

Возникновение аномальной фазы кристалла ^4He в присутствии малой примеси ^3He

В. Л. Цымбаленко¹⁾

Российский научный центр “Курчатовский институт”,
Институт сверхпроводимости и физики твердого тела, 123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 сентября 2003 г.

В диапазоне температур 0.2–0.7 К до пересыщений ~ 30 мбар исследована кинетика образования аномальной фазы из раствора с малой примесью ^3He . Определена фазовая диаграмма нормального и аномального роста. Обнаружено, что присутствие примеси тормозит образование быстрорастущего состояния. Этот экспериментальный факт указывает на существенное влияние диссипативных процессов в жидкости на кинетику образования фазы. Торможение, возможно, является следствием непосредственного взаимодействия примеси с поверхностью кристалла.

PACS: 67.90.+z

1. Введение. Резкий переход кристалла гелия из состояния с медленной кинетикой роста в фазу со скоростями, на несколько порядков большими, к настоящему времени не имеет пока теоретического объяснения [1–8]. Неясно даже, связан ли переход с изменением объемных или поверхностных свойств кристалла. С одной стороны, одновременное увеличение скорости всех граней, как ниже второго [2], так и третьего переходов ограничения [8], говорит в пользу объемного механизма. Логично было бы ожидать, что грани различных кристаллографических ориентаций, имеющие разные температуры перехода ограничения и параметры поверхности (например, линейную энергию ступени, межплоскостное расстояние), будут претерпевать переход в аномальное состояние при различных пересыщениях. С другой стороны, в этой области температур объемные термодинамические параметры жидкости и кристалла (в том числе и перечисленные выше) не имеют особенностей и слабо зависят от температуры. Это не объясняет существенного роста с температурой критического пересыщения Dp_0 , с которого начинается переход [5]. Общий вид зависимости сходен с ростом концентрации нормальной компоненты, определяющей кинетику ступеней на поверхности грани. Это, в свою очередь, свидетельствует в пользу поверхностного механизма образования аномального состояния.

Введение малой примеси ^3He существенно изменяет кинетику поверхностных дефектов [9], но мало, в меру концентрации, воздействует на объемные термодинамические параметры. Эксперимент с примесью позволяет получить дополнительные доводы

в пользу одной или другой гипотезы. Кроме того, влияние даже малой концентрации примеси может быть очень существенным при низких температурах. Согласно теоретическим оценкам [10] и экспериментальным данным [11, 12], примесь адсорбируется на границе раздела жидкость–кристалл, причем глубина потенциальной ямы ~ 4 К. Тогда при наших концентрациях ниже ~ 0.4 К заселенность адсорбированного слоя порядка единицы и на поверхности образуется слой двумерной ферми-жидкости. Образование такого слоя, вообще говоря, может привести к существенному изменению кинетики образования аномального состояния.

Ранее сообщалось, что введение малой примеси ^3He приводит к увеличению критического пересыщения при 0.68 К [8] и в диапазоне $2m$ К – 0.2 К [3]. В данной работе приводятся измерения в растворе с атомной концентрацией $x = 180$ ppm при температурах 0.2–0.7 К.

2. Методика измерения и экспериментальные результаты. Методика измерений и конструкция контейнера ранее подробно описана в ряде работ [5, 7]. Поэтому вкратце приведем только основные детали эксперимента. Кристалл гелия зарождался импульсом электростатического поля в центре цилиндрического контейнера объемом 1.8 см³. Подобная методика позволяет устанавливать начальное пересыщение Dp_0 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

¹⁾e-mail: vlt@issph.kiae.ru

точкой для магнитного охлаждения парамагнитной солью (хромокалиевые квасцы). Измерение температуры выполнялось термометром Matsushita, расположенным внутри контейнера в контакте со сверхтекучим гелием.

Введение примеси заметно повлияло на кинетику роста кристаллов, что хорошо видно по записям падения давления в контейнере во время роста. Общая тенденция – замедление роста, но кривые изменения давления имеют теперь более сложный характер и не описываются, как в чистом гелии, единственным коэффициентом роста [13]. Анализ кинетики теперь требует учета потоков тепла и примеси в жидкости, что является достаточно сложной задачей. По этой причине в данной работе представлены результаты, качественно не изменившиеся при введении примеси. К этому типу относится переход в аномальное состояние, который, как и в чистом гелии, регистрируется по резкому падению давления благодаря изменению кинетики роста [4]. Таким образом, и в растворах увеличение скорости роста на несколько порядков происходит скачкообразно. Время роста кристалла падает после перехода до ~ 0.2 мс, каковое, как было показано в работах [6, 7], определяется осциллирующей модой роста. Качественное подобие процессов образования аномального состояния в чистом гелии и в растворе дает возможность построить фазовую диаграмму аномального состояния и определить кинетику его образования, измеряя время задержки от момента рождения кристалла до скачка давления.

На рис.1 представлены результаты измерений фазовой диаграммы. Видно, что граница, разделяющая аномальный и нормальный рост, теперь сдвинулась в область более высоких пересыщений относительно ее положения в чистом гелии [5]. Резкий подъем критического пересыщения, наблюдаемый в чистом гелии выше ~ 0.75 К сдвинулся в область низких температур к ~ 0.6 К. Таким образом, малая примесь ^3He затормозила образование аномального состояния. Этот же факт отражает график зависимости времени задержки от пересыщения (см. рис.2). Понижение температуры, как и в чистом гелии, уменьшает задержку – интервал времени между образованием кристалла и переходом в аномальное состояние. Задержка по-прежнему сильно зависит от пересыщения. Заметим, что в данной серии экспериментов не зарегистрированы большие задержки, как в чистом гелии, где это время доходило 200 мс. Причина этого, возможно, состоит в более крутой, чем в чистом гелии зависимости времени задержки $\tau(Dp_0)$. Тогда, вследствие сравнительно небольшой статистики, мы просто не попадаем на этот участок. Этот вывод подтвержда-

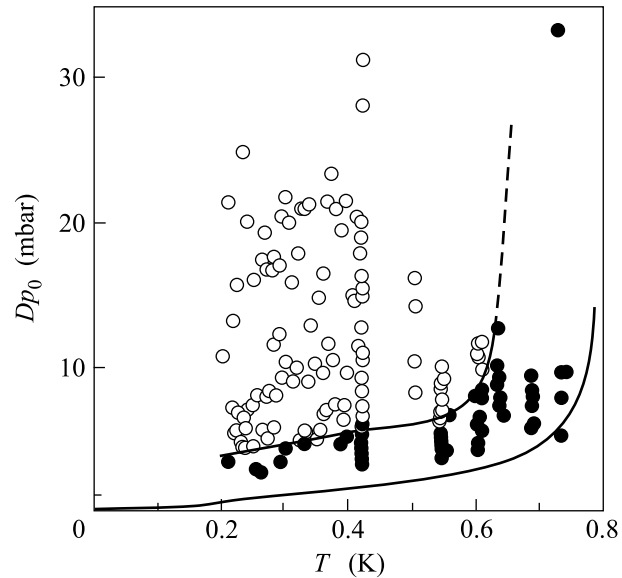


Рис.1. Фазовая диаграмма аномального состояния в растворе с концентрацией 180 ppm. Светлыми кружками изображены точки, где наблюдался переход в аномальное состояние, черные кружки – нормальный рост. Нижняя кривая – положение границы, разделяющей эти две области, в чистом гелии

ется результатами прямых измерений задержки, см. рис.2. Значения задержки в растворе больше значений в чистом гелии, что согласуется со сдвигом вверх границы аномальной области на рис.1. Отметим, что в данной методике переход регистрируется только в течение времени роста кристалла (20–200 мс), так что граница на рис.1 проведена для задержек, меньших указанных времен.

Влияние примеси на возникновение аномальной фазы изучалось в работе [3], где в растворе с концентрацией 10 ppm и 50 ppm измерялось кумулятивное распределение вероятности ее появления. Нормированное распределение $N(Dp)$ связано с вероятностью возникновения аномального состояния w соотношением

$$N = 1 - \exp\left(-\frac{1}{c} \int_0^{Dp} w(x) dx\right), \quad Dp(t) = ct, \quad (1)$$

см. формулу (38) работы [3]. Обратив это выражение, найдем среднее время образования аномального состояния (задержку) по формуле

$$\frac{1}{w} = \left\{ -c \frac{d[\ln(1-N)]}{d(Dp)} \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Результат такой обработки при температуре ~ 0.25 К приведен на рис.3. Данные работы [3], как и наши

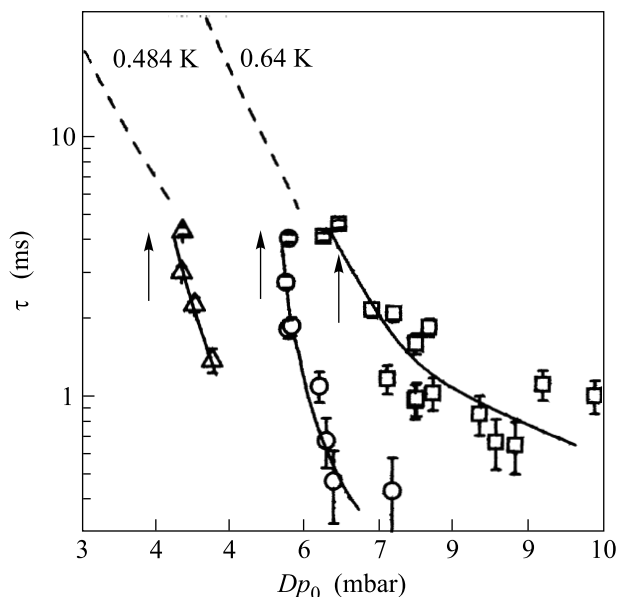


Рис.2. Зависимости времени задержки от начального пересыщения при трех температурах: треугольники – $T = 0.24$ К, кружки – $T = 0.42$ К и квадраты – $T = 0.545$ К. Штриховые кривые показывают ход зависимостей в чистом гелии. Сплошные кривые проведены для наглядности. Стрелки слева от точек показывают значения критического пересыщения для этих температур по диаграмме аномального состояния, см. рис.1

результаты, демонстрируют возрастание времени задержки при введении примеси в гелий. Сравнение численных значений нельзя провести из-за большого разрыва данных (три порядка по времени задержки), но общая тенденция – ускорение процесса образования аномального состояния с увеличением пересыщения – одинакова в обеих областях измерений. Исходя из тенденции результатов работы [3], можно предположить, что кривая $\tau(Dp_0)$ должно пройти правее и выше точек, измеренных в растворе с $x = 50$ ppm. Тогда единая зависимость $\tau(Dp_0)$ действительно будет иметь быстрый рост в диапазоне задержек 10–1000 мс, как предполагалось ранее (см. выше).

3. Обсуждение результатов. Измерения в растворе дали дополнительные свидетельства в пользу идентичности наблюдаемого нами аномального перехода и “burst-like growth”, обнаруженного в работе [3]. Это предположение, высказанное в работе [4], подтвердилось в чистом гелии после измерений до 0.2 К [8].

Первые измерения воздействия примеси на кинетику образования аномального состояния были проведены в диапазоне температур 2–250 мК [3]. При таких температурах растворимость ^3He в кристалле экспоненциально мала, и воздействие примеси огра-

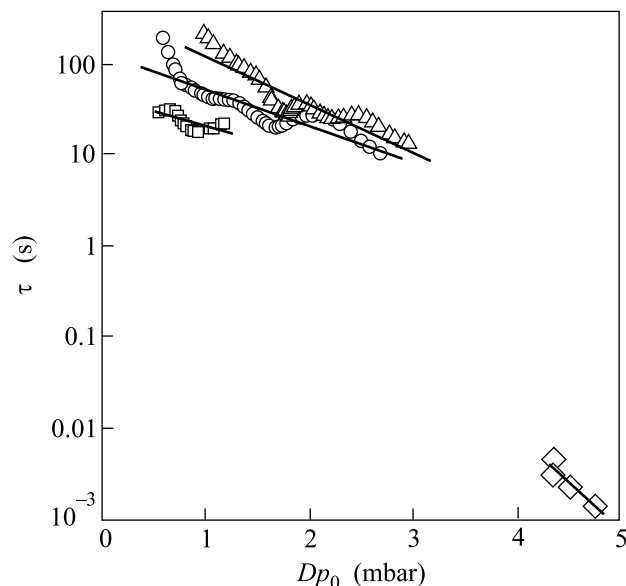


Рис.3. Зависимость времени задержки от начального пересыщения. Ромбы – данные этой работы, $T = 0.24$ К, $x = 180$ ppm; квадраты, кружки и треугольники – результаты работы [3], пересчитанные по формуле (2), $T = 0.25$ К, концентрация: квадраты – $x = 0.1$ ppm, кружки – $x = 10$ ppm, треугольники – $x = 50$ ppm. Прямые проведены методом наименьших квадратов

ничивается рассеянием ее атомов на поверхности и наличием адсорбционного слоя. Эксперименты по росту грани в этих условиях [9] с концентрацией $x = 40$ – 220 ppm показали, что кинетика роста хорошо описывается только рассеянием квазичастиц на ступенях, то есть насыщенный адсорбированный слой не оказывает на кинетику заметного влияния. Выше 0.2 К влияние примеси такой концентрации на движение ступеней пренебрежимо мало. В нашем интервале температур есть две особенные точки, соответствующие: (а) равенству концентраций в обеих фазах $T_x \approx 0.6$ К и (б) началу формирования насыщенного адсорбированного слоя $T_{ad} \approx 0.45$ К. Выше T_x равновесная концентрация примеси больше в твердой фазе, ниже по температуре – больше в жидкости (см. работу [14] и ссылки в ней). В самой точке равенство концентраций приводит к тому, что рост кристалла не инициирует диффузионные потоки примеси в объеме и не порождает дополнительную диссипацию, тормозящую рост [15]. Если бы роль потоков примеси состояла только в замедлении кинетики роста, то в точке T_x должна была бы наблюдаться особенность – уменьшение критического пересыщения. Однако, как видно из рис.1, таковая особенность не наблюдается. Это означает, что замедление возникновения аномального состояния не обусловле-

но только изменением ростовой кинетики. Это косвенно подтверждается слабым температурным ходом критического пересыщения ниже 0.6 К. Действительно, ниже этой температуры концентрация примеси в твердой фазе начинает быстро, по экспоненциальному закону, уменьшаться. При росте кристалл “сгребает” примесь, так что в кинетику роста теперь входит и характерное время рассасывания избыточной концентрации перед поверхностью. Но, как видно из рис.1 и 2, это явление не нашло отражения ни на фазовой диаграмме, ни на зависимостях времен задержки.

Вторая температурная точка соответствует переходу адсорбционного слоя из состояния разреженного двумерного газа в состояние вырожденного двумерного ферми-газа. Характер влияния адсорбированного слоя на кинетику образования аномального состояния совершенно неизвестен. Поэтому ограничимся лишь констатацией факта, что при температуре T_{ad} не наблюдается никаких аномалий в фазовой диаграмме и скорости образования состояния, см. рис.1, 2.

Суммируя результаты, отметим, что введение примеси затормозило образование аномального состояния. Это воздействие, однако, не может быть объяснено в рамках изменения только кинетики роста поверхности – изменением подвижности, например, ступеней. Тем не менее, такой характер воздействия примеси на аномальное состояние указывает на опре-

деляющую роль поверхности в образовании быстро растущей фазы.

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, Phys. Lett. **A248**, 267 (1998).
3. A. V. Babkin, P. J. Hakonen, A. Ya. Parshin и др., J. Low Temp. Phys. **112**, 117 (1998).
4. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. **A257**, 209 (1999).
5. V. L. Tsymbalenko, J. Low Temp. Phys. **121**, 53 (2000).
6. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. **A274**, 223 (2000).
7. В. Л. Цымбаленко, ЖЭТФ **119**, 1182 (2001).
8. В. Л. Цымбаленко, Письма в ЖЭТФ **77**, 288 (2003).
9. V. Tsepelin, J. P. Saramaki, A. V. Babkin et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 4804 (1999).
10. J. Treiner, J. Low Temp. Phys. **92**, 1 (1993).
11. E. Rolley, S. Balibar, C. Guthmann, and P. Nozieres, Physica **B210**, 397 (1995).
12. В. Л. Цымбаленко, ЖЭТФ **108**, 686 (1995).
13. Л. А. Максимов, В. Л. Цымбаленко, ЖЭТФ **114**, 1313 (1998).
14. S. Balibar and D. O. Edwards, Phys. Rev. **B39**, 4083 (1989).
15. S. N. Burmistrov and L. B. Dubovskii, Europhys. Lett. **24**, 749 (1993).