

Образование и кинетика роста аномального состояния кристалла ^4He ниже 0.45 К

В. Л. Цымбаленко¹⁾

Российский научный центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

Институт сверхпроводимости и физики твердого тела

Поступила в редакцию 4 февраля 2003 г.

Определена диаграмма аномального состояния кристаллов ^4He в интервале 0.2–0.45 К. Показано согласие с диаграммой “взрывоподобного” роста бездислокационной грани, что подтверждает ранее высказанное предположение об общности этих эффектов. Сформулированы требования к теоретической модели явления. Измерена зависимость скорости роста граней в аномальном состоянии до пересыщений ~ 20 мбар. Обнаружено, что выше ~ 8 мбар скорость роста выходит на константу ~ 3.5 м/с.

PACS: 67.90.+z

Аномальное состояние кристаллов ^4He с необычайно высокой скоростью роста образуется ниже 0.78 К при пересыщениях $Dp \sim 15$ мбар и исследовано до температуры ~ 0.45 К [1, 2]. Этот температурный диапазон расположен ниже первого, $T_{R1} = 1.28$ К, и второго, $T_{R2} = 0.9$ К, но выше третьего $T_{R3} = 0.35$ К, перехода ограничения [3]. Понижение температуры предоставляет уникальную возможность для выяснения вопроса, влияет ли переход ограничения на образование аномального состояния. Из эксперимента известно [4], что возникновение аномального состояния приводит к одновременному увеличению скорости роста как базисных, так и боковых граней, равновесных в этом температурном диапазоне, то есть к одновременному переходу граней в состояние с высокой кинетикой роста. Нет оснований утверждать, что это справедливо и для третьего перехода ограничения. Грани, образующиеся при этом переходе, имеют индексы Миллера ($10\bar{1}1$). Если ниже T_{R3} эти грани имеют обычную, медленную скорость роста, присущую кристаллам в нормальном состоянии, то время роста кристалла возрастет на два-три порядка.

Нами высказывалось предположение [5], что эффект аномального состояния и “взрывоподобный” рост бездислокационной грани [6] имеют общие физические корни. Это предположение основывалось как на общих чертах явления, так и на сходстве $Dp^* - T$ -диаграмм существования аномального и “взрывоподобного” роста. Однако имеется разрыв между нижней точкой наших измерений ~ 0.45 К и верхней точкой ~ 0.25 К, полученной в работе [6]. Из-

мерения ниже 0.4 К помогут проверить согласование этих фазовых диаграмм.

Измерения в этой области температур дают дополнительную информацию о кинетике роста кристалла в аномальном состоянии. Ранее наблюдалось увеличение скорости роста по мере охлаждения. Однако интервал измерений был мал, что не позволяло определить характер температурного хода подвижности поверхности. Кроме того, скорость роста спадала к границе аномальной области, что, по видимому, связано с кинетикой образования состояния, а не с диссипативными механизмами, определяющими кинетику роста в аномальном состоянии. Это обстоятельство требует измерений скорости роста в глубине аномальной зоны, желательно в области, где критическое пересыщение Dp^* возникновения состояния мало зависит от температуры, то есть ниже 0.4 К.

Результаты измерений. Фазовая диаграмма.

Методика измерений и конструкция контейнера ранее подробно описаны в ряде работ [2, 5]. Поэтому вкратце приведем только основные детали эксперимента. Кристалл гелия зарождался импульсом электростатического поля в центре цилиндрического контейнера объемом 1.8 см^3 . Подобная методика позволяет устанавливать начальное пересыщение Dp в интервале от нуля (давление фазового равновесия) до максимального, определяющегося спонтанным зародышеобразованием на внутренней стенке контейнера. Изменение давления в процессе роста измерялось емкостным датчиком с временным разрешением 35 мкс. Температура 0.48 К достигалась откачкой паров ^3He и служила стартовой точкой для магнитного охлаждения парамагнитной солью (хромока-

¹⁾e-mail: VLT@issph.kiae.ru

лиевые квасцы). Измерение температуры выполнялось термометром Matsushita, расположенным внутри контейнера в контакте со сверхтекучем гелием.

На рис.1 представлены результаты измерений фазовой диаграммы [2], дополненные данными до 0.2 K .

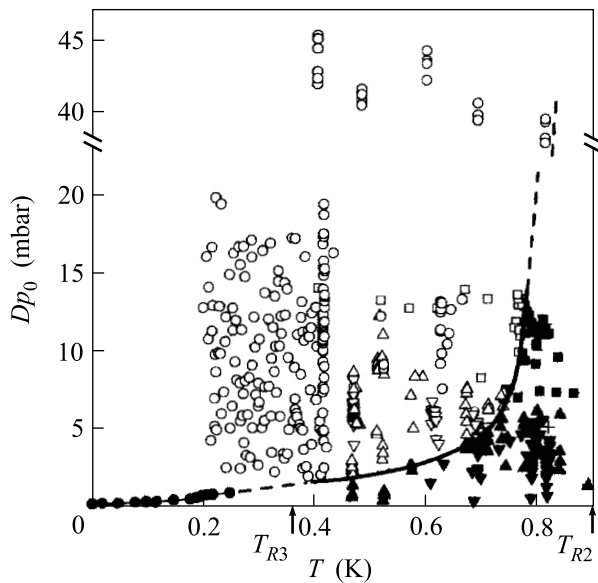


Рис.1. Диаграмма аномального состояния. Светлые кружки – быстрый рост, черные – нормальный медленный рост кристаллов. Стрелками отмечены температуры второго и третьего переходов ограничения

В данном контейнере порог спонтанного зародышеобразования на стенке составлял около 20 мбар, но в некоторых опытах (см. рисунок) доходил до 45 мбар. Это позволило продлить фазовую диаграмму в область более высоких температур (штриховая линия). К сожалению, такие высокие пересыщения не воспроизвелись при повторном эксперименте, что не позволило точнее локализовать фазовую границу, так что штриховая линия в области высоких пересыщений – это нижняя граница перехода.

Второй результат этих измерений – отсутствие каких-либо особенностей на фазовой диаграмме и в кинетике роста в точке третьего перехода ограничения. Таким образом, переход в аномальное состояние сообщает высокую скорость роста и граням ($10\bar{1}1$).

Третий вывод состоит в согласии диаграмм аномального и “взрывоподобного” роста. Как видно из графика, все кристаллы, образовавшиеся выше линии, соединяющей эти две области, демонстрируют рост с высокой скоростью. Следует учесть также то обстоятельство, что, как было наблюден экспериментально [7], аномальное состояние образуется за конечное время, спадающее по мере увеличения на-

чального пересыщения. В экспериментах по “взрывоподобному” росту это проявлялось в статистическом характере возникновения состояния [6]. В наших экспериментах время роста кристаллов в нормальном состоянии $\leq 10\text{ мс}$, так что для наблюдения эффекта быстрого роста необходимо, чтобы кристалл перешел в аномальное состояние за это время. В экспериментах по “взрывоподобному” росту время, в течение которого кристаллическая грань находится под воздействием избыточного давления, на несколько порядков больше и составляет $\sim 10\text{ с}$. Из этого следует, что наши эксперименты дают значения критического пересыщения для времени образования $0.1\text{--}10\text{ мс}$, которое должно быть больше значений, полученных в экспериментах с медленным увеличением давления над гранью [6] (время образования $\sim 1\text{--}10\text{ с}$). С учетом этого замечания, обе фазовые диаграммы хорошо согласуются. Это подкрепляет высказанное ранее предположение об общности этих явлений [5]. Подобная идентификация еще больше сужает круг возможных механизмов, порождающих это явление. Очевидно, что теперь следует исключить из рассмотрения эффекты, связанные с топологическими дефектами строения поверхности (оценивались в работе [7]), так как “взрывоподобный” рост наблюдался именно на грани, свободной от них. Также отпадают механизмы, связанные с вихрями в сверхтекучем гелии [7], так как в экспериментах [6] грань до начала быстрого роста была практически неподвижна, то есть отсутствовали потоки жидкости.

Еще одним доводом в пользу общности явлений [2] и [6] служит влияние примесей на фазовую диаграмму. Величина критического пересыщения начала “взрывоподобного” роста возрастает при добавлении $10\text{--}50\text{ ppm}$ примеси ^3He , то есть область быстрого роста сдвигается вверх [6]. Наши эксперименты с 180 ppm примеси находятся на начальном этапе, но уже можно утверждать, что добавление ^3He также приводит в диапазоне температур $0.64\text{--}0.78\text{ K}$ к сдвигу критического пересыщения Dp^* вверх.

Суммируем основные черты возникновения аномального состояния с высокой скоростью роста:

- 1) состояние возникает за конечное время, уменьшающееся с ростом пересыщения;
- 2) время образования возрастает с ростом температуры;
- 3) критическое пересыщение Dp^* , измеренное при фиксированном времени образования, монотонно возрастает с ростом температуры;
- 4) процесс имеет статистический характер;
- 5) переход приводит к одновременному изменению кинетики роста всех граней, как эксперимен-

тально показано для всех трех известных переходов ограничения;

6) возникновение аномального состояния не связано ни с топологическими дефектами поверхности, ни с вихрями в жидкости.

Всем этим требованиям пока не удовлетворяет ни одна гипотеза.

Скорость роста. Рост кристалла с высокой скоростью вызывает радиальные колебания жидкости в контейнере и приводит к осциллирующему характеру роста. В работе [8] предложено использовать значение отношения амплитуды первого минимума давления к начальному пересыщению для определения среднего кинетического коэффициента роста K в первые 100 мкс, определенного следующим образом:

$$V = K \frac{\Delta\rho}{\rho\rho'} Dp,$$

где V – скорость роста поверхности кристалла, ρ и ρ' – плотности жидкого и твердого гелия, $\Delta\rho = \rho' - \rho$, Dp – пересыщение. Существенным предположением этого метода является постоянство K , то есть линейность скорости роста по пересыщению. Если это условие нарушается, то данную методику можно использовать для полуколичественной оценки скорости роста, определив среднюю скорость роста кристалла на первой полуволне, где давление падает от первоначального значения Dp_0 до нуля, как

$$\langle V \rangle = \langle K \rangle \frac{\Delta\rho}{\rho\rho'} \frac{Dp_0}{2}.$$

Результаты такой обработки приведены на рис.2. Вверху показана зависимость средней скорости роста от пересыщения, объединяющая результаты измерений работы [7] и настоящей. Видно, что выше ~ 8 мбар скорость роста доходит до насыщения, с предельным значением ~ 3.5 м/с. На нижнем графике приведены данные температурного хода средней скорости роста при двух пересыщениях, выполненных как оптическими методами, так и по скорости спадания давления во время роста. Ниже 0.35 К при обоих значениях пересыщений скорость в пределах точности измерений выходит на константу 3–3.5 м/с. Отметим отсутствие резкой зависимости скорости роста от температуры, характерной как для атомно-шероховатых поверхностей [9], так и для граней в нормальном состоянии [10]. Значение максимальной скорости роста на порядок ниже критической скорости в сверхтекучем гелии 46 м/с при давлении 25 атм [11]. Отметим, что скорости подтекающего к кристаллу гелия еще на порядок меньше, ~ 0.3 м/с. Таким образом, максимальная скорость роста поверхности не связана с критическими скоростями в жидком гелии.

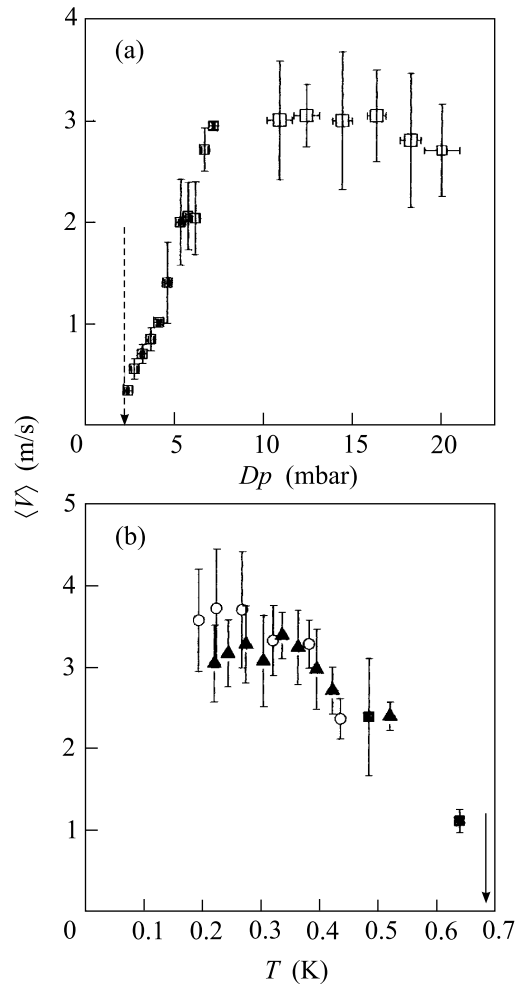


Рис.2. (а) – зависимость средней скорости роста от пересыщения при $T = 0.45$ К. Стрелкой указано пороговое пересыщение при данной температуре. (б) – температурная зависимость скорости при двух фиксированных пересыщениях 6.5 мбар (треугольники и квадраты) и 20 мбар (кружки). Квадраты – определение скорости роста оптическим методом, кружки и треугольники – по осцилляциям давления. Стрелкой указана температура перехода при $Dp_0 = 6.5$ мбар

Модель спирального роста, развитая в работе [6], учитывает присоединенную массу, перенормировку линейной энергии движущейся ступени, локализацию перегибов ступени при высоких пересыщениях и черенковское излучение фононов. Если подвижность ступени при высоких пересыщениях обусловлена локализацией перегибов, то теория [6] предсказывает выход скорости роста грани на константу. Пересыщение Dp_{sat} оценивается как (параметры выражены в единицах СГС)

$$Dp_{\text{sat}} \approx \frac{\rho}{\Delta\rho} \frac{1}{a\sqrt{\eta\mu_0}}, \quad \eta = (430 \div 960), \quad \mu_0 \sim 3 \cdot 10^7 \frac{1}{T^3},$$

а предельная скорость спирального роста

$$V_{\max} = \frac{\Lambda}{2\pi} \frac{1}{(\beta/a)\eta}, \quad \frac{\beta}{a} = 0.011,$$

где a – параметр решетки. Численные оценки показывают (параметры взяты из работы [6]), что при 0.45 К для этой модели выход на константу должен происходить при ~ 0.8 мбар, а максимальная скорость грани ~ 0.01 см/с. Эти значения существенно меньше наблюдаемых нами в эксперименте, так что спиральный рост не ответственен за насыщение скорости роста грани выше 8 мбар.

Измерения роста поверхности кристаллов гелия при пересыщениях 0.15–0.4 бар и температурах 0.1, 0.6 и 0.85 К были выполнены Графом и Марисом [12] ультразвуковыми методами. К сожалению, непосредственное сравнение наших данных с результатами этой работы невозможно по ряду причин: измерения выполнялись на атомно-шероховатых поверхностях, а не гранях, как в нашем случае; их минимальное пересыщение на порядок выше нашего максимального. Отметим только, что в этой работе достигнуты скорости роста поверхности 5–10 м/с, а кинетический коэффициент роста при больших амплитудах лежит в интервале 2–20 с/м, то есть сравнимы с нашими значениями.

Основной результат работы – объединение двух качественно близких явлений и формулирование

требований к физическому механизму, ответственному за аномально быстрый рост кристаллов. Остается пока неясным механизм эффективного торможения граней кристалла при достижении ими скоростей ~ 4 м/с.

Автор признателен А. Я. Паршину за обстоятельные обсуждения результатов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 02-02-16772.

-
1. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. **A211**, 177 (1996).
 2. V. L. Tsymbalenko, J. Low Temp. Phys. **121**, 53 (2000).
 3. S. Balibar, F. Gallet, and P. E. Wolf, Phys. Rev. Lett. **51**, 1366 (1983).
 4. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. **A248**, 267 (1998).
 5. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. **A257**, 209 (1999).
 6. A. V. Babkin, P. J. Hakonen, A. Ya. Parshin et al., J. Low Temp. Phys. **112**, 117 (1998).
 7. В. Л. Цымбаленко, ЖЭТФ **119**, 1182 (2001).
 8. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. **A274**, 223 (2000).
 9. К. О. Кешишев, А. Я. Паршин, А. В. Бабкин, ЖЭТФ **80**, 716 (1981).
 10. S. Balibar, F. Gallet, P. Nozieres et al., J. de Physique **46**, 1987 (1985).
 11. O. W. Dietrich, E. H. Graf, C. H. Huang, and L. Passel, Phys. Rev. **A5**, 1377 (1972).
 12. M. J. Graf and H. J. Maris, Phys. Rev. **B35**, 3142 (1987).