

**С. П. Саханский**, д-р техн. наук, проф.,  
Сибирский государственный аэрокосмический университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева

## Управление выращиванием кристаллов лейкосапфира

*Разработана модель управления нагревом и скоростью вытягивания кристаллов лейкосапфира при выращивании из жидкого расплава. Модель работает в реальном масштабе времени, на современных контроллерах, обеспечивая плоский фронт кристаллизации кристалла во время всего процесса. Приведена структурная схема весовой системы управления для вытягивания кристаллов лейкосапфира на основе взвешивания убывающего расплава в тигле и получения сигнала управления в функции отклонения текущей площади кристалла от заданной.*

**Ключевые слова:** выращивание кристаллов лейкосапфира, управление нагревом и скоростью вытягивания, весовая система управления

### Введение

Лейкосапфир представляет собой монокристаллы оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Сапфир — один из самых твердых минералов, оптически прозрачен, обладает высокой температурой плавления, исключительно стоек к разрушениям, в том числе в агрессивных средах. Обладает высокой теплопроводностью при низких температурах и высоким удельным сопротивлением. Лейкосапфир синтезируется в промышленных масштабах по всему миру. Для выращивания особо чистых монокристаллов сапфира большого размера, пригодных для получения пластин и изготовления подложек с различной ориентацией, а также других изделий с высокими оптическими свойствами, обычно используют метод Киропулоса (Мусатова, ГОИ) или метод Чохральского, при котором выращивание кристалла осуществляется из неподвижного молибденового или вольфрамового тигля, с расплавом из жидкого материала. Мощность нагрева изменяется в пределах заданного диапазона мощности (например, при подводимой мощности 50 кВт и постоянном напряжении на нагревателе 24 В управление происходит за счет изменения тока нагревателя в диапазоне 0...2 кА). Резистивный нагреватель изготавливается, как правило, из набора тугоплавких вольфрамовых стержней.

По мере роста кристалл постепенно вытягивают из расплава, вращая его вокруг собственной оси. При выращивании диаметр выращиваемого кристалла ограничивается лишь размерами тигля и может достигать 500 мм и более.

Для снижения остаточных напряжений, приводящих к растрескиванию, выращенные кристаллы подвергаются отжигу в специальных высоковакуумных отжиговых установках. Сложности технологического процесса получения качественных кристаллов лейкосапфира посвящены работы [1, 2].

Экспериментальный завод научного приборостроения РАН ФГУП ЭЗАН наладил выпуск ряда промышленных установок вытягивания кристаллов лейкосапфира, в частности установки НИК-3, которая имеет следующие характеристики:

- диаметр выращиваемых кристаллов 0...150 мм;
- система взвешивания имеет линейный диапазон 0...10 кг и чувствительность 0,04 г;
- скорость вытягивания кристалла регулируется в диапазоне 0,02...2 мм/мин;
- скорость вращения кристалла изменяется в пределах 1...100 мин<sup>-1</sup>;
- мощность источника нагрева установлена равной 100 кВт и регулируется в диапазоне 1...100 %.

В разработанных в данное время у нас и за рубежом установках вытягивания кристаллов лейкосапфира из неподвижного тигля с жидким расплавом имеются следующие особенности:

- управление температурой расплава проводится косвенно, за счет регулирования подводимой к нагревателю мощности, так как применение при температурах более 2200 °С датчиков температуры на основе термопар для ее регулирования или использования показаний радиационного пирометра оказалось сложной задачей;
- контроль и управление текущей площадью выращиваемого кристалла происходит визуально, через верхнее смотровое окно установки (при наблюдении и коррекции оператором текущего диаметра кристалла) или на основе сигнала управления с датчика веса (весов, взвешивающих неподвижный тигель с расплавом или сам выращиваемый кристалл);
- для диаметров кристалла более 500 мм часто управление вращением затравки кристалла отсутствует (в связи с большой массой кристалла и опасностью его обрыва от затравки в процессе роста);

- диапазон рабочих скоростей вытягивания лейкосапфира очень низок, поэтому длительность процесса выращивания кристалла может достигать нескольких недель, что требует высоконадежной работы оборудования и полной автоматизации процесса выращивания.

### Весовой метод выращивания кристаллов

В последнее время большое развитие получил предложенный фирмой Royal Radar Establishment метод непосредственного контроля изменения диаметра растущего кристалла путем непосредственного взвешивания самого кристалла или тигля с расплавом [3]. В работах [4, 5] для взвешивания тигля применены стандартные электронные весы, здесь же указывается на необходимость учета в формировании сигнала управления сил поверхностного натяжения и на достигнутую точность поддержания диаметра кристалла весовым методом в пределах 1 %.

При весовом методе выращивание кристаллов лейкосапфира происходит в тигле с внутренним диаметром  $D$ , в котором находится жидкий расплавленный металл (рис. 1). Кристалл диаметром  $d$  вытягивается из расплава со скоростью вытягивания  $V_3$  и скоростью вращения  $W_3$  кристалла. Выращиваемый кристалл помещен в закрытую тепловую оснастку для обеспечения необходимых температурных условий роста. Процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме. Ток расплава поддерживается за счет управления мощностью нагревателя с использованием показаний датчика тока нагревателя, это управление осуществляет стандартный управляемый регулятор тока.

Вес убывающего расплава в тигле измеряется системой взвешивания тигля. Система управления на базе ЭВМ вычисляет разностный сигнал управления как функцию отклонения текущей площади

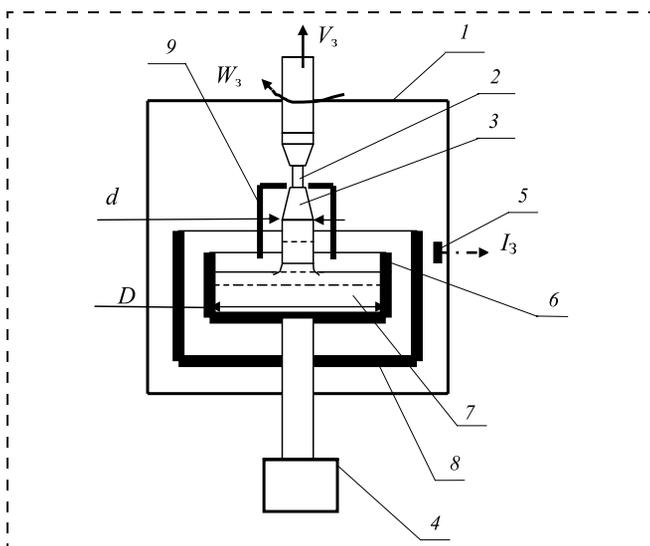


Рис. 1. Схема весового метода измерения при выращивании кристаллов лейкосапфира:

1 — камера; 2 — заправка; 3 — кристалл; 4 — весы; 5 — датчик тока; 6 — тигель; 7 — расплав металла; 8 — нагреватель; 9 — тепловая оснастка

кристалла от заданной на основе вычисленных перемещений кристалла и изменения веса убывающего расплава в неподвижном тигле, вводя корректирующий сигнал управления по температуре в мощность нагрева и скорость вытягивания кристалла.

Контур изменения мощности (тока), подаваемый на нагреватель, является одним из основных контуров программного регулирования температуры, обеспечивающего заданную форму слитка. При этом в качестве датчика обратной связи по температуре для лейкосапфира удобно взять датчик силы тока нагревателя при заданном постоянном напряжении нагревателя.

Исходя из вышеизложенного принципы автоматического управления современной системой автоматического выращивания кристаллов лейкосапфира можно свести к следующим основным циклам.

1. Автоматическое вакуумирование установки, расплавление, выдержка в расплавленном состоянии и снижение температуры до температуры затравления при расплавлении материала лейкосапфира в неподвижном тигле.

2. Автоматизированное или с участием оператора затравление и вытягивание шейки кристалла определенной длины.

3. Автоматизированное вытягивание прямого конуса кристалла.

4. Автоматизированное вытягивание цилиндрической части кристалла.

5. Автоматический отжиг кристалла в камере по программе с завершением процесса вытягивания.

Ниже приводится математический аппарат формирования управляющих воздействий.

Системы управления реализуются, как правило, на базе современных контроллеров и ЭВМ, при этом программно задаются изменения всех параметров вытягивания:

$T_3$  — температуры расплава (или тока нагревателя  $I_3$ );

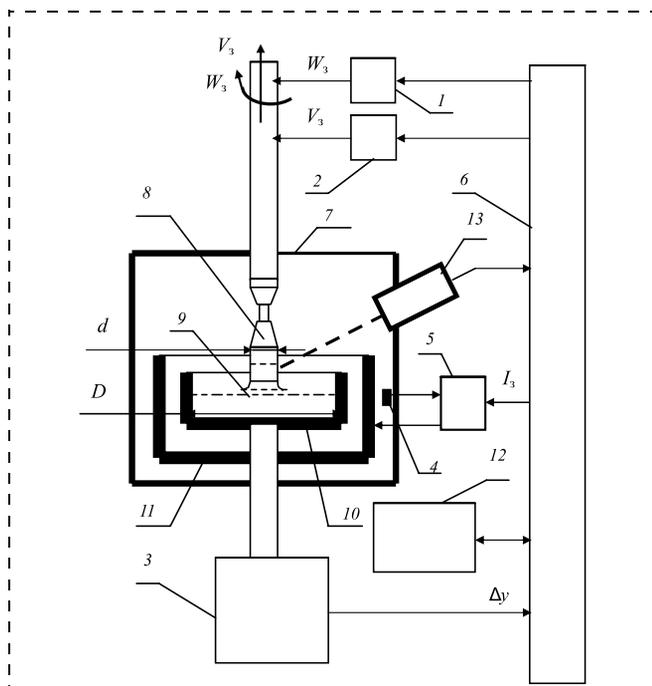
$V_3$  — скорости вытягивания кристалла;

$W_3$  — скорости вращения кристалла.

Сигнал от весовой системы регулирования диаметра воздействует пропорционально на скорость вытягивания и интегрально на температуру (ток) на цилиндрической части выращивания кристалла. Управление скоростью вытягивания кристалла  $V_3(x)$ , током нагревателя  $I_3(x)$ , скоростью вращения кристалла  $W_3(x)$  выполняется на основе следующих выражений:

$$\begin{aligned} V_3(x) &= V_{3п}(x) + ZK_V \Delta y; \\ I_3(x) &= I_{3п}(x) + ZA_T [\Delta y dx]; \\ W_3(x) &= W_{3п}(x), \end{aligned}$$

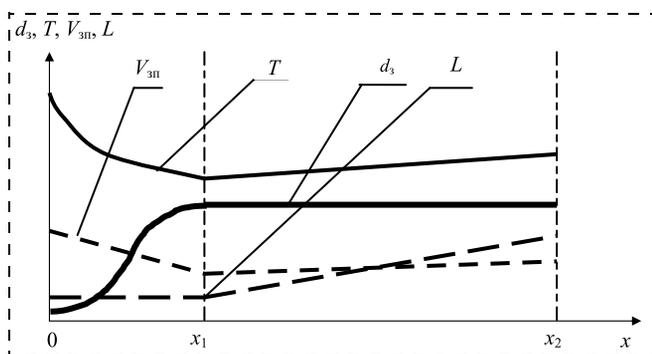
где  $K_V$  — пропорциональный коэффициент регулирования по скорости;  $A_T$  — интегральный коэффициент регулирования по температуре;  $V_{3п}(x)$ ,  $W_{3п}(x)$ ,  $I_{3п}(x)$  — программное задание закона изменения технологических параметров;  $V_3(x)$ ,  $W_3(x)$ ,  $I_3(x)$  — общие управления технологическими параметрами;  $Z$  — признак захвата управления по диаметру на цилиндрической части кристалла;  $x$  — пе-



**Рис. 2. Структурная схема системы управления выращиванием лейкосапфира на основе весового метода измерения:**  
 1 — привод вращения затравки; 2 — привод перемещения затравки; 3 — весы; 4 — датчик тока; 5 — преобразователь тока; 6 — контроллер; 7 — камера; 8 — слиток; 9 — расплав металла; 10 — тигель; 11 — нагреватель; 12 — ЭВМ; 13 — оптический пирометр



**Рис. 3. Кристаллы лейкосапфира**



**Рис. 4. Управление параметрами процесса выращивания кристаллов лейкосапфира:**  
 $d_3$  — задание диаметра выращиваемого монокристалла;  $T$  — программное задание закона изменения температуры;  $L$  — задание осевого градиента;  $x$  — перемещение кристалла;  $x_1$  — координата завершения формирования прямого конуса кристалла;  $x_2$  — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла;  $V_{зп}$  — программное изменение скорости вытягивания

ремещение вдоль оси кристалла;  $\Delta y$  — сигнал отклонения заданной площади кристалла от текущей на основе изменения веса тигля.

Процесс стабилизации диаметра кристалла происходит в системе управления по приведенным выше выражениям при включении признака захвата управления по диаметру ( $Z = 1$ ) на цилиндрической части выращиваемого кристалла. Подробная структурная схема весовой системы управления при выращивании лейкосапфира представлена на рис. 2.

При весовом методе выращивания кристаллов лейкосапфира в тигле с внутренним диаметром  $D$  находится жидкий расплавленный металл, кристалл диаметром  $d$  вытягивается из расплава со скоростью вытягивания  $V_3$  и скоростью вращения  $W_3$  кристалла. Выращиваемый монокристалл помещен в закрытую тепловую оснастку для обеспечения необходимых температурных условий роста. Процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме.

Ток расплава поддерживается постоянным за счет управления мощностью нагревателя с использованием показаний датчика тока (шунта постоянного тока), которое осуществляет стандартный управляемый регулятор.

Вес убывающего расплава в тигле измеряется системой взвешивания тигля. Система управления на базе ЭВМ вычисляет разностный сигнал управления как функцию отклонения текущей площади кристалла от заданной на основе вычисленных перемещений кристалла и изменения веса убывающего расплава в неподвижном тигле. Оптический пирометр через смотровое окно установки направлен на твердую часть выращиваемого кристалла для измерения и ввода в систему осевого градиента в твердой части выращиваемого кристалла. На рис. 3 приведен вид полученных на основе весового метода измерения готовых кристаллов лейкосапфира.

Если в системе управления выращиванием кристаллов из расплава в соответствии с заданной формой (геометрией) выращивания кристалла сформировать управление скоростью вытягивания и температурой кристалла при обеспечении фронта кристаллизации кристалла, близкого к плоскому в течение всего процесса, то это дает возможность обеспечить высокое качество получаемых монокристаллов. Для сохранения стабильного роста кристалла дополнительно необходима плавность перехода из начальной стадии вытягивания от кристаллической затравки кристалла к выращиванию прямого конуса, а также завершение перехода с выращивания прямого конуса на цилиндрическую часть кристалла. В общем виде процесс управления основными параметрами выращивания кристалла при выращивании из жидкого расплава кристаллов лейкосапфира изображен на рис. 4.

Форма прямого и обратного конуса выращиваемого кристалла (рис. 4) имеет вид косиносоидальных непрерывных линий на участке прямого конуса, с нулевым начальным и конечным углом сопряжения с поверхностью выращиваемого кристалла. Это обеспечивает плавный переход и устойчивость роста кристалла на переходных участках.

## Математическая модель выращивания кристаллов

Ниже приводятся математические выражения для формирования программного управления температурой  $T(x)$  и скоростью вытягивания  $V_{зп}(x)$ , полученные на основе работ [6–16], которые позволяют автоматизировать процесс ввода данных параметров в систему управления.

Модель управления температурой и скоростью при выращивании кристаллов можно представить в виде выражения

$$T(x) = F(Z, Y, V_{зп}(x), L(x), x), \quad (1)$$

где  $T(x)$  — средняя температура расплава в зоне фронта кристаллизации;  $V_{зп}(x)$  — скорость вытягивания кристалла;  $x$  — координата перемещения вдоль оси кристалла;  $L(x)$  — линейный осевой градиент в твердом кристалле;  $Z$  — геометрические параметры выращиваемого кристалла;  $Y$  — теплофизические параметры материала.

При выращивании материалов из жидкого расплава их фронт кристаллизации, отделяющий жидкую часть расплава от твердой, поднимается над поверхностью расплава на 1...5 см.

Если приравнять вес поднятой массы жидкого столбика расплава (до фронта кристаллизации) силам поверхностного натяжения, действующим по окружности, и учесть выражение высоты столбика расплава через уравнение теплового баланса на фронте кристаллизации, то можно получить зависимость [16] диаметра кристалла  $d$  от скорости вытягивания  $V_3$  и температуры расплава  $T$  в виде выражения

$$d = C_t \frac{[L - C_V V_3]}{[T - T_k]}, \quad (2)$$

где  $C_V = \rho_{ж} \frac{E}{\lambda_{ТВ}}$ ;  $C_t = 4 \frac{\sigma \lambda_{ТВ}}{\rho_{ж} \lambda_{ж} g}$ ;  $V_3$  — скорость вытягивания кристалла;  $T_k$  — температура кристаллизации материала;  $T$  — средняя температура расплава в зоне фронта кристаллизации;  $L$  — линейный осевой градиент в твердом кристалле;  $E$  — удельная теплота плавления материала;  $\lambda_{ж}$  — коэффициент теплопроводности расплава;  $\lambda_{ТВ}$  — коэффициент теплопроводности кристалла;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\sigma$  — поверхностное натяжение расплава;  $\rho_{ж}$  — удельная плотность жидкого материала;  $d$  — диаметр выращиваемого кристалла.

Для задания средней температуры расплава выражение (2) можно представить в виде

$$T(x) = T_k + C_t \frac{[L - C_V V_{зп}(x)]}{d_3(x)}, \quad (3)$$

где  $d_3(x)$  — программное задание выращиваемого диаметра кристалла;  $V_{зп}(x)$  — программное задание скорости вытягивания кристалла;  $x$  — координата перемещения кристалла.

Управление скоростью вытягивания кристаллов лейкосапфира в закрытой тепловой оснастке позволяет сформировать плоский фронт кристалли-

зации при выращивании прямого конуса кристалла и его цилиндрической части, что необходимо для многих марок кристалла.

Выражение (2) можно рассматривать в следующем виде для определения необходимой скорости вытягивания кристалла:

$$\lambda = C_t \frac{[L - C_V V_3]}{d}, \quad (4)$$

где  $\lambda = [T - T_k]$  — величина среднего перегрева расплава относительно температуры кристаллизации материала.

В общем случае перегрев  $\lambda$  согласно уравнениям есть функция осевого градиента в кристалле  $L$  и задаваемой скорости вытягивания  $V_3$  кристалла. Перегрев  $\lambda$  и осевой градиент выращиваемого кристалла могут быть определены путем замера оптическим пирометром (через смотровое окно установки вытягивания) области, прилегающей к фронту кристаллизации материала при отработке конкретной технологии выращивания кристаллов.

Используя линейную аппроксимацию скорости вытягивания на узловых участках выращивания кристалла (прямой конус, цилиндрическая часть), можно получить выражения для определения задания скорости вытягивания на конусной и цилиндрической частях кристалла соответственно:

$$V_{зп}(x) = V_0 - \frac{x[V_0 - V_1]}{x_1};$$

$$V_{зп}(x) = V_1 - \frac{(x - x_1)[V_1 - V_2]}{(x_2 - x_1)},$$

где  $V_3(x) = V_{зп}(x)$  — программное задание скорости вытягивания;  $V_0$  — начальная скорость вытягивания кристалла при включении режима "автомат";  $V_1$  — скорость вытягивания кристалла при завершении формирования обратного конуса;  $V_2$  — скорость вытягивания кристалла при завершении формирования цилиндра;  $x_1$  — координата завершения формирования прямого конуса кристалла;  $x_2$  — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла;  $x$  — координата перемещения по оси кристалла.

Для определения значений координат скорости вытягивания в узловых точках ( $V_0, V_1, V_2, V_3$ ) преобразуем выражение (4) к виду

$$V_3(d) = \left[ L - \frac{\lambda d}{C_t} \right] \frac{\beta_i}{C_V}, \quad (5)$$

где  $V_3(d)$  — скорость вытягивания кристалла;  $d$  — диаметр кристалла;  $\beta_i$  — технологический коэффициент снижения скорости (0,95...0,25).

Из выражения (5) для узловых точек скорости вытягивания получим следующие выражения:

$$V_0 = \left[ L_0 - \frac{\lambda d_0}{C_t} \right] \frac{\beta_0}{C_V};$$

$$V_1 = \left[ L_0 - \frac{\lambda d_1}{C_t} \right] \frac{\beta_1}{C_V};$$

$$V_2 = \left[ L_1 - \frac{\lambda d_1}{C_t} \right] \frac{\beta_2}{C_V},$$

где  $L_0$  — осевой градиент в начале цилиндрической части кристалла;  $L_1$  — осевой градиент в конце цилиндрической части кристалла;  $V_0, V_1, V_2$  — узловые точки скорости вытягивания;  $d_0$  — диаметр вытягиваемой шейки кристалла при включении режима "автомат";  $d_1$  — диаметр цилиндрической части кристалла.

Технологические поправочные коэффициенты  $\beta_i$  вводятся для возможности корректировки скорости вытягивания на основе технологических требований (например, равномерности легирования кристалла по его длине при допущении некоторого прогиба фронта кристаллизации в сторону расплава на цилиндрической части выращиваемого кристалла).

Косинусоидальный закон для непрерывного вычисления управляющим контроллером в системе управления установкой выращивания задается на прямом конусе в виде цепной дроби Якоби [17] обычной точности по выражению

$$\begin{aligned} \cos(x) &= \\ &= (\pi/2 - x) \left[ K_1 + \frac{K_2}{(\pi/2 - x)^2 + K_3 + \frac{K_4}{(\pi/2 - x)^2 + K_5}} \right], \end{aligned}$$

где  $K_1 = 6,63550098$ ;  $K_2 = -729,384055$ ;  $K_3 = 52,9056381$ ;  $K_4 = 1212,885446$ ;  $K_5 = 15,8503569$ .

Используя линейную аппроксимацию параметров на остальных участках выращивания кристалла, можно получить выражения для вычисления программы управления скоростью и температурой на всех участках при косинусоидальном задании формы выращивания прямого конуса кристалла.

Выражения по заданию диаметра  $d_3(x)$  и температуры  $T(x)$  на прямом конусе кристалла примут вид

$$d_3(x) = d_0 + \frac{(d_1 - d_0)}{2} - \left( \frac{d_1 - d_0}{2} \right) \cos\left(\frac{\pi}{x_1} x\right);$$

$$T_{зп}(x) = T_K + C_t \frac{[L_0 - C_V V_{зп}(x)]}{\left[ d_0 + \frac{(d_1 - d_0)}{2} - \left( \frac{d_1 - d_0}{2} \right) \cos\left(\frac{\pi}{x_1} x\right) \right]},$$

где  $x_1$  — координата завершения формирования прямого конуса кристалла;  $L_0$  — осевой градиент в кристалле на конусной части;  $d_0$  — диаметр вытягиваемой шейки кристалла;  $d_1$  — диаметр цилиндрической части кристалла.

Выражения, задающие диаметр  $d_3(x)$  кристалла и температуру  $T(x)$  на цилиндрической части кристалла, имеют вид

$$\begin{aligned} d_3(x) &= d_1; \\ T(x) &= T_K + C_t \frac{\left[ L_0 + [x - x_1] \frac{(L_1 - L_0)}{(x_2 - x_1)} - C_V V_{зп}(x) \right]}{d_1}, \end{aligned}$$

где  $x_2$  — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла;  $L_1$  — осевой градиент в кристалле в конце цилиндрической части.

В свою очередь, выражения для линейного задания диаметра  $d_3(x)$  кристалла и температуры  $T(x)$  на участке выращивания прямого конуса кристалла будут иметь вид

$$\begin{aligned} d_3(x) &= d_0 + \frac{x[d_1 - d_0]}{x_1}; \\ T_{зп}(x) &= T_K + C_t \frac{[L_0 - C_V V_{зп}(x)]}{\left[ d_0 + \frac{x[d_1 - d_0]}{x_1} \right]}. \end{aligned}$$

Моделирование скорости и температуры выращивания кристалла лейкосапфира на основе приведенной модели и теплофизических постоянных материала [18] проиллюстрировано на рис. 5—7

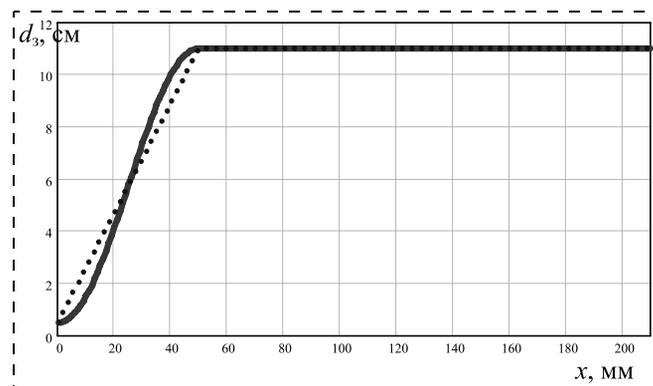


Рис. 5. Задание диаметра кристалла лейкосапфира при:  $x_1 = 50$  мм;  $x_2 = 210$  мм;  $x_3 = 260$  мм;  $d_0 = 0,5$  см;  $d_1 = 11$  см

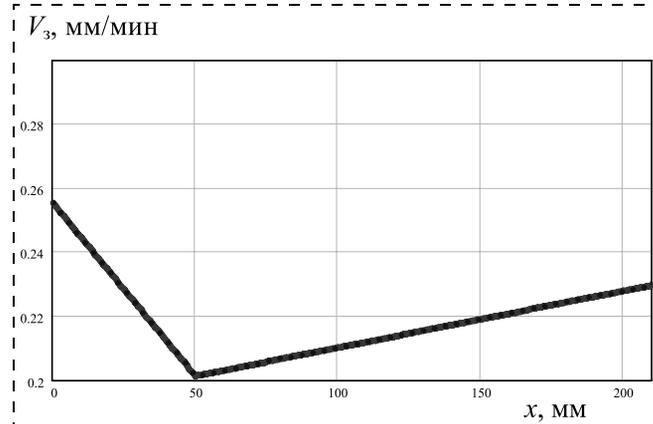
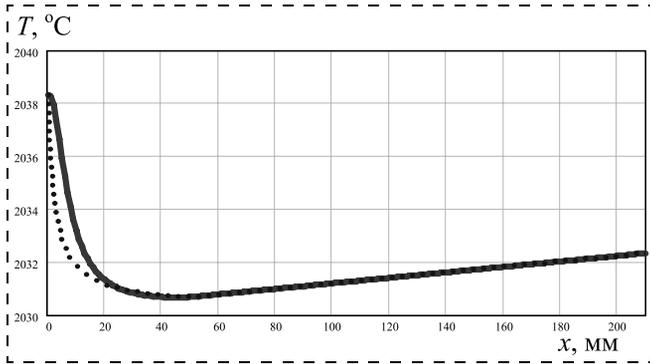


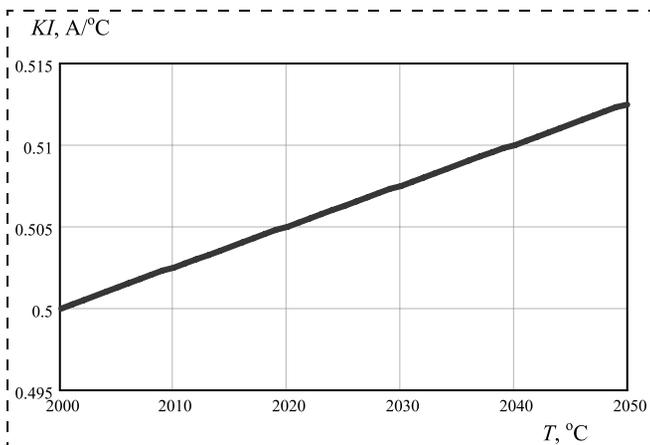
Рис. 6. Задание скорости вытягивания лейкосапфира при:  $d_0 = 0,5$  см;  $x_1 = 50$  мм;  $x_2 = 210$  мм;  $x_3 = 260$  мм;  $d_1 = 11$  см;  $\lambda = 0,4$  °C;  $\beta_1 = 0,8$ ;  $\beta_2 = 0,8$ ;  $\beta_3 = 0,4$ ;  $\beta_4 = 0,6$ ;  $L_0 = 20$  °C/см;  $L_1 = 40$  °C/см

как для линейного, так и для косинусоидального видов задания прямого конуса кристалла (косинусоидальный закон выделен сплошной линией).

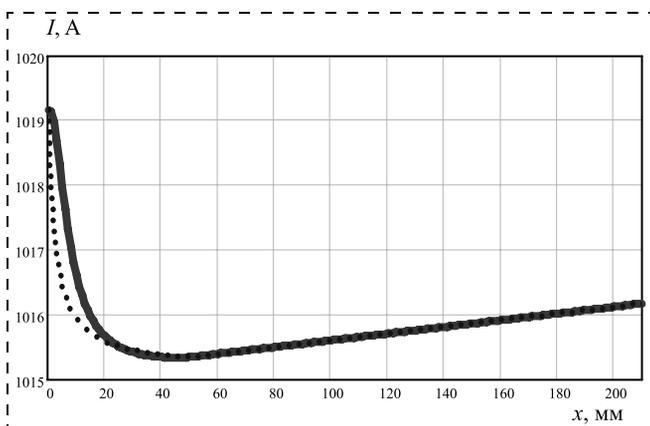
При переходе управления от температуры к управлению током нагревателя необходимо на установке вытягивания определить коэффициент  $KI$  связи силы тока управления резистивным нагревателем (при постоянном напряжении на нагревателе) с температурой расплава, при измерении темпера-



**Рис. 7. Задание температуры вытягивания лейкосапфира при:**  $d_0 = 0,5$  см;  $x_1 = 50$  мм;  $x_2 = 210$  мм;  $x_3 = 260$  мм;  $d_1 = 11$  см;  $\lambda = 0,4$  °C;  $\beta_1 = 0,8$ ;  $\beta_2 = 0,8$ ;  $\beta_3 = 0,4$ ;  $\beta_4 = 0,6$ ;  $L_0 = 20$  °C/см;  $L_1 = 40$  °C/см



**Рис. 8. График зависимости коэффициента  $KI$  от температуры расплава**



**Рис. 9. Задание тока вытягивания лейкосапфира при:**  $d_0 = 0,5$  см;  $x_1 = 50$  мм;  $x_2 = 210$  мм;  $x_3 = 260$  мм;  $d_1 = 11$  см;  $\lambda = 0,4$  °C;  $\beta_1 = 0,8$ ;  $\beta_2 = 0,8$ ;  $\beta_3 = 0,4$ ;  $\beta_4 = 0,6$ ;  $L_0 = 20$  °C/см;  $L_1 = 40$  °C/см;  $KI = 0,5$  A/°C

туры расплава материала оптическим пирометром. График измерения приведен на рис. 8, в результате после преобразований на рис. 9 была получена программа задания силы тока нагревателя.

Переходными формулами для задания силы тока на прямом конусе (для косинусоидального закона) и на цилиндрической части кристалла служат следующие выражения:

$$I_{3П}(x) = \left( T_k + C_t \frac{[L_0 - C_V V_{3П}(x)]}{\left[ d_0 + \frac{(d_1 - d_0)}{2} - \left( \frac{d_1 - d_0}{2} \right) \cos\left( \frac{\pi}{x_1} x \right) \right]} \right) KI;$$

$$I_{3П}(x) = \left( T_k + C_t \frac{\left[ L_0 + [x - x_1] \frac{(L_1 - L_0)}{(x_2 - x_1)} - C_V V_{3П}(x) \right]}{d_1} \right) KI,$$

где  $KI$  — переходной коэффициент установки вытягивания лейкосапфира при резистивном нагревателе (с управлением по току).

### Заключение

Получена модель управления мощностью нагрева и скоростью вытягивания кристаллов лейкосапфира при выращивании из жидкого расплава, которая позволяет вводить данное управление в систему управления установкой вытягивания, обеспечивая плоский фронт кристаллизации кристалла в процессе выращивания и получение необходимой формы готовой продукции.

Предложенная модель управления может быть применена на установках вытягивания кристаллов лейкосапфира, а алгоритм вычисления работает в реальном масштабе времени под управлением современных управляющих контроллеров, имеющих арифметику с плавающей запятой в системе команд контроллера.

### Список литературы

1. Багдасаров Х. С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004. 160 с.
2. Клуникова Ю. В. Модель влияния параметров технологического процесса получения сапфира на качество кристаллов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7 (108). С. 198–203.
3. Bardsley W., Green G. W., Holliday C. H., Hurle D. T. J. Crystall Growth. 1972. vol. 16, no. 3, pp. 277–279.
4. Blumberg H., Reiche P., Watringer W. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing method // Crystal Research and Technology. 1981. vol. 10, no. 11, pp. 1323–1338.
5. Blumberg H., Reiche F. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing technique // Eur. Meet. Cryst. Growth., 82: Mater. Electron. Prague, Aug, 23–28, 1982, Usti nad Labem, s. a., pp. 51–52.
6. Шендерович И. Л., Шубский Г. И. Принципы построения систем управления процессом выращивания монокристаллов методом Чохральского // Научные труды Гиредмета. 1976. Т. 78. С. 111–115.
7. Саханский С. П. Управление температурой нагревателя на установке выращивания монокристаллов германия // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 1. С. 42–46.

8. Саханский С. П., Баркин С. М. Модель управления температурой при выращивании кремния // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 3, Вып. 29. С. 149–153.

9. Саханский С. П., Якобсон М. Е. Модель управления скоростью вытягивания монокристаллов кремния // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 5, Вып. 31. С. 254–258.

10. Саханский С. П. Управление скоростью вытягивания на установке выращивания монокристаллов германия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 4. С. 7–11.

11. Саханский С. П. Управление температурой при выращивании монокристаллов германия // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 3. С. 8–10.

12. Саханский С. П. Управление скоростью вытягивания при выращивании монокристаллов кремния // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2010. № 8. С. 37–39.

13. Саханский С. П. Модель управления формой при выращивании монокристаллов германия // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 2–5.

14. Саханский С. П. Задание температуры при выращивании монокристаллов кремния // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 44–48.

15. Саханский С. П. Управление формой полупроводниковых кристаллов при выращивании по способу Чохральского // Журнал СВФУ. Техника и технологии. 2014. Т. 7, Вып. 1. С. 20–31.

16. Саханский С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия. Красноярск: Изд. СибГАУ, 2008. 104 с.

17. Благовещенский Ю. В. Вычисление элементарных функций на ЭВМ. Киев: Техника, 1977. 207 с.

18. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

## Control of Cultivation of Leicosapphir Crystals

S. P. Sakhansky, Sahanskiy@yandex.ru,

Reshetnev Siberian University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Corresponding author: Sakhanskiy Sergei P., D. Sc., Professor at the department of management information systems, Reshetnev Siberian University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, E-mail: Sahanskiy@yandex.ru

Accepted on August 14, 2017

A model is developed for controlling the heating and the rate of drawing of leucosapphir crystals, when grown from a liquid melt. The model operates in real-time, on modern controllers, providing a flat front of crystal crystallization throughout the process. A block diagram of the weight control system for growing leucosapphir crystals is presented based on weighing the descending melt in a crucible and obtaining a control signal in function of deviating the current crystal area from a given one. The above model control heating and crystal pulling rate of sapphire crucible stationary liquid melt operates based on reference shape of the growing crystal and the axial gradient throughout the process and allows to set the drawing speed and the power for the heating installation, before starting the growth process. On the basis of the liquid melt, which changes during the growth of the weight, a correction signal is introduced in the control system as a deviation of the varying weight of the crucible with the melt from the programmed one on the cylindrical part of the grown crystal. The control signal, as an integral component, is introduced into the heating power circuit, and as proportional to the pulling speed loop, periodically each cycle of the crystal moving by 1 mm, provides the given shape of the grown cylindrical part of the crystal. The results of this work can be used in the design and modernization of existing growth plants for the growth of leucosapphir crystals from a fixed crucible with a melt.

**Keywords:** cultivation of leucosapphir crystals, control of heating and drawing speed, weight control system

For citation:

Sakhansky S. P. Control of Cultivation of Leicosapphir Crystals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 840–846.

DOI: 10.17587/mau.18.840-846

### References

1. Bagdasarov Kh. S. *Vysokotemperaturnaya kristallizatsiya iz rasplava* (High-temperature crystallization from a melt), Moscow, Fizmatlit, 2004, 160 p. (in Russian).

2. Klunnikova Yu. V. *Model' vliyaniya parametrov tekhnologicheskogo tekhnologicheskogo protsessa polucheniya sifira na kachestvo kristallov* (Model of the influence of parameters of the technological process of obtaining sapphire on the quality of crystals), *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 7 (108), pp. 198–203 (in Russian).

3. Bardsley W., Green G. W., Holliday C. H., Hurle D. T. J. *Growth*, 1972, vol. 16, no. 3, pp. 277–279.

4. Blumberg H., Reiche P., Watringer W. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing method, *Crystal Research and Technology*, 1981, vol. 10, no. 11, pp. 1323–1338.

5. Blumberg H., Reiche F. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing technique, *Eur. Meet. Cryst. Growth*, 82: Mater. Electron. Prague, Aug. 23–28, 1982, Usti nad Labem, s.a., pp. 51–52.

6. Shenderovich I. L., Shubskiy G. I., *Printsi py postroeniya sistem upravleniya protsessom vyrashchivaniya monokristallov metodom Chokhralskogo* (Principles for constructing control systems for the growing of single crystals by the Czochralski method), *Nauchnye Trudy Giredmeta*, Moscow, 1976, vol. 78, pp. 111–115 (in Russian).

7. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie temperatury nagrevatelya na ustanovke vyrashchivaniya monokristallov germaniya* (Controlling the temperature of the heater in a plant for growing germanium single crystals), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 1, pp. 42–46 (in Russian).

8. Sakhanskiy S. P., Barkin C. M. *Model' upravleniya temperatury pri vyrashchivaniy kremniya* (Temperature control model for silicon growth), *Vestnik SibGAU*, 2010, vol. 3, no. 29, pp. 149–153 (in Russian).

9. Sakhanskiy S. P., Yakobson M. E. *Model' upravleniya skorost'yu vytyagivaniya monokristallov kremniya* (Model for controlling the drawing speed of silicon monocrystals), *Vestnik SibGAU*, 2010, vol. 5, no. 31, pp. 254–258 (in Russian).

10. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie skorost'yu vytyagivaniya na ustanovke vyrashchivaniya monokristallov germaniya* (Controlling the drawing speed in a plant for growing germanium single crystals), *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*, 2008, no. 4, pp. 7–11 (in Russian).

11. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie temperatury pri vyrashchivaniy monokristallov germaniya* (Temperature control in growing single crystals of germanium), *Pribory i sistemy. Avtomatizatsiya i sovremnyye tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 8–10 (in Russian).

12. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie skorost'yu vytyagivaniya pri vyrashchivaniy monokristallov kremniya* (Office pulling speed in growing single crystals of silicon), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 8, pp. 37–39 (in Russian).

13. Sakhanskiy S. P. *Model' upravleniya formoy pri vyrashchivaniy monokristallov germaniya* (Management model form in growing single crystals of germanium), *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 6, pp. 2–5 (in Russian).

14. Sakhanskiy S. P. *Zadanie temperatury pri vyrashchivaniy monokristallov kremniya* (Setting the temperature for growing silicon single crystals), *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*, 2011, no. 2, pp. 44–48 (in Russian).

15. Sakhanskiy S. P. Control of the shape of semiconductor crystals when grown using the Czochralski method, *J/Sib. Fed. Univ. Eng., Technol.*, 2014, vol. 7 no. 1, pp. 20–31 (in Russian).

16. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya: monografiya* (Management process of growing single crystals of germanium: monograph), SibGAU Publ., 2008, 104 p. (in Russian).

17. Blagoveshchenskiy Y. V. *Vychislenie elementarnykh funktsiy na EVM*. (Calculation of elementary functions on computers.), Kiev, Technique, 1977, 207 p. (in Russian).

18. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. ed. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* (Physical quantities: Directory), Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).