

УДК 532.5+536.25+548.5

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА МОДУЛИРОВАННО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АМПУЛЫ НА ТЕПЛОВУЮ СТРУКТУРУ РАСПЛАВА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ СТОКБАРГЕРА

В. Э. Дистанов, А. Г. Кирдяшкин

Институт минералогии и петрографии СО РАН, 630090 Новосибирск

Изучено влияние скоростного режима ACRT на тепловую структуру и скорости потоков в расплаве при выращивании монокристаллов методом Стокбаргера в ампулах диаметром 100 мм при значениях числа Тейлора $Ta > 10^8$. Определены оптимальные условия перемешивания расплава для трапецеидальных режимов модулированного вращения.

Введение. Методика ускоренного вращения ростовой ампулы (Accelerated Crucible Rotation Technique (ACRT)) [1, 2] в настоящее время успешно применяется для выращивания монокристаллов широкого класса соединений различными методами (Бриджмена — Стокбаргера, Чохральского, зонной плавки, раствора — расплава и др.). Принцип ускоренного вращения ростовой ампулы заключается в периодическом изменении скорости ее вращения по определенному закону. Как показано в работах [3–6], при выращивании монокристаллов методом Бриджмена — Стокбаргера ускоренное вращение контейнера с расплавом вызывает возникновение периодических колебаний температуры в объеме расплава и на фронте кристаллизации, а также скорости роста кристаллов в течение каждого цикла ACRT. Эти колебания могут стимулировать, как показано на кристаллах InSb, легированных Te [6], появление примесной полосчатости в кристаллах. Следовательно, определение временной зависимости периодических колебаний температуры и их амплитуды от параметров ACRT является одним из основных условий оптимизации процесса роста монокристаллов.

Исследователями использовались различные законы изменения скорости вращения контейнера в процессе кристаллизации и предложены различные схемы регуляторов скорости вращения (см., например, [7]). В процессе выращивания монокристаллов применялось как реверсивное вращение контейнера, так и вращение без изменения направления движения. Показано, что реверс направления вращения не обязателен для получения равномерного распределения примесей в кристаллах [8]. При выращивании монокристаллов использовались различные режимы изменения скорости вращения: пилообразные (с линейным [1–3, 8, 9] и нелинейным [10] изменением скорости вращения), трапецеидальные [1–5, 8] и синусоидальный [8]. Показано, что для получения качественных монокристаллов оптимальными являются трапецеидальный режим и пилообразный режим с линейным изменением скорости вращения. В обоих случаях получены монокристаллы высокого качества. Хотя утверждалось, что выдержка при постоянных максимальной и минимальной скоростях (трапецеидальный режим) не является необходимой для высокой равномерности состава и монокристалличности, в работах [3–5] показано, что наличие скоростных

“полочек” при постоянных параметрах приводит к увеличению амплитуды температурных колебаний и скоростей осевых потоков в расплаве (т. е. к усилению вынужденной конвекции). В работе [8] также показано, что в синусоидальном режиме с большим периодом вращения монокристаллы высокого качества с равномерным распределением примесей не получаются.

Влияние скоростных режимов вращения ампулы на амплитуду температурных колебаний в модельных экспериментах и при реальном кристаллообразовании (с использованием ампулы диаметром 40 мм) наиболее полно исследовано в работе [3]. Показано, что выдержка ампулы при постоянных максимальной и минимальной скоростях вращения (в цикле ACRT) увеличивает амплитуду температурных колебаний. Наиболее перспективным, по мнению авторов, является трапецеидальный режим изменения скорости вращения (по сравнению с пилообразным режимом и режимами с выдержкой только при минимальной либо максимальной скорости вращения). Однако в [3] не исследовалось поле температур, периодически изменяющееся по высоте всего столба расплава, измерения проводились только на фронте кристаллизации. Не рассматривались также режимы ACRT при различных значениях и соотношениях времен ускорения и замедления скорости вращения ампулы. Не оценивалось влияние скоростных режимов на скорости потоков в расплаве, а также время стабилизации температурного поля после начала вращения ростового контейнера с постоянной скоростью (время инерции), определяющее оптимальные временные выдержки при максимальной и минимальной скоростях вращения.

Поскольку знание указанных параметров необходимо для выбора оптимальных технологических условий скоростного режима ACRT, особенно в ампулах большого диаметра, в данной работе моделировалось влияние различных скоростных режимов на тепловую структуру и скорости потоков в расплаве в ампулах с внутренним диаметром 100 мм при значениях числа Тейлора

$$Ta = (\omega_{\max}^2 - \omega_0^2)r^4/\nu^2 > 10^8$$

(ω_{\max} , $\omega_0 = (\omega_{\max} + \omega_{\min})/2$ — максимальная и средняя угловые скорости вращения ампулы; r — внутренний радиус ампулы; ν — кинематическая вязкость). В качестве модельной жидкости использовался 96 %-й этиловый спирт (значения чисел Прандтля $9,7 < Pr < 10,8$).

Методика эксперимента. Исследования тепловой структуры в ампуле проводились на экспериментальной установке, позволяющей варьировать закон изменения во времени угловой скорости ампулы от пилообразного до трапецеидального с любым соотношением интенсивностей возрастания и убывания угловой скорости и временных интервалов при постоянных минимальной и максимальной угловых скоростях.

В модельных экспериментах цилиндрическая ампула из оптического кварца (рис. 1) с внутренним диаметром 100 мм устанавливалась соосно с вертикальной осью вращения. Для создания температурного поля в модельной жидкости в ампулу помещался фторопластовый цилиндрический затвор с нагревателем высотой 10 мм (сопротивление 22 Ом), изготовленным в виде бифилярной спирали из провода диаметром 0,2 мм. Верхний виток нагревателя находился на 10 мм ниже уровня свободной поверхности жидкости. Теплообменник такой конструкции не вносил дополнительных гидродинамических возмущений при изменении скорости вращения ампулы. Температура жидкости измерялась вмонтированной в затвор центральной нихром-константановой термопарой (диаметр проводов 50 мкм), помещенной в отверстие фторопластового цилиндра. Холодный спай термопары помещался на термостатированном медном основании кварцевой ампулы, расположенном на вращающемся столе. Плоское основание ампулы охлаждалось (термостатировалось) водой, подаваемой посредством скользящих водоводов из термостата UT-4 на вращающийся стол и

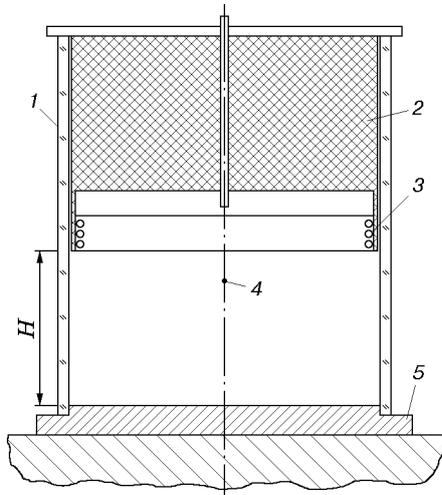


Рис. 1. Схема установки:

1 — кварцевая ампула, 2 — фторопластовый цилиндрический затвор, 3 — нагреватель, 4 — центральная термопара, 5 — термостатированное основание

далее к основанию ампулы по системе выфрезерованных внутри него каналов. Отсчет температуры производился от температуры охлаждаемой поверхности, моделирующей плоский фронт кристаллизации ($y = 0$). В экспериментах измерялась разность температур жидкости и охлаждаемого дна кварцевой ампулы: $\Delta T = T_l - T_b$. Погрешность измерения температуры в экспериментах составляла $\pm 0,05$ °С. Мощность нагревателя 10,2 Вт, температура подложки 24,5 °С.

При моделировании тепловой структуры в расплаве при выращивании кристаллов методом Стокбаргера кольцевой нагреватель в модельной ампуле (как и кольцевой нагреватель диафрагмы ростовой печи) создает перепад температуры между нагревателем и термостатированным основанием ампулы. Функция основания, моделирующего плоский фронт кристаллизации, аналогична функции нижнего нагревателя ростовой печи.

Измерение координат термопары осуществлялось катетометром В-630. Постоянная составляющая ЭДС термопары компенсировалась и измерялась малогабаритным потенциометром, который тарировался с помощью компаратора Р3003, с погрешностью 0,5 мкВ. Некомпенсированная составляющая ЭДС (при отключенном компараторе) усиливалась усилителем постоянного тока с плавно регулируемым коэффициентом усиления. Для ослабления помех сигнал после усилителя постоянного тока пропускали через фильтр низких частот с частотой среза 1,5 Гц. Усилитель постоянного тока имел малый шум и дрейф “нуля” 1 мкВ/ч. Измерительный комплекс подробно описан в работе [4]. Измерения мгновенных значений ЭДС термопары осуществлялись синхронно в одном и том же временном масштабе с записью изменения числа оборотов вращающейся вокруг вертикальной оси ампулы с помощью трехканального самопишущего потенциометра Н-3030-3. Запись числа оборотов передавалась на самописец с электронного тахометра модели ТЭ30-5Р.

Во всех экспериментах максимальная и минимальная скорости вращения ампулы оставались постоянными и составляли 60 и 20 об/мин соответственно. Изменение скорости вращения производилось регулятором скорости вращения, позволяющим задавать закон ее регулирования в широком интервале временных параметров. В экспериментах использовались четыре скоростных режима с различными значениями времени ускорения τ_y и замедления τ_z : симметрично-пилообразный с линейным изменением скорости вращения: $\tau_y = \tau_z = 7$ с (рис. 2,а); симметрично-пилообразный с линейным изменением скорости вращения: $\tau_y = \tau_z = 20$ с (рис. 3,а); несимметрично-трапецеидальный: $\tau_y = 7$ с, $\tau_z = 20$ с, $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с (рис. 4,а); симметрично-трапецеидальный: $\tau_y = \tau_z = 20$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с (рис. 5,а). Несимметрично-трапецеидальный режим вращения выбирал-

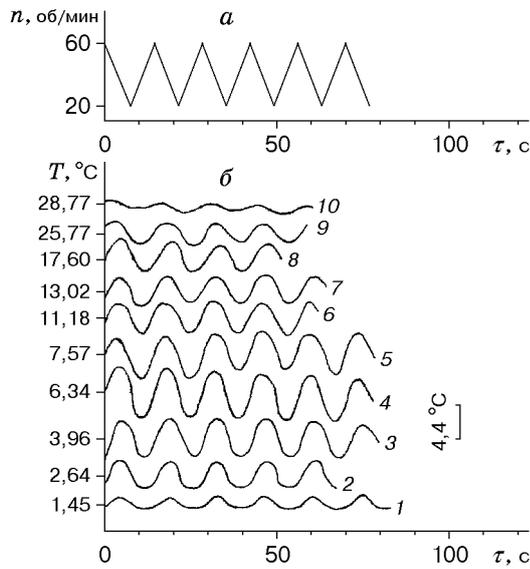


Рис. 2

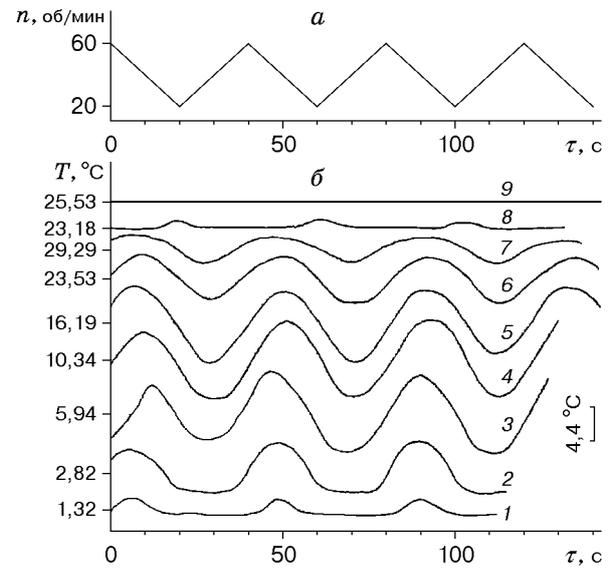


Рис. 3

Рис. 2. Закон модулированного вращения ампулы ($n_{\max} = 60$ об/мин; $n_{\min} = 20$ об/мин) (а) и зависимость мгновенных значений температуры на оси ампулы от времени (б) для симметрично-пилообразного скоростного режима с линейным изменением скорости вращения ампулы ($\tau_y = \tau_z = 7$ с; $H = 37,1$ мм):

1–10 — $y = 1,12; 2,63; 4,18; 5,43; 8,21; 11,45; 15,48; 21,68; 29,92; 34,47$ мм

Рис. 3. Закон модулированного вращения ампулы ($n_{\max} = 60$ об/мин; $n_{\min} = 20$ об/мин) (а) и зависимость мгновенных значений температуры на оси ампулы от времени (б) для симметрично-пилообразного скоростного режима с линейным изменением скорости вращения ампулы ($\tau_y = \tau_z = 20$ с; $H = 37,1$ мм):

1–9 — $y = 1,24; 5,66; 11,43; 15,76; 21,61; 29,49; 34,44; 38,78; 49,43$ мм

ся только для условий $\tau_y < \tau_z$, поскольку при резком торможении контейнера с жидкостью в ней возникает валиковая структура колец Тейлора и происходит расслоение [11–13].

Результаты и их обсуждение. Интенсивность перемешивания расплава определяется значением числа Тейлора, которое в данных экспериментах равно $1,8 \cdot 10^8$. При модулированном вращении ампулы в окрестности ее термостатированного плоского дна возникают периодические течения [4]: при уменьшении числа оборотов реализуется вихревое течение, направленное по радиусу к центру и вверх по оси вращения ампулы; при увеличении числа оборотов наблюдаются течение вблизи поверхности фронта кристаллизации по радиусу к образующей цилиндра и нисходящий поток по оси ампулы. Природа возникновения этих течений следующая. При уменьшении числа оборотов ядро жидкости в ампуле имеет большую угловую скорость, чем подложка. В результате возникают течения, аналогичные потокам у неподвижного диска при вращении жидкости с постоянной угловой скоростью: замедленные частицы жидкости у стенки вследствие торможения имеют меньшую центробежную силу и движутся по радиусу к оси ампулы.

При увеличении числа оборотов угловая скорость подложки больше угловой скорости жидкости в ядре. В этом случае наблюдается течение у растущей грани кристалла, аналогичное течению при вращении диска в покоящейся жидкости: вовлеченная во вращение жидкость в тонком пограничном слое у поверхности выбрасывается наружу вследствие центробежных сил и обуславливает нисходящий поток по оси ампулы.

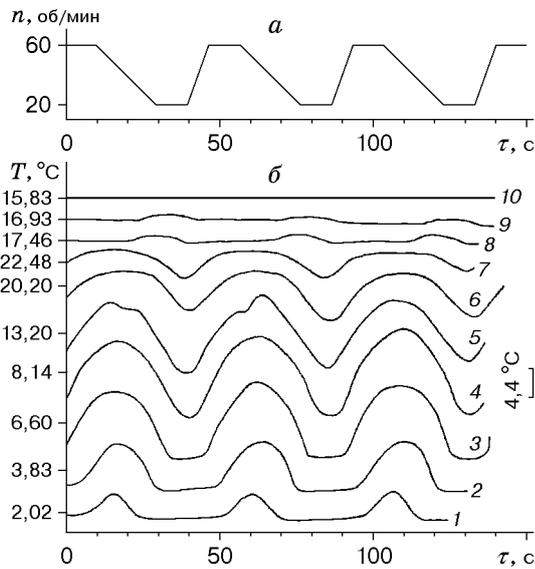


Рис. 4

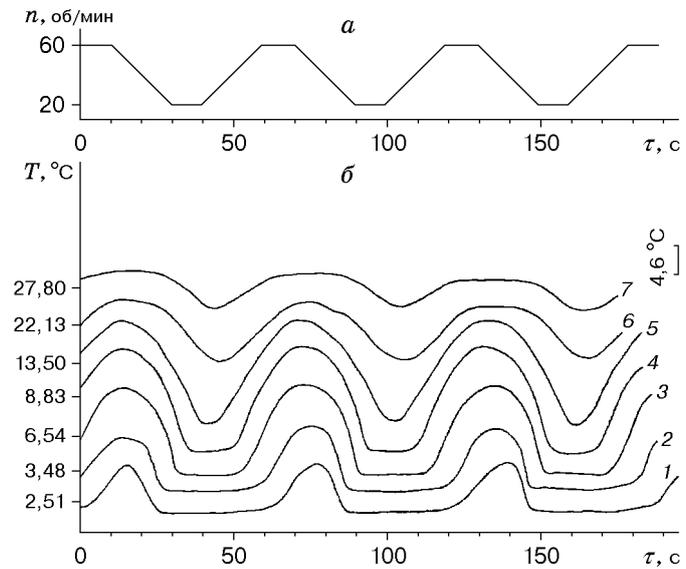


Рис. 5

Рис. 4. Закон модулированного вращения ампулы ($n_{\max} = 60$ об/мин; $n_{\min} = 20$ об/мин) (а) и зависимость мгновенных значений температуры на оси ампулы от времени (б) для несимметрично-трапецидального скоростного режима вращения ампулы ($\tau_y = 7$ с; $\tau_z = 20$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с; $H = 37,1$ мм):

1–10 — $y = 1,26; 6,04; 11,76; 15,13; 21,65; 29,46; 34,49; 38,81; 49,50; 56,86$ мм

Рис. 5. Закон модулированного вращения ампулы ($n_{\max} = 60$ об/мин; $n_{\min} = 20$ об/мин) (а) и зависимость мгновенных значений температуры на оси ампулы от времени (б) для симметрично-трапецидального скоростного режима вращения ампулы ($\tau_y = \tau_z = 20$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с; $H = 37,1$ мм):

1–7 — $y = 1,52; 5,31; 11,74; 14,90; 20,84; 30,04; 34,44$ мм

При изменении τ_y , τ_z без изменения ω_{\max} и ω_{\min} общая картина течений в расплаве остается той же. Меняются лишь период изменения направления течения и размер восходящего вихря.

На рис. 2–5 представлены зависимости температуры (по высоте слоя жидкости) от времени для различных законов изменения скорости вращения вертикальной ампулы при постоянной толщине слоя жидкости ($H = 37,1$ мм). Мощность нагревателя во всех экспериментах была постоянной. На рис. 2–5 представлены также законы изменения скорости вращения цилиндрической ампулы и значения максимальной и минимальной угловых скоростей. Видно, что характер кривых подобен закону изменения скорости вращения. Амплитуда возникающих из-за модулированного вращения колебаний температуры уменьшается по мере удаления от кольцевого нагревателя вверх (см. рис. 3, 4). Аналогично полученным ранее данным для ампул диаметром 44,5 мм при модулированном вращении по симметрично-трапецидальному закону [5] колебания температуры исчезают на высоте, соответствующей координате выхода средней температуры на стационарное значение. Для симметрично-пилообразного режима ($\tau_y = \tau_z = 20$ с) полное вырождение температурных колебаний наблюдалось на высоте 12,4 мм от верхнего среза кольцевого нагревателя. Для несимметрично-трапецидального режима изменения скорости вращения ($\tau_y = 7$ с; $\tau_z = 20$ с) вырождение температурных колебаний происходило только на высоте 19,76 мм

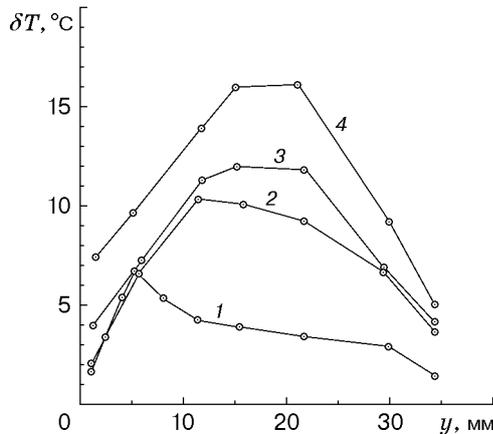


Рис. 6

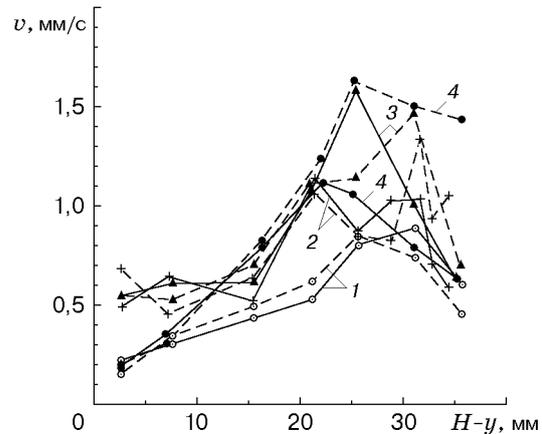


Рис. 7

Рис. 6. Изменение амплитуды температурных колебаний по высоте слоя модельной жидкости для различных режимов модулирования скорости вращения ампулы ($H = 37,1$ мм):

1 — симметрично-пилообразный ($\tau_y = \tau_z = 7$ с); 2 — симметрично-пилообразный ($\tau_y = \tau_z = 20$ с); 3 — несимметрично-трапецеидальный ($\tau_y = 7$ с; $\tau_z = 20$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с); 4 — симметрично-трапецеидальный ($\tau_y = \tau_z = 20$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с)

Рис. 7. Распределение максимальных скоростей нисходящего (сплошные кривые) и восходящего (штриховые) потоков по высоте слоя на оси ампулы ($H = 37,1$ мм) для различных скоростных режимов модулированного вращения ампулы:

1 — симметрично-пилообразный ($\tau_y = \tau_z = 20$ с); 2 — симметрично-пилообразный ($\tau_y = \tau_z = 7$ с); 3 — несимметрично-трапецеидальный ($\tau_y = 7$ с; $\tau_z = 20$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с); 4 — симметрично-трапецеидальный ($\tau_y = \tau_z = 10$ с; $\tau_{\max} = \tau_{\min} = 10$ с)

от нагревателя. Следовательно, для этого режима высота проникания восходящего потока возрастает.

На рис. 6 показано изменение амплитуды температурных колебаний ($\delta T = T_{\max} - T_{\min}$) по высоте слоя жидкости для различных режимов изменения скорости вращения. Видно, что максимальные температурные колебания наблюдаются для симметрично-трапецеидального режима (кривая 4), минимальные — для симметрично-пилообразного режима с периодом 14 с (кривая 1). При увеличении периода симметрично-пилообразного режима изменения скорости до 40 с амплитуда температурных колебаний резко возрастает (кривая 2). Для несимметрично-трапецеидального режима изменения скорости (кривая 3) амплитуда температурных колебаний больше, чем для симметрично-пилообразных режимов, но меньше, чем для симметрично-трапецеидального. (На рис. 6–8 точки соответствуют экспериментальным данным.)

Как показано в [4, 5], расстояние от фронта кристаллизации, на котором наблюдается максимальная амплитуда температурных колебаний, коррелирует с высотой осевого вихря. Максимальная амплитуда температурных колебаний для симметрично-пилообразного режима с периодом 14 с ($\tau_y = \tau_z = 7$ с) наблюдается при меньших расстояниях от фронта кристаллизации по сравнению с другими режимами, поскольку восходящий осевой вихрь при данных малых временах торможения ампулы не успевает полностью сформироваться. Очевидно, что данный скоростной режим не обеспечивает достаточного перемешивания расплава. Из рис. 6 следует, что оптимальным с точки зрения перемешивания расплава является симметрично-трапецеидальный режим изменения скорости вращения.

Максимальные значения осевой скорости восходящего и нисходящего потоков оценивались в предположении, что изменение температуры за счет теплопроводности много меньше, чем из-за конвекции (методика описана в работе [4]). На рис. 7 представлены кривые скорости нисходящего и восходящего потоков для различных режимов изменения скорости вращения ростового контейнера. Наименьшие значения максимальных скоростей восходящего и нисходящего потоков, так же как амплитуды температурных колебаний, наблюдаются для симметрично-пилообразных режимов изменения скорости вращения (кривые 1, 2). Наибольшие максимальные скорости восходящего и нисходящего потоков реализуются в симметрично-трапецеидальном режиме (кривые 4). Несколько меньшие значения максимальной скорости восходящих и нисходящих потоков наблюдаются для несимметрично-трапецеидального режима (кривые 3). Следовательно, на основе исследований значений скоростей потоков в модельной жидкости (рис. 7) установлено, что оптимальным для перемешивания расплава также является симметрично-трапецеидальный режим с линейным изменением скорости вращения (см. рис. 5,а).

Симметрично-трапецеидальный режим вращения, аналогичный модельному с теми же временными параметрами, успешно применялся нами при выращивании из расплава методом Стокбаргера монокристаллов прустита (Ag_3AsS_3) [4] и бромида свинца (PbBr_2) [14] высокого оптического качества.

С целью определения оптимального времени выдержки при постоянных максимальной и минимальной скоростях вращения симметрично-трапецеидального режима модулирования скорости вращения при $n_{\max} = 60$ об/мин и $n_{\min} = 20$ об/мин и высоте слоя $H = 37,1$ мм проведены исследования инерционности системы и времени затухания вихревых течений в расплаве после выхода на постоянные максимальные и минимальные скорости вращения. Результаты этих исследований позволяют выбрать оптимальное время существования “полочек”, где скорость вращения постоянна. Для этого первоначально устанавливался симметрично-трапецеидальный режим модулированного вращения, при котором температура менялась периодически с постоянной амплитудой. После достижения постоянного значения скорость вращения стабилизировалась ($n_{\min} = \text{const}$ или $n_{\max} = \text{const}$), одновременно фиксировалось изменение температуры во времени. Время, в течение которого температура достигала постоянного значения, находилось из зависимости температуры от времени по точке, где фиксировалось отклонение от экспоненциальной зависимости [5]. Таким образом определялось время $\tau_{\max 1}$ стабилизации скорости вращения при ее максимальном значении и время $\tau_{\max 2}$ стабилизации скорости вращения при ее минимальном значении. Зависимости $\tau_{\max 1}(y)$ и $\tau_{\max 2}(y)$ представлены на рис. 8. Оптимальные значения длительности вращения ампулы с постоянной скоростью (максимальной и минимальной) должны быть меньше характерных времен инерционности системы: $\tau_1 < \tau_{\max 1}$ и $\tau_2 < \tau_{\max 2}$.

Выводы. На основе исследований интенсивности конвективных течений (наибольших скоростей потоков) и максимальных амплитуд температурных колебаний (обусловленных модулированным вращением) при выращивании монокристаллов методом Стокбаргера с использованием АСРТ установлено, что симметрично-трапецеидальный режим вращения ростовой ампулы является оптимальным.

Малые времена ускорения и замедления скорости вращения ампулы (так же как отсутствие выдержки при постоянных максимальной и минимальной скоростях вращения) в случае симметрично-пилообразного режима препятствуют образованию интенсивного вихревого потока, поскольку эти времена намного меньше времени стабилизации температурного поля после выхода на постоянную скорость вращения.

При постоянных максимальной и минимальной скоростях вращения ростовой ампулы и мощности нагревателя, изменяя лишь параметры закона модулирования скорости

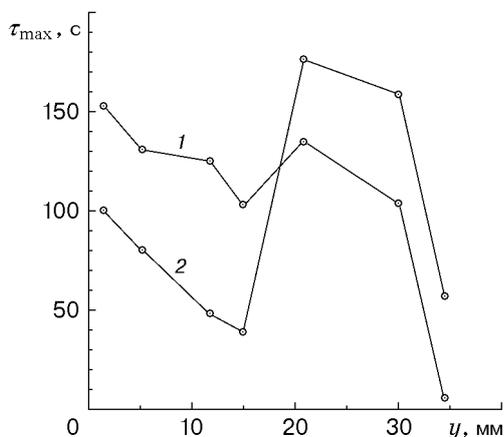


Рис. 8. Времена стабилизации температуры:
1 — $\tau_{\max 1}$ ($n_{\max} = 60$ об/мин); 2 — $\tau_{\max 2}$ ($n_{\min} = 20$ об/мин)

вращения, можно реализовывать различные температурные условия в расплаве или поддерживать их постоянными в процессе кристаллизации.

Оптимальные значения выдержки при постоянных n_{\max} и n_{\min} лежат в интервале $\tau_{\text{и}} < \tau < \tau_{\max 1}$ и $\tau_{\text{и}} < \tau < \tau_{\max 2}$ соответственно ($\tau_{\text{и}}$ — время инерционной задержки [5]).

Периодические колебания температуры в расплаве, обусловленные модулированным вращением ампулы по симметрично-пилообразному и несимметрично-трапецеидальному законам, исчезают в свободном объеме расплава над кольцевым нагревателем-диафрагмой, подобно тому, как это показано в [5] для симметрично-трапецеидального закона. При несимметрично-трапецеидальном режиме изменения скорости вращения ампулы влияние вихревого течения у фронта кристаллизации распространяется на большее расстояние в свободном объеме расплава, чем при симметрично-пилообразном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Scheel H. J., Shulz-DuBois E. O. Flux growth of large crystals by accelerated crucible rotation technique // J. Crystal Growth. 1971. V. 8. P. 304–306.
2. Scheel H. J. Accelerated crucible rotation: a novel stirring technique in high-temperature solution growth // J. Crystal Growth. 1972. V. 13/14. P. 560–565.
3. Masalov V. M., Emel'chenko G. A., Mikhajlov A. B. Hydrodynamics and oscillation of temperature in single crystal growth from high-temperature solutions with use of ACRT // J. Crystal Growth. 1992. V. 119. P. 297–302.
4. Kirdyashkin A. G., Distanov V. E. Hydrodynamics and heat transfer in a vertical cylinder exposed to periodically varying centrifugal forces (accelerated crucible rotation technique) // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1990. V. 33, N 7. P. 1397–1415.
5. Дистанов В. Э., Кирдяшкин А. Г. Моделирование теплообмена в расплаве при выращивании монокристаллов методом Стокбаргера с использованием ACRT // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 1. С. 98–104.
6. Zhou J., Larrousse M., Wilcox W. R., Regel L. L. Directional solidification with ACRT // J. Crystal Growth. 1993. V. 128. P. 173–177.
7. Turner C. E., Morris A. W., Elwell D. Control of dc motors for ACRT growth // J. Crystal Growth. 1976. V. 35. P. 234, 235.
8. Coates W. G., Capper P., Jones C. L., et al. Effect of ACRT rotation parameters on Bridgman growth CdHg_{1-x}Te crystals // J. Crystal Growth. 1989. V. 94. P. 959–966.
9. Weinert B., Kirsten P., Siegel W. The influence of crucible moving on growth rate and perfection of SSD-GaP crystals // Cryst. Res. Technol. 1987. V. 22, N 6. P. 845–853.

10. **Horowitz A., Gazit D., Makovsky J., Ben-Dor L.** Bridgman growth of Rb_2MnCl_4 via accelerated crucible rotation technique // *J. Crystal Growth*. 1983. V. 61. P. 323–328.
11. **Capper P., Gosney J. J., Jones C. L., Pearce E. J.** Fluid flows induced in tall narrow containers by ACRT // *J. Electron. Mater.* 1986. V. 16, N 6. P. 361–370.
12. **Van Dam J. C., Smeulders R. J.** Influence of Taylor vortices on the morphology during stirred solidification // *J. Mater. Sci. Lett.* 1986. V. 5. P. 599–602.
13. **McFadden G. B., Coriell S. R., Murray B. T., et al.** Effect of a crystal-melt interface on Taylor-vortex flow // *Phys. Fluids. A*. 1990. V. 2, N 5. P. 700–705.
14. **Distanov V. E., Kirdyashkin A. G.** Effect of forced convection on impurity distribution over PbBr_2 single crystals // *Inorganic Mater.* 1997. V. 33, N 11. P. 1177–1179.

*Поступила в редакцию 28/X 1999 г.,
в окончательном варианте — 26/V 2000 г.*
