КАК РАСТУТ КРИСТАЛЛЫ В РАСТВОРЕ

Л. Н. РАШКОВИЧ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

HOW CRYSTALS GROW IN SOLUTION

L. N. RASHKOVICH

This article reviews the mechanism and kinetics of spiral layer-wise crystal growth. It is shown, that the growth rate may be increased greatly (by ten times and more) in comparison with the traditional rates while maintaining the high quality level. This provides the possibility not only to reduce the cost of crystals, but more importantly, the growth of crystals of large dimensions which are required by the contemporary power optics.

Рассмотрены механизм и кинетика слоисто-спирального роста кристаллов. Показана возможность увеличения скорости роста в десятки раз по сравнению с традиционными скоростями выращивания, без снижения качества кристаллов. Это позволяет не только снизить стоимость производства кристаллов, но и, что более важно, получать особо крупные кристаллы, необходимые сегодня для использования в силовой оптике.

ВВЕДЕНИЕ

Зачем нужны большие кристаллы дигидрофосфата калия KH_2PO_4

Созданная в США для разработки водородной бомбы Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса в настоящее время проектирует установку для лазерного термоядерного синтеза. Не надо думать, что лаборатория – это помещение из нескольких комнат, Ливерморская лаборатория – небольшой городок, в котором работает около 14 000 сотрудников. Проектируемая установка будет состоять из 192 линий, в каждой из которых пучок лазерного излучения диаметром около 40 см будет многократно усиливаться и все 192 пучка будут фокусироваться на одну небольшую мишень, в которой и должна начаться термоядерная реакция при температуре около 15 миллионов градусов. Общая энергия, поглощаемая мишенью в течение 3 – 4 наносекунд, должна составить 1,8 мегаджоуля, что соответствует выделяющейся мощности порядка 500 тераватт. Судить о размерах установки можно по приведенной на рис. 1 фотографии, где изображена уже построенная для проведения предварительных опытов одна из упомянутых линий, с уменьшенным до 30 см диаметром пучка. Естественно возникает вопрос: зачем нужно так много пучков? Ответ прост: оптические элементы, используемые для управления параметрами излучения (например, линзы), не могут выдержать столь большую плотность энергии: они имеют всего 1,5 – 2-кратный запас прочности.

Эффективность выделения на мишени энергии обратно пропорциональна четвертой степени длины волны лазерного излучения. В то же время имеющиеся сейчас наиболее мощные и надежные лазеры из специального стекла с примесью ионов неодима генерируют инфракрасное излучение с длиной волны 1,054 мкм. Оказалось, что наиболее выгодный вариант, с точки зрения размеров и стоимости установки, состоит в уменьшении длины волны излучения в три раза (больше нельзя, так как сильно увеличится поглощение света оптическими деталями). Для преобразования частоты излучения в квантовой электронике используются так называемые нелинейно-оптические кристаллы, среди которых по совокупности свойств наиболее подходящими оказались кристаллы дигидрофосфата калия (техническое

© Рашкович Л.Н., 1996

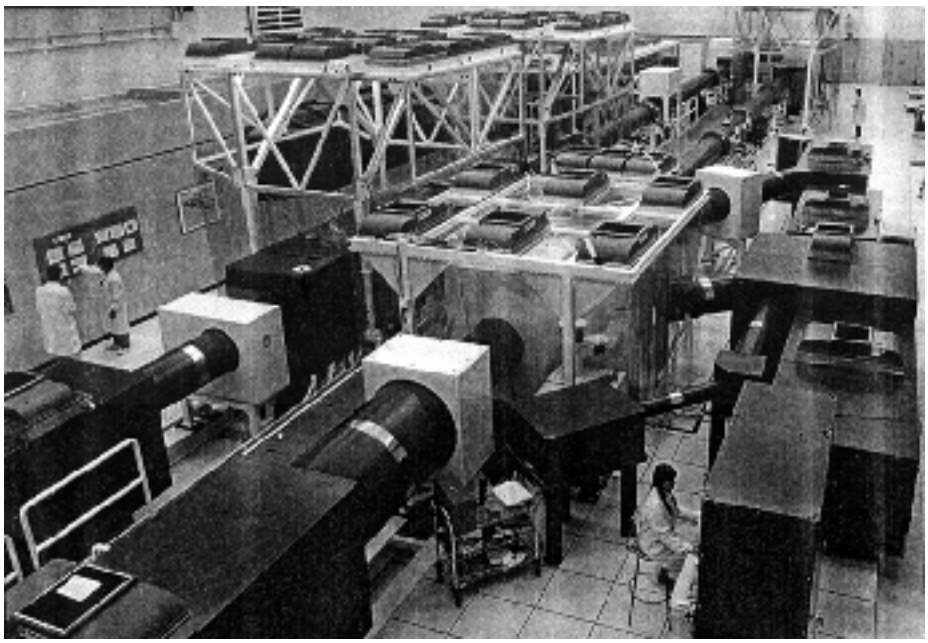


Рис. 1. Фотография одной из 192 лазерных линий для управляемого термоядерного синтеза, построенной в Ливерморской национальной лаборатории для предварительных опытов с пучком сечением около 30 × 30 см^2. Строительство начато в 1991 году, 8 сентября 1994 года получено излучение расчетной мощности [1].

название: KDP). Для каждой линии требуется три таких кристалла сечением 37 × 37 см^2 и толщиной в несколько сантиметров. Один из них будет служить оптическим затвором, необходимым для формирования импульсов света заданной длительности; во втором частота излучения будет удваиваться; в третьем произойдет сложение частот основного излучения и его второй гармоники, в результате чего и получится требуемая длина волны. Таким образом, для создания проектируемой установки необходимо иметь около 600 кристаллов KDP с линейными размерами около 40 см и очень хорошего оптического качества.

Заметим, что работы по управляемому лазерному термоядерному синтезу были начаты в СССР одновременно с США и разработка способа получения столь крупных кристаллов KDP ведется в нашей стране уже более 10 лет [2, 3]. В последние годы аналогичные исследования ведутся во Франции, Китае и Японии.

Скоростное выращивание кристаллов в растворе

Традиционные методы выращивания кристаллов в растворе ориентировались на малые скорости роста порядка 0,5 – 1 мм/сутки. Считалось, что чем медленнее растет кристалл, тем совершеннее его структура. Действительно, присоединение строительных единиц к кристаллической решетке осуществляется методом проб и ошибок: частица много раз пытается встроиться в кристалл, пока не найдет подходящего места и не повернется нужным образом. Чем медленнее растет кристалл, тем больше времени для того, чтобы все его частицы устроились в правильное положение и число дефектов было минимальным. Это разумные соображения, и они подтверждались практикой. Однако вырастить кристалл размером в 40 см со скоростью 1 мм/сутки очень сложно, так как для этого требуется больше года. Если учесть, что даже кратковременное нарушение режима выращивания, вызванное поломкой или неисправностью детали аппаратуры или отключением электричества, приводит к появлению в кристалле дефектов и весь труд идет насмарку, то ясно, что получение большого количества крупных кристаллов с такой скоростью практически невозможно. Скоростное выращивание стало реальностью благодаря существенному прогрессу в понимании физики кристаллизации, которой и посвящена эта статья, но нельзя не сказать о том, что уже давно были известны опыты, в которых большие кристаллы хорошего оптического качества были получены в экстремально короткое время. Упомяну здесь лишь одну такую работу, выполненную в блокадном Ленинграде, по получению кристаллов сегнетовой соли, которые использовались для преобразования звука в электрические сигналы и служили основными элементами в микрофонах и телефонах военного времени [4].

Все сказанное ниже посвящено кристаллам KDP, однако качественно также растет в растворах и

большинство других кристаллов. Цель статьи – наглядно продемонстрировать основные черты механизма роста кристаллов в растворе.

СЛОИСТО-СПИРАЛЬНЫЙ РОСТ КРИСТАЛЛОВ

Дислокационный механизм

Остановимся сначала на методике исследования. Кювету с растущим кристаллом, через которую прокачивается термостатированный раствор, располагаем на месте одного из зеркал интерферометра Майкельсона. Получаем изображение поверхности кристалла, на которое наложена интерференционная картина (чередование светлых и темных полос), характеризующая рельеф поверхности, – фактически его топографическая карта. Соседние горизонтали (две белые или две черные линии) соответствуют разности высот около 0,2 мкм. Когда кристалл растет, полосы перемещаются, и по скорости их движения можно определить нормальную и тангенциальную к плоскости грани составляющие скорости, с которой перемещается какой-либо участок поверхности.

На рис. 2 приведены последовательно снятые фотографии начальных стадий формирования одной из граней кристалла KDP. Не останавливаясь на деталях, отметим основные черты процесса. На первоначально неровной поверхности затравочного кристалла появляются наползающие друг на друга плоские участки эллиптической формы (фото *1*). Они расположены на разных уровнях, но вверх не растут: движутся только склоны этих островков (фото *2* и *3*). Так происходит потому, что на шероховатых склонах есть много мест для присоединения строительных единиц, а на плато таких мест нет. Этот процесс может идти, пока вся поверхность не станет плоской гранью, тогда рост кристалла (при не слишком большом пересыщении раствора) прекратится. Но на фото *4* видно, что на плато появился бугорок: это перешла на плоский участок так называемая винтовая дислокация, ранее выходившая на склон.

Винтовая дислокация – типичный дефект структуры кристаллов, обусловленный сдвигом части атомных плоскостей на один или несколько атомных рядов (рис. 3*а*). Как видно из рисунка, в этом случае на двух противоположных гранях возникают ступеньки, не исчезающие при росте кристалла, а сам кристалл представляет собой одну атомную плоскость, образующую винтовую поверхность. Когда частицы присоединяются к незарастающей ступеньке, она закручивается в спираль, формируя на грани дислокационный холмик роста, показанный на рис. 3*б* и 3*в*. Этот холмик постепенно занимает всю поверхность грани, и именно благодаря ему кристалл начинает расти (фото *5* – *8* на рис. 2). На грань может выходить много винтовых дислокаций, они наследуются из затравочного кристалла, а также образуются под влиянием внутренних напряжений, например при захвате микроскопических включений раствора или посторонних частиц. На последних фото рис. 2 видно, что на грани уже сформировано несколько дислокационных холмиков, но можно заметить, что крутизна их различна.

Между дислокационными холмиками роста идет конкуренция, причем побеждает самый крутой холмик. Он и занимает всю поверхность грани, если пересыщение раствора остается постоянным

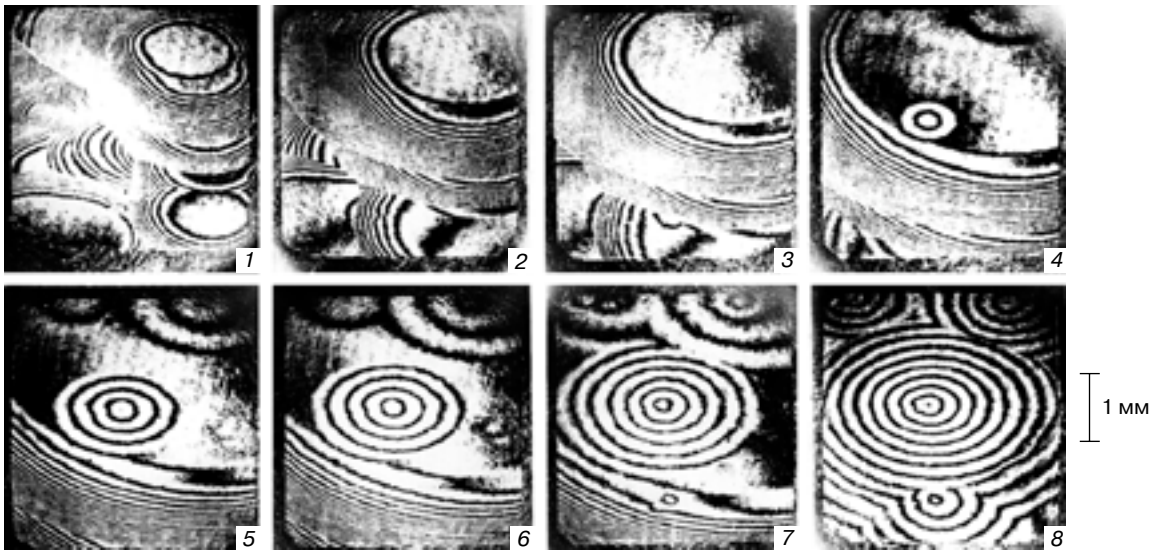


Рис. 2. Регенерация грани призмы кристалла KDP при постоянном пересыщении раствора.

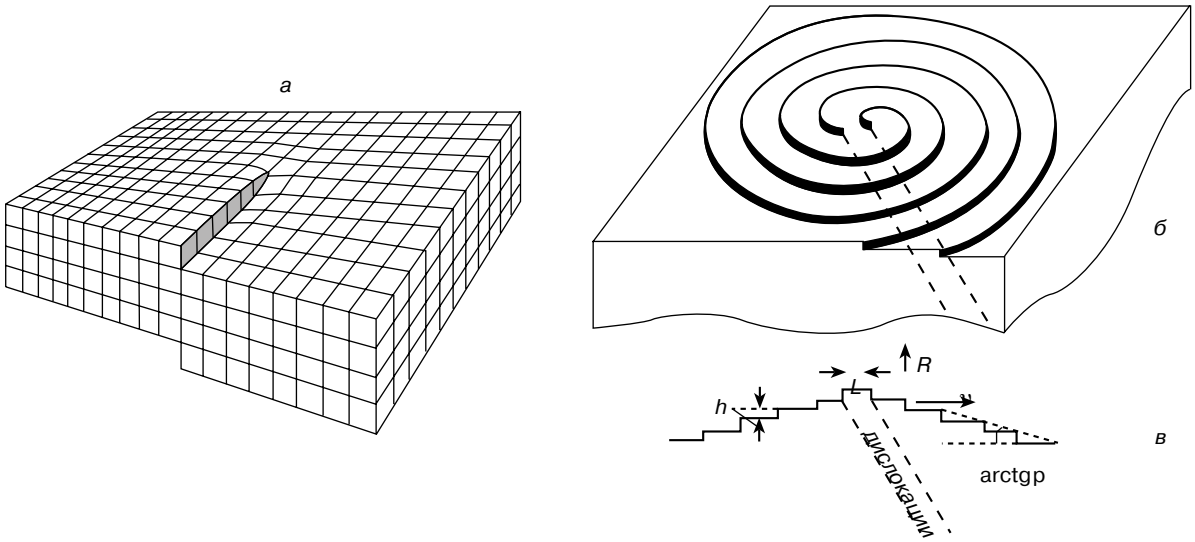


Рис. 3. Схемы винтовой дислокации (*а*) и дислокационного холмика, формируемого двумя дислокациями (*б*, *в*).

достаточно длительное время (фото *1* на рис. 4). При изменении пересыщения могут появиться другие, более крутые в этих условиях холмы. Среди них опять победителем со временем станет наиболее крутой. Если вернуться к прежнему значению пересыщения, процесс окажется полностью обратимым. Рисунок 4 иллюстрирует это явление.

Запишем теперь несколько соотношений, характеризующих скорость роста кристаллов. Действующая сила кристаллизации называется пересыщением σ:

$$\sigma = \frac{C - C_0}{C_0}, \qquad (1)$$

где C – действительная концентрация, а C_0 – концентрация насыщенного раствора, то есть раствора, находящегося в равновесии с кристаллом. Скорость υ движения участка ступени по поверхности зависит от радиуса кривизны этого участка r:

$$\upsilon = \upsilon_0\left(1 - \frac{r_c}{r}\right); \qquad (2)$$

здесь

$$\upsilon_0 = \beta\sigma \qquad (3)$$

– скорость прямолинейной ступени ($r \longrightarrow \infty$), где β – кинетический коэффициент ступени, а r_c – радиус двумерного критического зародыша

$$r_c = \frac{\alpha\omega}{k_Б T_\sigma}, \qquad (4)$$

где α – поверхностная энергия торца ступени, ω – объем строительной единицы, $k_Б$ – константа Больцмана, T – абсолютная температура. Заметим, что формула (2) – аналог зависимости давления пара от



Рис. 4. Конкуренция между дислокационными холмиками при изменении пересыщения раствора. σ = 0,02 (*1*); 0,03 (*2 – 6*); 0,02 (*7 – 12*).

размера капли жидкости. При $r = r_c$ $\upsilon = 0$, так как пересыщение на этом участке нулевое.

Как видно из рис. 3*в*, тангенс угла наклона образующей холмика к плоскости грани (p – крутизна холмика)

$$p = \frac{h}{\lambda}, \qquad (5)$$

где h – высота ступени (элементарного ростового слоя). Из геометрических соображений ясно, что нормальная скорость роста холмика

$$R = p\upsilon. \qquad (6)$$

Из (6) видно, что при данном σ быстрее растет тот холмик, у которого больше p, он и побеждает в конкурентной борьбе.

Образование двумерных зародышей

Выше уже упоминалось о том, что если на грань не выходят винтовые дислокации, то она не может расти. Однако при достаточно большом пересыщении в результате флуктуационного скопления строительных единиц могут возникнуть способные к росту двумерные зародыши критического размера и элементарной высоты (если радиус возникшего зародыша меньше r_c, он растворяется). Такие зародыши увеличиваются в размерах со скоростью υ и, сливаясь, покрывают грань. На образовавшемся слое возникают новые зародыши. Скорость образования двумерных зародышей J, штук/см^2 с [5]:

$$J = B\exp\left(-\frac{L_c h\alpha}{2k_Б T}\right), \qquad (7)$$

где L_c – периметр зародыша критического размера (как следует из формулы (4), он обратно пропорционален пересыщению), B – предэкспоненциальный множитель, смысл которого для нас сейчас не важен. При малых пересыщениях вероятность образования зародышей пренебрежимо мала, но при σ порядка 0,1 (а такие пересыщения типичны для скоростного выращивания) их появление возможно. При еще больших пересыщениях скорость образования двумерных зародышей, а значит, и скорость роста, экспоненциально (то есть очень быстро) возрастает.

Получить кристаллы без дислокаций очень трудно: даже если их нет в затравочном кристалле, они возникают при регенерации грани. Поэтому реально грань всегда начинает расти по дислокационному механизму и двумерные зародыши возникают на террасах между ступенями холмиков роста. Соответствующая данному пересыщению крутизна дислокационного холмика при образовании двумерных зародышей, по всей видимости, не меняется, так как зародыши равномерно образуются на всей лестнице эшелона ступеней (к сожалению, этот вопрос еще почти не изучен). В то же время нормальная скорость роста существенно возрастает, так как на поверхность в единицу времени начинает садиться существенно больше вещества. Во всяком случае, даже при весьма больших пересыщениях на гранях хорошо видны дислокационные холмики (чаще всего один холмик).

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ

Линейная зависимость (3) тангенциальной скорости ступеней на периферии холмиков изменяется при изменении пересыщения, если на грани адсорбируются примесные частицы, способные тормозить ступени. Дело в том, что ступень прогибается между соседними примесными стопорами и останавливается, достигнув критического радиуса кривизны. Это возможно, если расстояние между стопорами равно или меньше $2r_c$. Поэтому может возникнуть мертвая зона пересыщений, когда грань не растет. С ростом σ значение r_c уменьшается и ступень прорывается через частокол стопоров. Когда примесные стопоры могут диффундировать по поверхности и распределены на ней хаотично, зависимость $\upsilon(\sigma)$ имеет характерный вид, показанный на рис. 5. При малых σ величина υ медленно возрастает с ростом пересыщения, затем при некотором пересыщении σ_* скорость резко возрастает и, наконец, зависимость $\upsilon(\sigma)$ выходит на прямую, проходящую через начало координат. Наклон этой прямой равен кинетическому коэффициенту β, характерному для роста в беспримесном растворе. Если в раствор

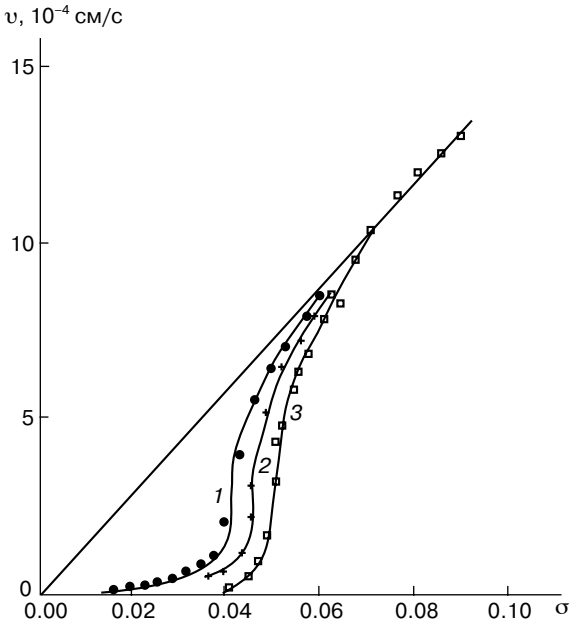


Рис. 5. Зависимость скорости движения ступеней на грани призмы кристалла KDP от пересыщения раствора в присутствии примеси хрома. Содержание в растворе $CrCl_3 \cdot 10H_2O$: *1* – номинально чистый раствор, *2* – 3 ppm, *3* – 5 ppm.

KDP добавить незначительное количество ионов алюминия, железа или хрома, величина σ_* увеличивается и вся кривая сдвигается вправо, но все равно она выходит на одну и ту же самую прямую.

Область пересыщений вблизи σ_* опасна для качества растущего кристалла, так как флуктуации концентрации примеси на поверхности приводят к тому, что разные участки ступени прорываются через частокол стопоров при несколько разных пересыщениях. Вместо эквидистантного эшелона ступеней элементарной высоты появляются ступени разной высоты – макроступени, то есть некоторые ступени догоняют соседние. В этом случае говорят, что поверхность теряет морфологическую устойчивость, при этом возможны захват кристаллом включений раствора и образование других дефектов кристаллической структуры.

РОЛЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСТВОРА

Для качества кристалла важно, чтобы во всех точках грани пересыщение было одинаковым. Добиться этого не просто. На рис. 6 показано, как влияет скорость *u* обтекающего грань потока раствора на изменение концентрации вблизи поверхности растущего кристалла. Кювета с кристаллом помещена в одном из плеч интерферометра, и свет проходит через раствор. Там, где интерференционные полосы прямые, показатель преломления раствора, а значит, и его концентрация постоянны. Изгиб полос у поверхности свидетельствует об уменьшении концентрации вследствие поглощения вещества кристаллом. Отметим несколько характерных моментов, видных на приведенных фотографиях. Первое: с ростом скорости потока толщина слоя, в котором происходит изменение концентрации раствора (он называется диффузионным пограничным слоем или двориком кристаллизации), уменьшается и на последней фотографии его различить не удается (слой тоньше 10 мкм). Это значит, что с ростом *u* пересыщение на поверхности приближается к объемному и, следовательно, становится одинаковым во всех точках грани. Второе: при промежуточных значениях *u* на интерференционных полосах появляются два излома (фото *4*), между которыми полосы остаются прямыми. В пространстве между этими изломами вблизи поверхности возникает замкнутый вихрь жидкости, причем у самой поверхности раствор движется в сторону, противоположную потоку. Внутри вихря концентрация постоянна. Вихри образуются из-за срыва ламинарного пограничного слоя (то есть слоя раствора у поверхности, в котором скорость потока изменяется от значения скорости в объеме раствора до почти нулевой у поверхности) вблизи переднего ребра (тем ближе к нему, чем больше скорость потока), при увеличении *u* частота срывов возрастает (фото *5*). Третье: казалось бы, что у переднего по потоку ребра между гранями призмы и пирамиды концентрация должна быть максимальной. На самом деле это не так: изгиб интерференционных полос наибольший именно у переднего ребра. Так происходит потому, что грань пирамиды растет заметно быстрее грани призмы (сравни первую и последнюю фотографии) и на переднее ребро поступает заметно обедненный быстро растущей пирамидой раствор.

Таким образом, если скорость потока раствора недостаточно велика, пересыщение в разных точках поверхности различно. Заметим, что увеличение пересыщения (то есть скорости роста) в этом смысле эквивалентно уменьшению скорости потока, так как поверхностная концентрация определяется

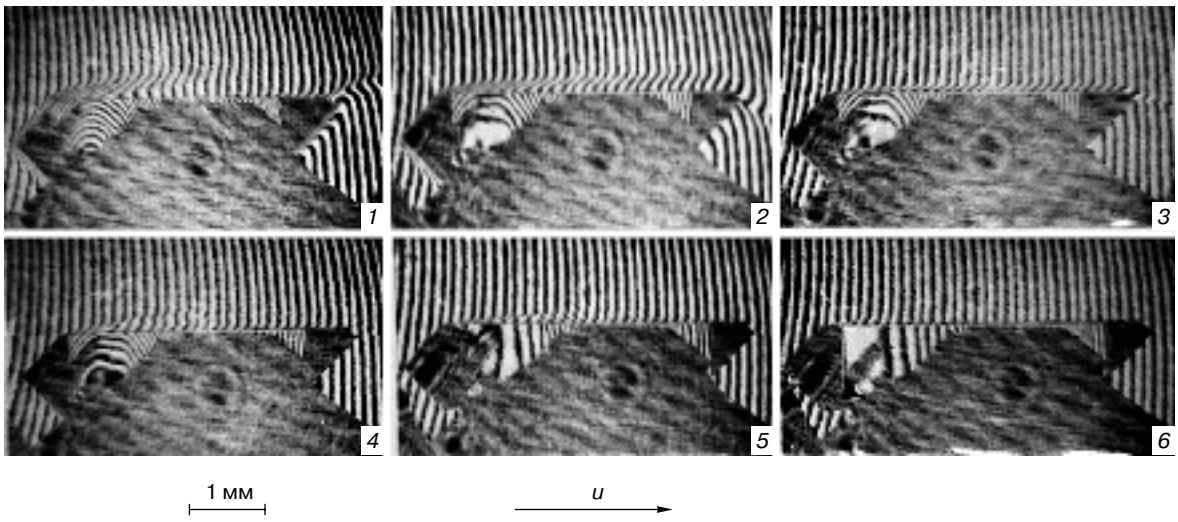


Рис. 6. Влияние скорости потока раствора *u* на концентрацию растворенного вещества вблизи растущей поверхности. *u*, см/с = 0,4 (*1*); 1,5 (*2*); 4 (*3*); 6 (*4*); 7 (*5*); 15 (*6*).

балансом скоростей подвода вещества из раствора и поглощения его кристаллом. Увеличение u увеличивает подвод вещества, а рост σ увеличивает его поглощение. Концентрация на поверхности будет постоянной и равной объемной, если скорость поступления вещества больше, чем скорость его отвода в кристалл. В этом случае говорят, что рост идет в кинетическом режиме. Противоположный случай – диффузионный режим роста. При диффузионном режиме возникают два негативных явления, которые иллюстрирует рис. 7.

При малых σ оба показанных на рисунке холмика имеют правильную форму (фото *1*), увеличение пересыщения приводит к тому, что скорость движения ступеней у верхнего и нижнего ребер становится больше, чем в середине грани, поскольку там раствор обеднен. Заметим, что при данной разнице пересыщений между ребром и серединой грани различие в скорости ступеней будет тем больше, чем больше значение производной $d\upsilon / d\sigma$, то есть при σ, несколько превышающих σ_* (см. рис. 5). В результате у переднего по потоку ребра (наветренного) ступени движутся навстречу друг другу и, сливаясь, образуют за собой ямку – залог будущего захвата включения раствора. Одновременно на подветренном склоне холма, где ступени движутся в том же направлении, что и раствор, поверхность теряет устойчивость и образуются макроступени. Объясним последнее явление.

Допустим, что в результате какой-либо случайности на склонах холмика возник выступ, это, например, может быть следствием кратковременного увеличения пересыщения в точке выхода дислокационного источника. Тогда на наветренном склоне поток раствора подходит к верхней точке выступа сравнительно обедненным, так как перед этим он протекал над крутым участком склона, а чем больше p, тем больше скорость роста и тем больше потребляется вещества. Поэтому скорость роста верхней точки уменьшается и выступ постепенно исчезает. На подветренном склоне ситуация иная: к выступающей точке раствор попадает обогащенным, так как перед этим проходит над сравнительно пологим участком. Поэтому возмущение поверхности усиливается, и чем дальше от вершины холма, тем сильнее эшелон ступеней теряет регулярность.

Есть простой способ не дать этим явлениям катастрофически развиться. Он демонстрируется рис. 8 и заключается в реверсировании с определенной частотой направления потока раствора. Как видно из рисунка, изменение направления потока раствора на противоположное приводит к тому, что ямка и макроступени меняются местами. Но, конечно, наиболее радикальный путь борьбы с подобными неприятностями – выращивать кристаллы в кинетическом режиме роста.

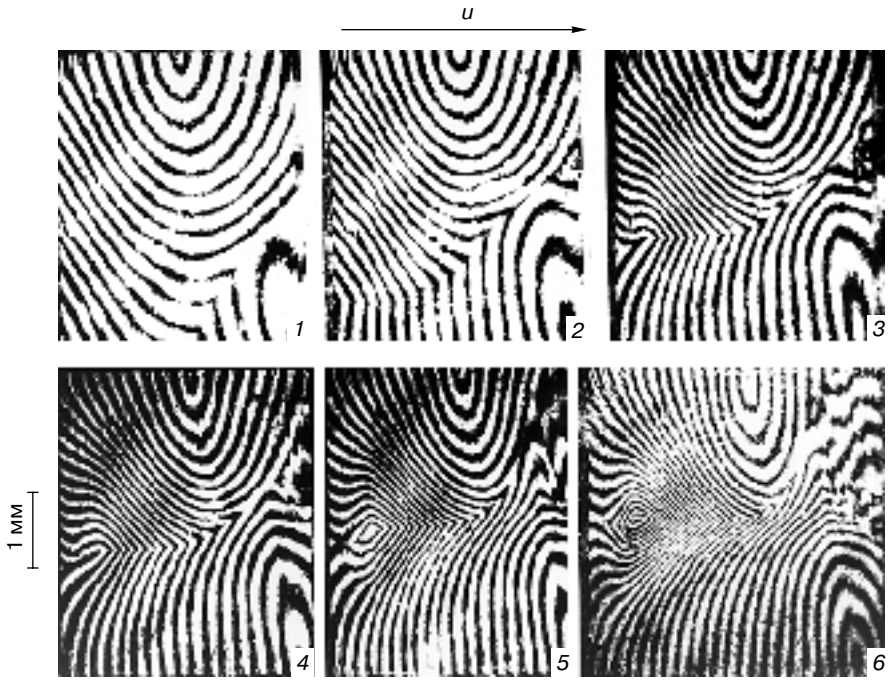


Рис. 7. Образование ямки на наветренном склоне холма и потеря устойчивости на подветренном склоне. σ = 0,015 (*1*); 0,018 (*2*); 0,021 (*3*); 0,023 (*4*); 0,026 (*5*); 0,027 (*6*).

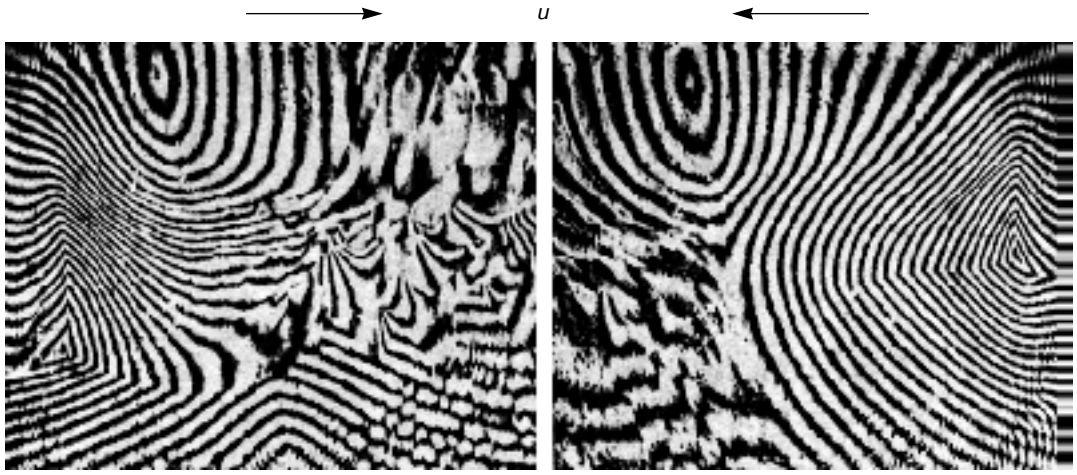


Рис. 8. Влияние изменения направления потока раствора на вид поверхности при непостоянстве пересыщения на грани.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕСЫЩЕННЫХ РАСТВОРОВ

Для того чтобы увеличить скорость роста кристалла, необходимо увеличить пересыщение раствора. Однако при больших σ в растворе может начаться массовая кристаллизация: повсеместное образование трехмерных зародышей, каждый из которых будет расти. В этом случае говорят, что раствор "запаразичивается", и тогда процесс выращивания монокристалла приходится прекращать.

Вероятность образования таких зародышей увеличивается с ростом объема раствора. Действительно, пусть при данном пересыщении J есть скорость появления зародышей (штук/см^3 с), V – объем раствора, t – время. Разобьем время t на много (N) малых интервалов dt. Тогда вероятность того, что за время dt возникнет зародыш, есть $JVdt \ll 1$, а вероятность того, что зародыш не возникнет, есть $1 - JVdt$. Вероятность того, что за время t не возникнет ни одного зародыша, будет равна

$$(1 - JVdt_1)(1 - JVdt_2) \ldots (1 - JVdt_N) \approx$$
$$\approx \exp(-JVdt_1)\exp(-JVdt_2) \ldots \exp(-JVdt_N) =$$
$$= \exp(-JVt). \qquad (8)$$

Из (8) следует, что если, например, 1 литр раствора при данном σ может стоять 1 год и лишь через это время в нем появится 1 зародыш, то в объеме 365 литров зародыш появится через сутки. Или иначе: пусть проведено 365 выращиваний в кристаллизаторе объемом 1 литр и лишь в одном из них наблюдалась массовая кристаллизация, тогда при выращивании кристаллов в кристаллизаторах объемом 365 литров массовая кристаллизация будет проходить в каждом опыте. Заметим, что для получения больших кристаллов приходится использовать кристаллизаторы объемом в 1000 литров.

Все, однако, не так страшно. Для предотвращения запаразичивания раствора используется несколько приемов: фильтрация раствора через фильтры с размером пор меньше 0,1 мкм, перегрев раствора для растворения посторонних частиц, использование полированных деталей, соприкасающихся с раствором, отсутствие пор в этих деталях, затрудняющих их очистку. Все эти приемы направлены на очистку раствора и кристаллизатора от посторонних частиц, на которых облегчено образование зародышей.

Есть и еще одно явление, приводящее к запаразичиванию раствора. Оно называется вторичной кристаллизацией. Вот одно из ее проявлений. Когда в кристалле замуровывается включение раствора (например, в упомянутой выше ямке), то слои роста, двигаясь в разных направлениях, сталкиваются и могут отщеплять, обламывать кусочки вещества, которые, попадая в раствор, служат зародышами, вызывающими массовую кристаллизацию. Поэтому получение кристаллов без включений раствора – одно из условий высокой устойчивости пересыщенного раствора к запаразичиванию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конечно, нельзя сказать, что процесс кристаллизации совершенно ясен; ряд явлений, о которых даже не упомянуто выше, еще потребует длительного изучения. Однако основные черты стали достаточно понятными благодаря работам последних лет, инициированным как потребностями практики, так и извечным желанием ученых понять физическую сущность различных процессов. В результате скоростное выращивание крупных кристаллов высокого оптического совершенства сегодня стало реальностью. Разработаны методы, позволяющие получать растворы, выдерживающие без массовой кристаллизации огромные пересыщения, и вести рост в режиме, близком к кинетическому. Именно в этом суть способа скоростного выращивания. Его

основные черты: использование сырья, содержащего менее 10^{-4}% каждой из примесей; фильтрация раствора через фильтры с размером пор менее 0,1 мкм; тщательная стерилизация кристаллизационной аппаратуры, изготовленной из хорошо отполированного инертного материала; регенерация затравочных кристаллов по специальной программе; непрерывный контроль и регулирование пересыщения раствора, обеспечивающее постоянную скорость роста; реверсивное перемешивание раствора.

Остановимся теперь на вопросе, затронутом во Введении: насколько увеличение скорости роста ухудшает качество кристалла. Действительно, увеличение υ должно приводить к увеличению в кристаллической решетке числа так называемых точечных дефектов – образованию вакансий и атомов, находящихся не на своих местах. Напротив, захват коллоидных включений и примесей с ростом υ должен уменьшаться, так как уменьшается время экспозиции террас между ступенями до их закрытия следующим слоем, то есть время, необходимое для адсорбции этих частиц поверхностью. Наконец, захват кристаллом включений раствора вообще определяется не скоростью роста, а устойчивостью эшелона ступеней, которая, как мы видели, связана с наличием примесей и постоянством пересыщения на поверхности. Эти соображения подтверждаются опытом: рассеяние и поглощение света в быстро выросших кристаллах и их оптическая прочность в мощном лазерном излучении не хуже, а иногда и лучше, чем у кристаллов, выращенных традиционным способом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Inertial Confinement Fusion, Quarterly Report. Lawrence Livermore National Laboratory. 1994. V. 5. № 1. P. 1.

2. *Беспалов В.И.*, *Кацман В.И.* Выращивание крупных водорастворимых кристаллов для лазерной оптики // Вестн. АН СССР. 1984. № 9. С. 11 – 14.

3. *Рашкович Л.Н.* Скоростное выращивание из раствора крупных кристаллов для нелинейной оптики // Вестн. АН СССР. 1984. № 9. С. 15 – 19.

4. *Аншелес О.М.*, *Татарский В.Б.*, *Штернберг А.А.* Скоростное выращивание кристаллов сегнетовой соли. Ленинград, 1945.

5. *Чернов А.А.* Процессы кристаллизации. В кн.: Современная кристаллография. М.: Наука, 1980. Т. 3. С. 5 – 232.

6. *Rashkovich L.N.* KDP – Family Single Crystals. Bristol, Philadelphia and New Jork: Adam Hilger, 1991.

* * *

Леонид Николаевич Рашкович, доктор технических наук, профессор. Специалист в области механизма и кинетики кристаллизации. Автор более 100 научных статей и двух монографий.