Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 1, с. 33 – 37

Наблюдение режима “burst-like growth” на кристаллах ^{4}He, зарожденных в метастабильной жидкости

В. Л. Цымбаленко[1)]

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, 117334 Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 ноября 2020 г.
После переработки 20 ноября 2020 г.
Принята к публикации 21 ноября 2020 г.

На кристаллах, содержащих ростовые дефекты, удалось воспроизвести режим “*burst-like growth*” — резкое ускорение роста граней. Это подтвердило гипотезу об одинаковости физических механизмов, ответственных за переход граней в состояние аномально быстрого роста при высоких и низких температурах. Выяснено, что переход от быстрой кинетики роста граней кристалла к медленной происходит скачком. Обнаружена схожесть процесса релаксации кинетического коэффициента роста с релаксацией упругих модулей кристалла по завершении этапа быстрого роста. Определены кинетические коэффициенты роста на этапах быстрого и медленного роста.

DOI: 10.31857/S1234567821010055

1. Введение. Удивительный рост кристаллов гелия обнаружен в 1996 г. Суть эффекта состоит в неожиданном ускорении роста граней монокристалла ^{4}He при превышении граничного пересыщения p_b, зависящего от температуры. В серии экспериментов в диапазоне 2–250 мК [1, 2] наблюдалось, что c-грань кристалла без ростовых дефектов неподвижна до достижения этого значения пересыщения. Затем происходит быстрый рост, сопровождающийся резким падением давления. Перемещение положения c-грани фиксировалось оптической методикой. В серии экспериментов в диапазоне 0.4–0.75 K кристалл зарождался в метастабильной сверхтекучей жидкости [3]. В этой области температур кинетика его роста определяется наиболее медленно растущими участками поверхности, т.е. c- и a-гранями. Кристалл растет в виде гексагональной призмы. После зарождения кристалл растет медленно, что сопровождается постепенным падением давления в контейнере. Внезапно кинетический коэффициент роста всех граней скачком возрастал на 2–3 порядка. В результате происходил быстрый рост всего кристалла за время ~ 200 мкс, что сопровождалось резким падением давления. Форма и размер кристалла на этом этапе регистрировалось видеосъемкой. Обзор экспериментальных методик, фазовая диаграмма $\Delta p_b(T)$, отображающая область возникновения аномально быстрого роста кристаллов, графики вероятности возникновения состояния “*burst-like growth*”, возврата в нормальное состояние, воздействие примесей и т.д. даны в ссылке [4].

К настоящему моменту хорошо экспериментально изучены условия возникновения аномального роста. По видеосъемке формы кристаллов на этапе быстрого роста стало ясно, что переход a- и c-граней к высокой кинетики происходит с задержкой менее 40 мкс, см. [4], п. 4.4. С обратным процессом ситуация менее определенная. По записям давления в экспериментах [1, 2], измеренных датчиком давления с невысоким временным разрешением, можно только утверждать, что через $\sim$1 с грань возвращается к прежнему неподвижному состоянию. В экспериментах [4] п. 4.5 удалось сузить временную рамку и показать, что возврат к нормальной медленной кинетике роста происходит через 20–100 мс.

Схожесть фазовых диаграмм, вероятностный характер возникновения состояния “*burst-like growth*” и влияния малой примеси на диаграмму $\Delta p_b(T)$ свидетельствуют в пользу предположения, что в разных температурных диапазонах наблюдается явление с одним и тем же физическим механизмом. Тем не менее, этот вопрос остается открытым. В интервале температур в 0.4–0.75 K экспериментально не удалось до сих пор воспроизвести режим роста, подобного тому, что наблюдался в работах [1, 2]. Таким образом, в этих опытах наблюдался только однократный переход из нормального режима роста к аномальному. Попытки создать высокое пересыще-

1)e-mail: vlt49@yandex.ru

ние в контейнере с кристаллом в нормальном состоянии не удались по следующей причине. Кристаллы, рожденные в метастабильной жидкости, в отличие от кристаллов работ [1, 2], содержали ростовые дефекты [5]. Вследствие этого при нагнетании жидкости в контейнер кристалл рос, поглощая большую часть поступающей жидкости. Необходимое пересыщение не создавалось.

В данной работе представлены результаты измерений методикой, в которой частично преодолены ограничения предыдущих экспериментов. Внутренний объем контейнера уменьшен в ~ 50 раз, что уменьшило размер кристалла и, соответственно, площадь его поверхности роста. Импеданс капилляра напуска уменьшен на порядок. Это позволяет при тех же возможностях внешней системы создания давления существенно увеличить поток гелия в контейнер.

2. Экспериментальная методика и результаты. Кристаллы выращивались в контейнере по методике, отлаженной ранее в работах [4], п. 2. Внутренний объем контейнера равнялся 80 мм^3. Вольфрамовая игла для зарождения кристаллов в метастабильной жидкости размещалась в центре контейнера. Одна из стенок контейнера являлась мембраной емкостного датчика с инерционностью 160 мкс. Принципиальное отличие данной методики от предыдущей состоит в том, что зарождение кристалла и его последующий рост происходят во время непрерывного потока жидкости в контейнер. Эксперименты выполнялись при двух температурах 0.49 и 0.74 К. Верхний предел пересыщений определяется спонтанным зарождением кристалла на внутренней стенке контейнера. В данных экспериментах величины пересыщения лежат в диапазоне 0.1–5 мбар. Кинетический коэффициент роста К определяется выражением:

$$V_{\mathrm{sur}\,f} = K\frac{\Delta\rho}{\rho\rho'}\Delta p, \qquad (1)$$

где $V_{\mathrm{sur}\,f}$ – скорость роста поверхности, ρ и ρ' – плотности жидкого и твердого гелия, $\Delta\rho = \rho' - \rho > 0$. Пересыщение Δp отсчитывается от давления фазового равновесия. Поток жидкости в контейнер приводит к постоянному росту кристалла, $V_{\mathrm{sur}\,f} \approx \mathrm{const}$. Создаваемое пересыщение обратно пропорционально кинетическому коэффициенту роста K. Таким образом, нормальный медленный рост кристалла происходит при высоких пересыщениях, а в режиме “burst-like growth” пересыщение уменьшается на порядки. На записях давления видны оба таких процесса.

Величина пересыщения Δp_0 при зарождении кристалла определяет его режим роста. На рисунке 1 по-

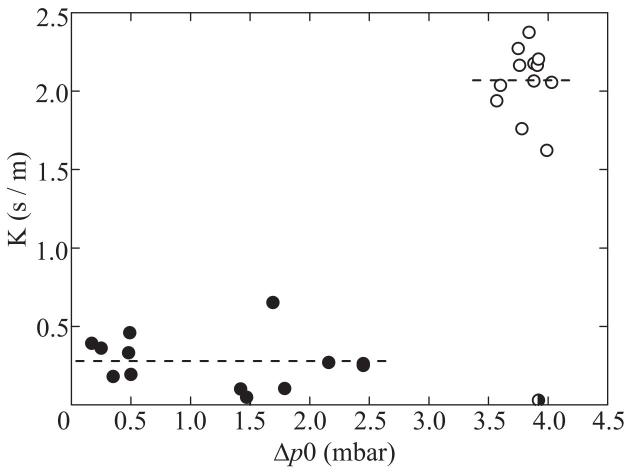

Рис. 1. Зависимость среднего кинетического коэффициента роста кристаллов от начального пересыщения Δp_0 при $T = 0.74$ К. Открытые кружки соответствуют кристаллам с аномально быстрым ростом. Сплошные кружки – кристаллы с нормальной медленной кинетикой роста граней за счет ростовых дефектов. Наполовину закрашенный кружок демонстрирует значение кинетического коэффициента роста, вычисленное по огибающей $\Delta p(t)$ рис. 2, верхний график, нижняя кривая

казаны значения кинетического коэффициента роста серии кристаллов при 0.74 К. Разделение кристаллов по типу роста при 0.74 К, как видно на рис. 1, выполнено на серии роста из 24 кристаллов, 12 из которых демонстрируют обычный рост, и 12 кристаллов показывают аномально быстрый рост. Кристаллы, начинающие рост с пересыщения менее ~ 2.5 мбар, имеют кинетический коэффициент роста равный $K = 0.28 \pm 0.16$ с/м. При стартовых пересыщениях более ~ 3 мбар усредненный кинетический коэффициент роста равен 2.07 ± 0.20 с/м. Граничное пересыщение Δp_b лежит в интервале 2.5–3.5 мбар, что вдвое меньше граничного пересыщения наблюдаемого ранее, см. рис. 11 [4]. При температуре 0.49 К удалось только определить верхнюю границу $\Delta p_b < 1$ мбар, что так же, как минимум, вдвое меньше ранее полученного значения.

На рисунке 2 показано изменение давления в контейнере во время роста кристалла при двух температурах. В момент $t = 0$ образуется критический зародыш. Кристалл быстро растет, что сопровождается резким падением давления к значению давления фазового равновесия. При температуре 0.74 К пересыщение уменьшается монотонно. Значение кинетического коэффициента роста, приведенного в предыдущем абзаце, рассчитано по зависимости $\Delta p(t)$. При $T = 0.49$ К кинетика роста граней воз-

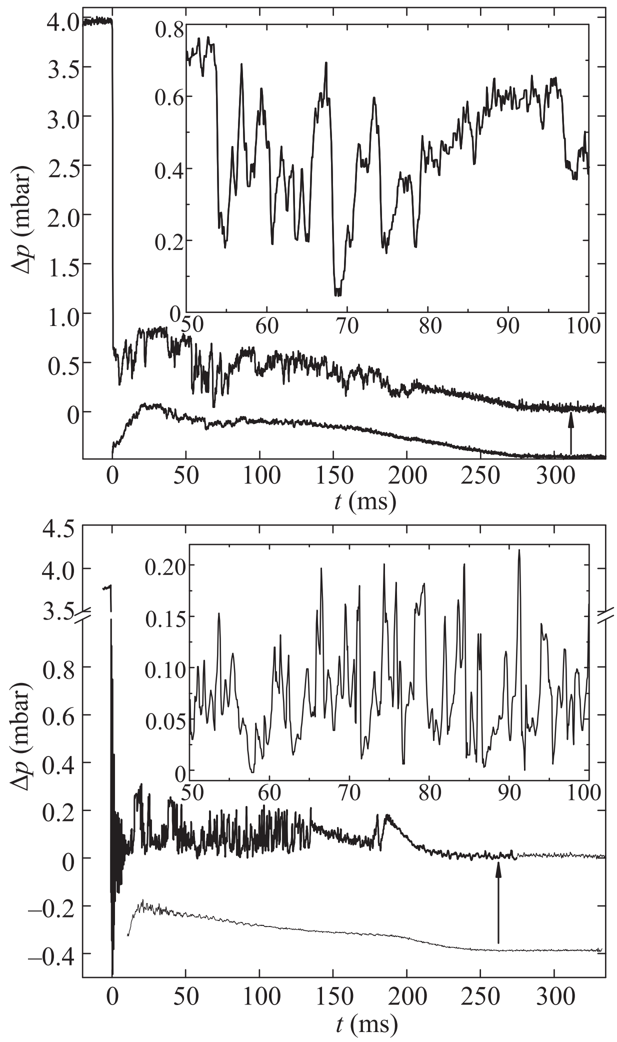

Рис. 2. Изменение давления в контейнере во время роста кристалла. Верхний график относится к температуре 0.74 K, нижний – 0.49 K. Кривые со скачками при $t = 0$ на обоих графиках показывают изменение давление при росте конкретного кристалла. Плавная кривая, смещенная ниже на величину стрелки, есть результат усреднения по серии измерений с одинаковыми стартовыми условиями. На вставке в увеличенном масштабе показаны скачкообразные изменения давления, подобные режиму “*burst-like growth*” [1, 2]

растает настолько, что приводит к осциллирующему росту кристалла [4], п. 2.5, затухающим за ~ 10 мс. Оценка по отношению амплитуды первого периода осцилляций к стартовому давлению дает при этой температуре значение $K = 6{-}7$ с/м. Значения кинетического коэффициента роста и их температурная зависимость согласуются с результатами, полученными ранее [4], п. 3.

Как видно на рис. 2, на плавное изменение давления накладываются короткие скачки. Медленная составляющая одинакова для кристаллов, выращенных с одними и теми же стартовыми условиями. На рисунке 2 нижние кривые демонстрируют усреднение зависимостей $\Delta p(t)$ по серии опытов с одними и теми же начальными условиями, совмещенные по времени начала роста и нормированные. Такая обработка усредняла квазипериодические скачки давления. Видно, что при обеих температурах пересыщение возрастает, проходит через максимум в районе ~ 30 мс и затем через ~ 250 мс близится к нулю. На рисунке 3 показаны зависимости кинетического

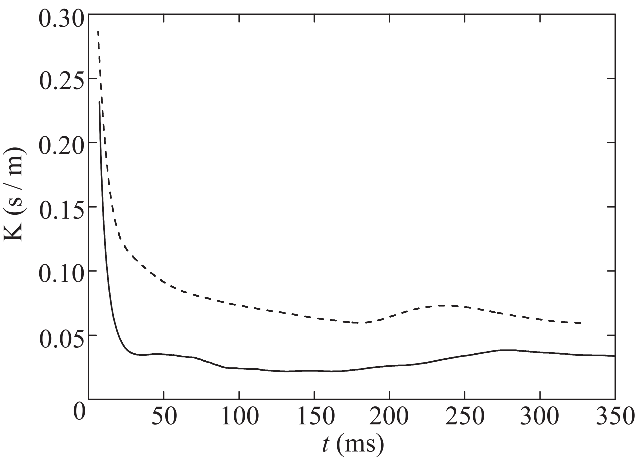

Рис. 3. Изменение кинетического коэффициента роста со временем. Сплошная кривая рассчитана по огибающей серии записей при $T = 0.74$ K. Штриховая – по серии при $T = 0.49$ K

коэффициента роста K, рассчитанные по методике статьи [6]. В начале видна релаксация кинетики к стационарному состоянию. Эти участки $K(t)$ хорошо приближаются экспоненциальной зависимостью. Постоянная времени при температуре 0.74 K равна 5 мс и при $T = 0.49$ K равна 7 мс. Через ~ 30 мс кинетический коэффициент роста становится практически постоянным. При температуре 0.74 K его величина $K = 0.030 \pm 0.006$ с/м, см. рис. 1 наполовину закрашенный кружок. Охлаждение до 0.49 K увеличивает K в два с лишним раза до значения $K = 0.07 \pm 0.007$ с/м.

Резкие падения давления, наблюдаемые в интервале 30–250 мс, свидетельствуют о быстром росте кристалла, т.е. о переходе граней кристалла в аномальное состояние. Из записи $\Delta p(t)$ на рис. 2 видно, что при температуре 0.74 K скачки возникают при пересыщениях, лежащих в диапазоне 0.3–0.8 мбар. Понижение температуры сдвигает этот интервал в меньшую сторону до значений 0.05–0.2 мбар. Температура влияет на частоту появления скачков, как видно на вставках рис. 2. При $T = 0.49$ К скачки образуются чаще, чем при $T = 0.74$ К.

Монотонное возрастание пересыщения после скачка происходит вследствие возврата граней кристалла в нормальное состояние с низкой кинетикой. По зависимостям $\Delta p(t)$ видно, что возврат к норме происходит без существенной задержки, которая не превышает времени инерции системы измерения давления 160 мкс. Форма скачков давления асимметрична. После возникновения состояния "*burst-like growth*" при $T = 0.74$ К падение давления происходит за ~ 400 мкс. Это время определяется кинетическим коэффициентом роста и соответствует кинетике быстрого роста после возникновения кристалла. Возврат пересыщения к первоначальному значению происходит за 4–5 мс. При температуре 0.49 К время падения давления 200–250 мкс. Отметим, что в этом случае время определяется не кинетическим коэффициентом роста, а частотой мягких мод колебания давления при осциллирующем росте кристалла [4], п. 2.5. Время восстановления пересыщения уменьшается до значений 0.6–0.8 мс. Через ~ 250 мс пересыщение спадает и процесс "*burst-like growth*" прекращается.

3. Обсуждение результатов. Эксперименты показали, что режим "*burst-like growth*", ранее наблюдавшийся на совершенных кристаллах, также реализуется и на кристаллах, имеющих ростовые дефекты. При высоких 0.4–0.75 К и при низких 2–250 мК температурах режим аномально быстрого роста кристалла проявляется одинаковым образом. Это сильный аргумент в пользу идентичности физической природы обоих эффектов. Этот вывод, хотя и не проясняет пока физический механизм эффекта, тем не менее, позволяет отбросить многие возможные объяснения. Например, поскольку эффект наблюдается на совершенной грани [1, 2], то следует отбросить все возможные объяснения связанные с наличием ростовых дефектов.

Постановка данного эксперимента отличается от предыдущих постановок экспериментов только тем, что на ~ 2 порядка уменьшен объем контейнера. Объем кристалла пропорционален внутреннему объему контейнера. По этой причине конечные размеры кристаллов в этих экспериментах в ~ 5 раз меньше размеров ранее изученных кристаллов. По данным результатам преждевременно формулировать утверждение, что именно размеры кристалла таким образом влияют на порог $\Delta p_b(t)$, разделяющий области нормального и аномального. Можно только высказать такое предположение.

Значения кинетического коэффициента роста на этапе быстрого роста, рассчитанные по падению давления после зарождения кристалла, согласуются с ранее измеренными величинами. Таким образом, быстрый рост условно "больших" и "маленьких" кристаллов не отличается.

Падение кинетического коэффициента роста в течение ~ 30 мс по завершению этапа быстрого роста, демонстрирует релаксацию состояния "*burst-like growth*" в нормальное состояние с низкой кинетикой роста. Отметим, что в течение этого же времени происходит релаксация действительной и мнимой части упругого модуля кристалла [4], п. 4.7.2. Время релаксации этого процесса мало меняется в интервале 0.4–0.75 К и составляет 3–4 мс. Является ли данное совпадение случайным или это две стороны одного процесса – на этот вопрос пока нет ответа на основании имеющихся экспериментальных данных.

Величины кинетического коэффициента роста кристаллов, выращенных в нормальном состоянии, на порядок меньше коэффициентов K на этапе быстрого роста, см. рис. 1. Измерения К при $T \approx 0.75$ К ряда авторов дают большой разброс этих значений от $4 \cdot 10^{-4}$ до 0.02 с/м, см. рис. 4 [4]. Подобный разброс неудивителен, поскольку в этом режиме грани кристалла растут за счет ростовых дефектов. А дефектная структура существенно зависит от механизмов роста кристалла, отжига и т.д., различавшихся в каждых экспериментах. Влияние различной концентрации ростовых дефектов на кинетику наглядно видно по различной скорости роста эквивалентных а-граней при свободном росте кристалла [5]. Возможно, высокие скорости роста "маленьких"' кристаллов связаны с их дефектной структурой. Отметим, что стационарные значения кинетического коэффициента роста, рассчитанные по огибающей давления, на порядок меньше величин для нормального роста кристаллов в данных экспериментах, см. рис. 3. Они близки к величинам, ранее полученным в работах других авторов.

4. Заключение. Подводя итоги, отметим, что удалось воспроизвести наблюдавшийся ранее [1, 2] режим "*burst-like growth*" на кристаллах, содержащих ростовые дефекты. Это указывает на то, что физические механизмы, ответственные за переход граней в состояние аномально быстрого роста в диапазоне температур от 2 мК до 0.75 К, одинаковы. Выяснено, что переход от быстрой к медленной кинетике также происходит скачком или, по крайней мере, за время менее ~ 200 мкс. Обнаружена схожесть процесса релаксации кинетического коэффициента роста с релаксацией упругих модулей кристалла по завершении этапа быстрого роста. Определены кинетические коэффициенты роста на этапах быстрого и медленного роста.

Автор благодарен В. В. Дмитриеву за возможность выполнения этой работы в Институте физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, В. В. Завьялову за поддержку работы, С. Н. Бурмистрову за полезные обсуждения и В. С. Круглову за интерес к работе.

1. P. J. Hakonen, J. S. Penttila, J. P. Ruutu, J. P. Saramaki, G. Tvalashvili, A. V. Babkin, and A. Ya. Parshin, Phys. Rev. Lett. **76**, 4187 (1996).
2. P. J. Hakonen, J. P. Ruutu, G. Tvalashvili, A. V. Babkin, and A. Ya. Parshin, J. Low Temp. Phys. **112**, 117 (1998).
3. V. L. Tsymbalenko, Phys. Lett. A **211**, 177 (1996).
4. В. Л. Цымбаленко, УФН **185**, 1163 (2015).
5. В. Л. Цымбаленко, ФНТ **21**, 162 (1995).
6. В. Л. Цымбаленко, ЖЭТФ **126**, 1391 (2004).