

Критическое поведение мениска в кристаллах гелия

К. О. Кешишев¹⁾, В. Н. Сорокин⁺, Д. Б. Шемятихин

Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, 119334 Москва, Россия

⁺Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 21 декабря 2006 г.

После переработки 27 декабря 2006 г.

Исследована равновесная форма межфазной границы между сверхтекучим и кристаллическим ⁴Не вблизи ориентации (0001). Обнаружена особенность в зависимости краевого угла от угла наклона стенки к полю тяжести. Измерена энергия ступени на базисной плоскости кристалла.

PACS: 67.80.-s, 68.03.Cd

Постановка задачи. Известно, что поверхностная энергия кристалла α как функция кристаллографической ориентации θ на атомногладких гранях имеет особенность, связанную с конечностью энергии ступени β [1]. В простейшем двумерном случае поверхностная энергия в окрестности атомногладкой грани ($\theta = 0$) с учетом взаимодействия ступеней имеет вид

$$\alpha(\theta) = \alpha_0 \cos \theta + \frac{\beta}{h} |\sin \theta| + \frac{\gamma}{6} |\theta|^3, \quad (1)$$

где h – высота ступени, γ – константа взаимодействия между ступенями, $\theta = dZ/dx$, $Z(x)$ – форма межфазной границы.

Рассмотрим, следуя [2], кристалл с горизонтальной гранью (плоскость xy) в равновесии с жидкой фазой, ограниченный стенками контейнера (рис.1). Форма межфазной границы соответствует миниму-

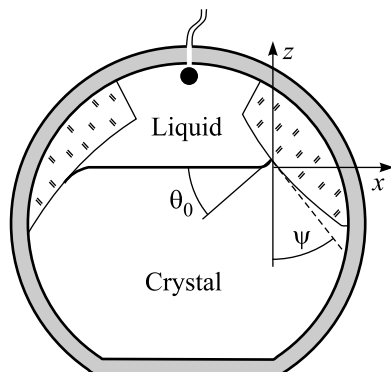


Рис.1. Экспериментальная камера

му поверхностной и гравитационной энергий при заданном объеме кристалла. Из-за разности ε энергий

кристалл-стенка и жидкость-стенка межфазная граница в окрестности стенки искривляется, оказываясь наклоненной в точке касания на угол θ_0 . При произвольном угле наклона стенки ψ к вертикали краевого угла $\psi - \theta_0 + \pi/2$ связан с α и ε соотношением

$$\alpha(\theta) \sin(\psi - \theta_0) - \alpha'_\theta(\theta) \cos(\psi - \theta_0) = \varepsilon(\psi). \quad (2)$$

С учетом (1) отсюда следует:

$$\theta_0 = \pm \sqrt{\frac{2}{\gamma \cos \psi} \left(\mp \varepsilon \pm \alpha_0 \sin \psi - \frac{\beta}{h} \cos \psi \right)}. \quad (3)$$

Положительное (отрицательное) решение реализуется на правом (левом) краю мениска на рис.1. Если же угол наклона стенки находится в диапазоне $\psi_- < \psi < \psi_+$, границы которого определяются соотношением

$$\alpha_0 \sin \psi_\pm - \varepsilon(\psi_\pm) = \pm \frac{\beta}{h} \cos \psi_\pm, \quad (4)$$

уравнение (3) не имеет решения, и горизонтальная грань непосредственно контактирует со стенкой.

В результате, если известна поверхностная энергия грани α_0 , а диапазон углов $\psi_+ - \psi_-$ достаточно мал, так что можно пренебречь различием $\varepsilon(\psi_+)$ и $\varepsilon(\psi_-)$, измерение зависимости $\theta_0(\psi)$ с использованием (4) является прямым методом определения энергии ступени:

$$\beta = \alpha_0 h t g \frac{\psi_+ - \psi_-}{2}. \quad (5)$$

Эксперимент. Рассмотренные капиллярные явления могут наблюдаться лишь в ⁴Не ниже 1.2 К – температуры фазового перехода ограничения плоскости (0001). В работе использовался оптический рефрижератор с предельной температурой 0.32 К. Кристаллы выращивались в металлической камере, имеющей форму цилиндра с внутренним диаметром 19 мм

¹⁾e-mail: keshishev@kapitza.ras.ru

и длиной 29 мм, в торцы которой через индиевые уплотнения вмонтированы оптические окна (рис.1). Ось камеры расположена горизонтально и совпадает с оптической осью всей установки. Камера закреплена в механизме, позволяющем поворачивать ее вокруг оси на угол $\pm 60^\circ$ в ходе эксперимента [3]. Сверху в камеру впаян капилляр заполнения. Плоское полированное дно находится в тепловом контакте с рефрижератором. Внутри камеры в верхней ее части расположен конденсатор, представляющий собой диэлектрический цилиндр $\varnothing 1.5$ мм, на который бифилярно в один слой намотаны два провода $\varnothing 30$ мкм в капроновой изоляции. При включении напряжения между проводами ~ 1 кВ напряженность поля между соседними витками составляет величину $\sim 10^6$ В/см. К внутренней поверхности камеры приклеены два стеклянных цилиндрических тела с образующими, параллельными оси камеры, основания которых примыкают к переднему и заднему окнам камеры и имеют форму, показанную на рис.1. Поверхности тел, обращенные внутрь камеры, оптически полированы и тщательно вымыты для обеспечения однородных условий смачивания. Конфигурация стеклянных стенок выбрана таким образом, что с увеличением высоты угол ψ изменяется для левой стенки от 30° до 57° , а для правой – от 55° до 29° .

Для получения ориентированного кристалла охлажденный до 0.9 К жидкий ^4He сдавливался до давления затвердевания 25.3 бар при включенном напряжении на конденсаторе. Электрическое поле инициирует возникновение твердой фазы на поверхности конденсатора, при этом зародыш имеет форму тонкой ограниченной пластинки (рис.2). После

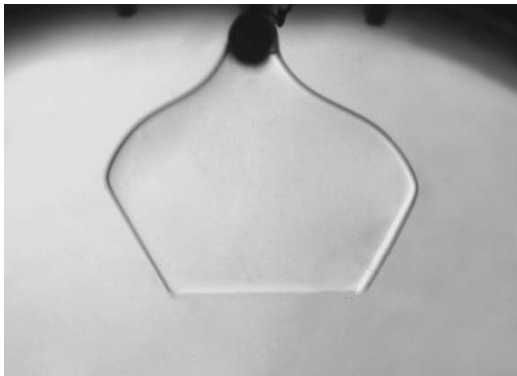


Рис.2. Кристалл в момент отделения от конденсатора

выключения напряжения кристалл, планируя, падает на горизонтальное дно. При этом грань (0001) с большой вероятностью оказывается горизонтальной [4]. Далее кристалл подрачивался до стеклянных стенок и мениск после установления равновесия

фотографировался при разной высоте кристалла. Фотографирование производилось в параллельном свете (расходимость пучка $\sim 10^{-4}$ рад), фотоаппарат при этом фокусировался на среднее сечение камеры zx (рис.3). Поскольку продольный размер кристалла

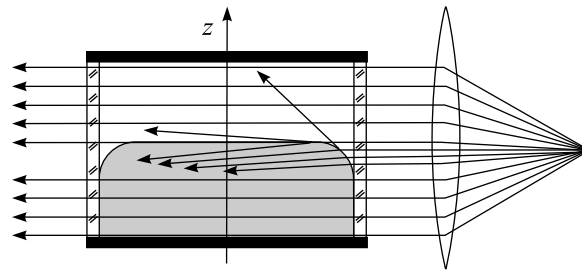


Рис.3. Оптическая схема эксперимента

(29 мм) значительно превышает капиллярную постоянную (~ 1 мм), искривлением поверхности вблизи окон можно пренебречь и считать задачу в плоскости zx двумерной. При прохождении параллельного пучка сквозь камеру доля света, попадающего на искривленную вблизи входного окна участок поверхности, частично (в пределах нескольких процентов) отражается, отклоняясь вверх. Остальная часть преломляется (предельный угол составляет 85.3°), образуя отклоненный вниз сходящийся пучок. Кроме того, к перераспределению света приводит дифракция на краях параллельных исходному пучку поверхностей кристалла и цилиндрических стеклянных стенок. Сосредоточенная вблизи поверхности дифракционная картина с характерным масштабом ~ 0.1 мм мало отличается от известного распределения интенсивности при дифракции параллельного пучка на прямолинейном краю полуплоскости. Это обстоятельство позволяет достаточно точно определить положение геометрической тени.

В результате, на фотографиях (рис.4) непосредственно под поверхностью кристалла наблюдается широкая темная, а под ней светлая области, обусловленные преломлением, и дифракционные полосы над ней. На рис.4 приведены три фотографии мениска при различной высоте кристалла. Масштаб по вертикали увеличен в три раза.

Цифровое изображение мениска со стенками обрабатывалось с помощью компьютерной программы, позволяющей определить угол наклона стенки ψ и угол наклона поверхности θ_0 в точке их пересечения. Основная погрешность измерений связана с наличием твердых частиц, оседающих на окна из жидкого гелия в наружном криостате, что приводит к большому количеству дефектов на изображении.

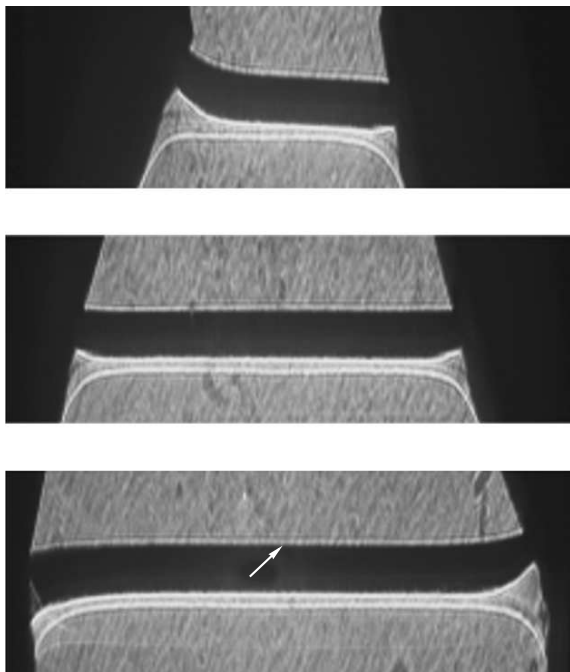


Рис.4. Три фотографии мениска при различной высоте кристалла. Масштаб по вертикали увеличен в три раза. На нижней фотографии стрелкой указано положение межфазной границы

Результаты компьютерной обработки представлены на рис.5, где показана зависимость $\theta_0(\psi)$ при температуре 0.75 К. Различные символы соответствуют левому и правому краям мениска. По причине невысокой точности эти данные следует рассматривать как предварительные. Тем не менее, можно констатировать, что угол θ_0 монотонно возрастает по мере увеличения угла ψ от $\sim 43^\circ$ до 57° . Та же тенденция наблюдается в интервале $31^\circ < \psi < \sim 34^\circ$. Следует отметить, что в области плато наблюдается систематическое отклонение ($\sim 1^\circ$) от ожидаемого значения $\theta_0 = 0$. Это отклонение, по-видимому, связано с несовершенством процедуры анализа изображения мениска.

Непосредственный выход грани (0001) на стенку реализуется в диапазоне $34^\circ \pm 2^\circ < \psi < 43^\circ \pm 2^\circ$.

Используя формулу (5) с известными данными для $\alpha_0 = 0.172 \text{ эрг/см}^2$ [5] и $h = 2.99 \text{ \AA}$, получаем значение энергии ступени для грани (0001): $\beta/h = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ эрг/см}^2$. Эта величина хорошо согласуется с более ранними данными [6], полученными с помощью измерения спектра кристаллизационных волн.

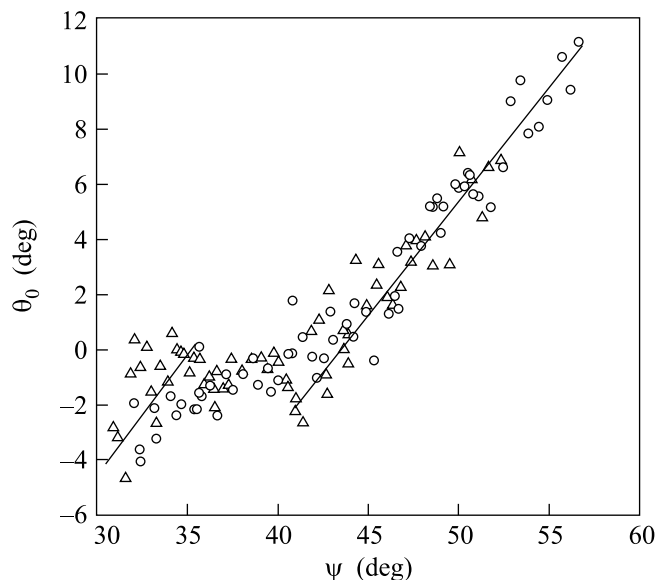


Рис.5. Зависимость угла наклона поверхности в точке касания θ_0 от угла наклона стенки ψ . Круглые символы относятся к левой стенке, треугольные – к правой

Точность наших измерений можно существенно повысить, усовершенствовав оптический тракт криостата и тем самым повысив качество изображения. Следует также несколько скорректировать конфигурацию стеклянных стенок, чтобы интервал $\psi_- < \psi < \psi_+$ был расположен в середине диапазона углов наклона стенки.

Мы благодарим В. И. Марченко, А. Я. Паршина и Е. Р. Подольяка за полезные обсуждения. Работа поддержана грантом Президента РФ НШ # 5763.2006.2.

1. Л. Д. Ландау, *О равновесной форме кристаллов*. – *Собрание трудов*, т.2, М.: Наука, 1969, с. 119–125.
2. В. И. Марченко, А. Я. Паршин, Письма в ЖЭТФ **83**, 485 (2006).
3. К. О. Keshishev and O. A. Andreeva, in *Excitations in Two-Dimensional and Three-Dimensional Quantum Fluids*, Eds. A. F. G. Wyatt and H. J. Lauter, Plenum press, New York, 1991.
4. К. О. Кешишев, А. Я. Паршин, А. В. Бабкин, ЖЭТФ **80**, 716 (1981).
5. O. A. Andreeva and K. O. Keshishev, Phys. Scr. **39**, 352 (1991).
6. E. Rolley, S. Balibar, C. Guthmann, and P. Nozieres, Physica B **210**, 397 (1995).