов, метод возбуждения и регистрации кристаллизационных волн подробно описаны ранее¹. Существенное изменение претерпела лишь оптическая камера высокого давления, в которой выращивались и исследовались кристаллы. В данном случае камера имела форму цилиндра (внутренний диаметр 23 мм, длина 29 мм), ось симметрии которого была расположена горизонтально и совпадала с оптической осью криостата и всей установки (рис. 1). В нижнюю часть камеры вмонтировано плоское дно, имеющее тепловой контакт с рефрижератором. Кроме того, на внутренней поверхности камеры слева и справа симметрично относительно дна размещены два проволочных конденсатора, предназначенных для возбуждения кристаллизационных волн. Для симметризации условий эксперимента относительно поворота камеры вокруг ее оси оба эти конденсатора были выполнены в виде цилиндрических поверхностей, ограниченных сектором 120° . Еще один проволочный конденсатор (цилиндр $\varnothing 2$ мм, длиной 4 мм), размещенный в верхней части камеры, использовался в качестве источника сильного электрического поля в процессе выращивания ориентированных образцов. Вся конструкция вмонтирована в обойму шарикового подшипника, в результате чего исследуемый образец вместе с камерой можно было поворачивать на угол 60° в обе стороны относительно горизонтального положения дна.

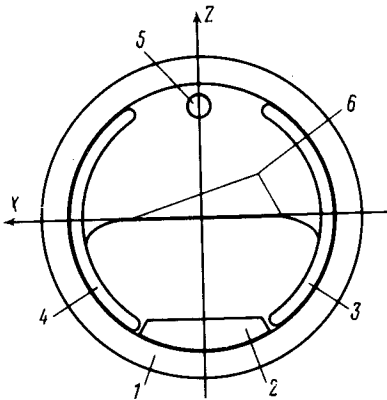


Рис. 1. Экспериментальная камера: 1 – корпус, 2 – дно, 3, 4, 5 – проволочные конденсаторы, 6 – межфазная граница

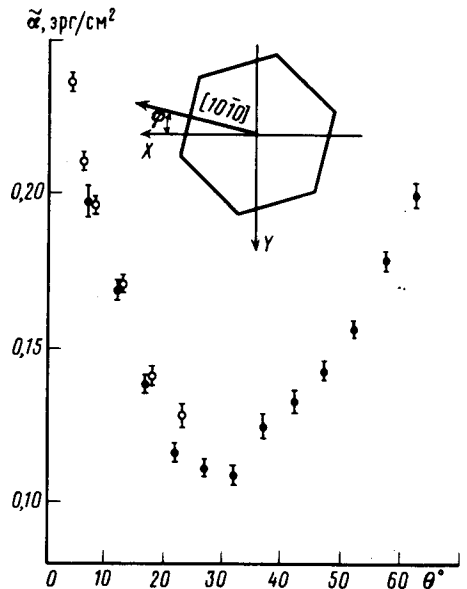


Рис. 2. Угловая зависимость поверхностной жесткости кристаллов He^4 : \circ – образец № 1 ($\phi = 5^\circ$), \bullet – № 2 ($\phi = 13^\circ$)

В соответствии с конструкцией прибора удобно выбрать прямоугольную систему координат: так, чтобы ось Z была направлена вдоль вертикали, ось Y совпадала с осью вращения, а начало координат находилось в середине камеры. Ось X при этом оказывается горизонтальной и перпендикулярной оси вращения.

В условиях эксперимента, когда кристалл заполняет всю нижнюю половину камеры, продольный размер равновесной межфазной границы составляет 29 мм, а поперечный — 20 мм, что существенно превышает величину капиллярной постоянной 1,4 мм. В этом случае для участков поверхности, находящихся на расстоянии 5 мм и более от стенок камеры, максимальное отклонение от горизонтали составляет $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ рад. Постоянное напряжение, приложенное к левому и правому конденсатору, значительно уменьшает краевой угол, в результате чего отклонение поверхности от горизонтали в плоскости XZ уменьшается на порядок. Особенно существенным это обстоятельство оказывается в тех случаях, когда одна из кристаллографических ориентаций, соответствующих атомногладкому состоянию поверхности, представлена в равновесном мениске. С указанной степенью точности мы будем далее считать, что межфазная граница совпадает с горизонтальной плоскостью.

Под действием переменного напряжения частоты ω , приложенного к одному из боковых конденсаторов, возбуждалась плоская кристаллизационная волна с волновым вектором k , параллельным оси X . В этом случае спектр кристаллизационных волн $\omega(k)$, в пренебрежении гравитационным слагаемым, имеет вид

$$\omega^2 = \frac{\rho_l |k|}{(\rho_s - \rho_l)^2} \tilde{\alpha}_{ij} k_i k_j = \frac{\rho_l}{(\rho_s - \rho_l)^2} \tilde{\alpha} k^3,$$

где ρ_s и ρ_l — плотность соответственно твердой и жидкой фазы, $\tilde{\alpha} = \alpha + \partial^2 \alpha / \partial \theta^2$, θ — угол, отсчитываемый от нормали к поверхности вдоль волнового вектора k . Измерения спектра при различных ориентациях образца проводились при температурах $0,4 \pm 0,45$ К, когда затухание достаточно мало.

Исследование анизотропии поверхностной жесткости непосредственно связано с изучением фазовых переходов ограничения. К настоящему времени на поверхности гпу-кристаллов He^4 обнаружено три таких фазовых перехода с критическими температурами T_R равными 1,28, 1,0 и 0,35 К для кристаллографических ориентаций (0001), (10 $\bar{1}$ 0) и (10 $\bar{1}$ 1) соответственно¹⁻³.

Используя ранее разработанную методику^{1,4} нам удалось вырастить кристаллы, для которых угол между осью C_6 и плоскостью XZ не превышал нескольких миллирадиан. В случае двух образцов, рассмотренных ниже, этот угол составлял 10^{-3} рад (образец № 1) и $2,5 \cdot 10^{-3}$ рад (№ 2). Пренебрегая этим слабым наклоном мы считаем, что в ходе измерений при любом повороте образца относительно первоначального положения ось C_6 остается в плоскости вращения.

Ориентация образца в плоскости, перпендикулярной оси C_6 , оказывались произвольной, и мы ограничились лишь ее грубой оценкой с точностью $\sim 5^\circ$. Угол ϕ между осью C_2 кристалла и плоскостью XZ (вставка на рис. 2) для тех же двух кристаллов составлял 5° (№ 1) и 13° (№ 2).

При повороте камеры в ходе эксперимента на угол θ межфазная граница за времена порядка нескольких секунд принимала горизонтальное положение, соответствующее минимуму энергии в поле тяжести. Этот процесс осуществлялся самопроизвольно за счет плавления одних участков поверхности и роста других при полном сохранении ориентации кристалла относительно камеры. Таким образом, каждое последующее измерение спектра соответственно кристаллографической ориентации, повернутой относительно первоначальной на угол θ . Этот угол измерялся с точностью $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ рад с помощью зрительной трубы, снабженной угломером, позволяющим регистрировать поворот в вертикальной плоскости.

Используемый нами метод имеет существенное ограничение, поскольку достаточно большим коэффициентом роста, необходимым для существования слабозатухающих кристаллизационных волн, обладают лишь поверхности, имеющие атомношероховатую структуру¹. Вблизи кристаллографических направлений, находящихся в атомногладком состоянии резко возрастает затухание, обусловленное появлением на поверхности атомногладких участков. В нашем

случае минимальный угол наклона видциальной грани составлял 4° , что главным образом связано со значительной амплитудой случайных колебаний поверхности, вызванных вибрацией криостата. На рис. 2 представлена зависимость $\tilde{\alpha}(\theta)$ для двух образцов, отличающихся ориентацией оси C_2 (направление $[10\bar{1}0]$). Угол $\theta = 0$ соответствует направлению $[0001]$. В исследованном диапазоне углов $4^{\circ} < \theta < 62^{\circ}$ $\tilde{\alpha}$ сильно анизотропна и изменяется в пределах $0,12 - 0,24$ эрг/см². Особый интерес представляет возрастание $\tilde{\alpha}$ при $\theta \rightarrow 0$. Этот результат находится в противоречии с предсказаниями развитой в последние годы теории⁵, согласно которой в исследованной нами области температур и углов должно наблюдаться линейное обращение $\tilde{\alpha}$ в нуль при $\theta \rightarrow 0$. Во всяком случае, полученный результат означает, что предсказываемая теорией зависимость $\tilde{\alpha}(\theta)$ может проявляться лишь при очень малых углах $\theta < 0,07$. Интересно отметить, что экстраполяция наших данных к значению $\theta = 0$ хорошо согласуется с результатами исследования равновесной формы кристаллов He⁴⁴, полученных вблизи ($T = 1,22$ К) перехода плоскости (0001) . Если признать, что этот факт не является случайным, следует констатировать отсутствие сколь-нибудь значительной температурной зависимости $\tilde{\alpha}$.

Мы благодарим А.Я.Паршина за полезные обсуждения результатов.

Литература

1. Кешишев К.О., Паршин А.Я., Бабкин А.В. ЖЭТФ, 1981, **80**, 716.
2. Avron J.E., Balfour L.S., Kuper C.G., Landau J., Lipson S.G., Shulman L.S. Phys. Rev. Lett., 1980, **45**, 814.
3. Wolf P.E., Balibar S., Gallet F. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**, 1366.
4. Бабкин А.В., Копелиович Д.Б., Паршин А.Я. ЖЭТФ, 1985, **89**, 2288.
5. Wolf P.E., Gallet F., Balibar S., Rolley E., Nozieres P. J. de Physique, 1985, **46**, 1987; Nozieres P., Gallet F. J. de Physique, 1987, **48**, 353.