

УДК 54.053:62-523.6

АДАПТИВНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ЧОХРАЛЬСКОГО, СТЕПАНОВА (EFG) И КИРОПУЛОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА ВЕСА

© 2022 г. А. В. Бородин^{а, *}, В. А. Бородин^{а, *}, Д. Н. Францев^{б, **}, М. В. Юдин^{б, **}

^аЭкспериментальный завод научного приборостроения
со Специальным конструкторским бюро РАН, Черноголовка, 142432 Россия

^бИнститут физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН,
Черноголовка, 142432 Россия

*e-mail: bor@ezan.ac.ru

**e-mail: faramir@ezan.ac.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021 г.

После доработки 20.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

Обобщаются результаты создания адаптивных систем управления процессами выращивания монокристаллов оксидов и сапфира методами Чохральского, Степанова (EFG – edge-defined film-fed growth) и Киропулоса с использованием датчиков веса. Разработанные адаптивные автоматизированные системы управления для этих методов выращивания применяются на установках роста кристаллов, которые производит Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро РАН для промышленного применения и проведения исследовательских работ.

Ключевые слова: рост кристаллов, управление технологическим процессом, адаптивная система, автоматическое управление, оборудование, обратная связь.

DOI: 10.31857/S1028096021120050

ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматизированного управления процессом роста кристаллов позволяют существенно снизить издержки производства, исключить субъективное влияние оператора оборудования на процесс роста, повысить воспроизводимость свойств получаемых кристаллов. Эти системы, контролирующие и поддерживающие заданный диаметр кристалла, известны и традиционно применяются на установках для выращивания кристаллов методом Чохральского [1–9]. Как правило, регуляторы систем автоматизированного управления для выращивания монокристаллов методом Чохральского настраивают по результатам пробных процессов. Коэффициенты настройки регулятора являются константами, в частности, в случае использования пропорционального интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора).

Однако, как было показано в [10, 11], при выращивании кристаллов методом Степанова (EFG – edge-defined film-fed growth) или с увеличением диаметра и длины кристаллов, получаемых методом Чохральского, применение регуляторов с заданными коэффициентами либо невозможно, либо встречает определенные трудности. В этих случаях в процессе выращивания в системе кри-

сталл–раслав значительно изменяются тепловые условия, и необходимо учитывать изменения свойств (характеристик) объекта управления, которые происходят по мере вытягивания кристалла. Под объектом управления будем понимать одну из характеристик, например, вес кристалла, скорость его изменения, диаметр кристалла или скорость его изменения. В принципе это могут быть и другие характеристики, которые контролируют с помощью соответствующих датчиков и которые прямо или косвенно определяют поперечный размер кристалла или его профиль. Изменение свойств объекта управления проявляется в том, что по мере выращивания кристалла и его перемещения относительно уровня расплава, нагревателей и экранов изменяется отклик контролируемой характеристики на заданное управляющее воздействие. Если система управления не учитывает изменение свойств объекта управления в ходе процесса кристаллизации, то качество управления может снижаться или автоматическое управление вообще может быть потеряно.

Адаптивные, или самонастраивающиеся системы – это системы, которые автоматически приспособляются к изменению свойств объекта управления и внешних условий, обеспечивая не-

обходимое качество управления путем изменения схемы или параметров управляющего устройства. Адаптация проводится непосредственно в процессе роста, в частности, путем программной настройки коэффициентов регулятора мощности нагрева, а также при необходимости автоматической регулировкой скорости вытягивания кристалла.

Целью настоящей работы было обобщение полученных результатов разработки адаптивных автоматизированных систем управления для установок роста кристаллов методами Чохральского, Степанова (EFG), а также автоматизированной системы установки для роста сапфира методом Киропулоса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕТОДОВ ЧОХРАЛЬСКОГО И СТЕПАНОВА

В работе рассматриваются системы автоматического управления, которые используют косвенный метод наблюдения за объектом управления – метод взвешивания растущего кристалла. В действительности датчик веса измеряет сумму всех сил, действующих на кристалл, включая вес выращиваемого кристалла, силу поверхностного натяжения расплава и другие силы. Для получения сигнала управления, который является функцией разности между величиной, измеряемой датчиком, и заданным в программе значением, необходимо вычислять силу, действующую на датчик в каждый момент времени процесса и связанную с формой растущего кристалла. Эту вычисляемую и вносимую в программу управления силу (или ее производную по времени) принимаем как опорный сигнал.

Уравнение, определяющее сумму действующих на кристалл сил, принято называть уравнением наблюдения датчика. Для метода Чохральского это уравнение, полученное Бардсли с соавторами [1], имеет следующий вид:

$$W(t) = g\rho_s\pi\int_0^t r^2 v_{cr}(t)dt + \rho_L g\pi r^2(t)h(r, \theta) + \rho_L g\pi a^2 r(t)\cos\theta, \quad (1)$$

где $\theta(t) = \beta + \alpha(t)$, β – угол роста, $\alpha(t)$ – угол продольного профиля кристалла, g – ускорение свободного падения, ρ_L , ρ_s – плотности расплава и кристалла, r – радиус кристалла, a – капиллярная постоянная, $a^2 = 2\sigma/\rho_L g$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава, $v_{cr}(t)$ – скорость кристаллизации, $h(r, \theta)$ – высота мениска расплава. Первое слагаемое в (1) соответствует весу кристалла, выращенного за время t , второе – весу мениска высотой h , и последнее – действующей на кристалл силе поверхностного натяжения. Уравнение наблюдения для метода Степанова, учитывающее гидродинамические эффекты

вблизи фронта кристаллизации, получено в результате исследований [10, 12, 13]:

$$W(t) = g\rho_s\pi\int_0^t S(t)v_{cr}(t)dt + S(t)\rho_L g h(r, \theta) + \Gamma(t)\rho_L g\sigma\cos\beta + gH_{eff}(t)\rho_L S(t) + K_{Rcr}(t) + \int S[\rho(h)]v_{cr}dS, \quad (2)$$

где H_{eff} – расстояние между свободной поверхностью расплава в тигле и линией основания мениска, $S(t)$, $\Gamma(t)$ – площадь и периметр кристалла соответственно, h – высота мениска, v_{cr} – скорость кристаллизации, K_R – коэффициент сопротивления канала формообразователя течению расплава, $p(h, V_0)$ – гидродинамическое давление под фронтом кристаллизации.

В качестве информационного сигнала о поперечном сечении растущего кристалла была выбрана производная сигнала датчика веса $y = \dot{W}_{real}(t)$. Управляющим воздействием является мощность нагрева P . В дополнение к этому каналу управления можно применять скорость вытягивания кристалла v_0 . Под динамической характеристикой объекта управления будем понимать изменение производной сигнала датчика веса во времени $\dot{W}_{real}(t)$ при изменении мощности нагрева на заданную величину ΔP . При описании поведения объекта управления будем пользоваться определениями и терминами, принятыми в теории управления [14].

При разработке эффективных алгоритмов управления необходима информация о поведении объекта управления при изменении управляющего воздействия (т.е. необходимо знать динамические характеристики объекта управления). Принципиальным является вопрос о том, изменяется ли, и насколько существенно, динамическая характеристика объекта управления по мере вытягивания кристалла. При ее существенном изменении в ходе процесса выращивания возникает необходимость коррекции действий регулятора, т.е. возникает необходимость в адаптивной системе управления.

Методика исследования динамических характеристик объектов управления и результаты этих исследований при выращивании монокристаллов алюмоиттриевого граната методом Чохральского и профилированных кристаллов сапфира методом Степанова детально представлены в [10–12]. Было показано, что при выращивании кристаллов методом Степанова динамические характеристики объекта управления существенно изменяются в ходе роста и классический ПИД-регулятор не применим, и система управления должна иметь адаптивный регулятор. При выращивании кристаллов методом Чохральского динамические характеристики объекта управления также изменяются с течением времени. Однако изменение постоянной времени и коэффициента усиления невелико по сравнению с методом Степанова. Поэтому в ряде случаев для управления

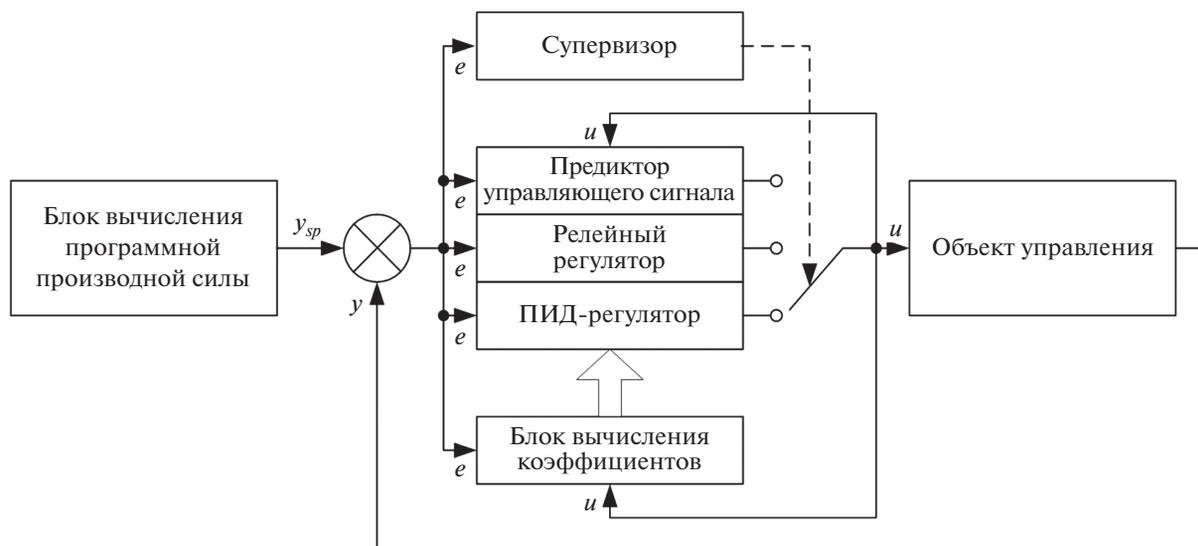


Рис. 1. Блок-схема унифицированного адаптивного регулятора: y_{sp} – опорный сигнал (производная программной силы); y – производная сигнала датчика веса; e – величина рассогласования; u – сигнал управления.

ростовым процессом в методе Чохральского допустимо использовать ПИД-регулятор с постоянными коэффициентами.

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕТОДОВ ЧОХРАЛЬСКОГО И СТЕПАНОВА

Полученные экспериментальные данные о динамических характеристиках объектов управления [11, 12] позволили предложить структуру унифицированного адаптивного программного регулятора, учитывающую особенности ростовых процессов в каждом из этих способов (рис. 1). Адаптивная система управления содержит два контура: основной контур и контур адаптации. Для контура адаптации объектом управления является основная система автоматизированного управления.

Основной контур регулирования содержит три альтернативных блока формирования сигнала управления $u(t)$: ПИД-регулятор, релейный регулятор и предиктор управляющего сигнала. За работой основного контура управления следит блок “Супервизор”, выполняющий функции контура адаптации, обеспечивающий безопасность процесса регулирования и осуществляющий переключение блоков формирования сигнала управления. Регулятор использует разную стратегию управления для методов Чохральского и Степанова. В методе Чохральского задействованы ПИД-регулятор и релейный регулятор, а для ростового процесса в методе Степанова применяют предиктор управляющего сигнала и релейный регулятор. Это связано с тем, что как было показано выше, переходные процессы при способе Степанова обладают большой величиной перерегулирования, и применение классического ПИД-регулятора не обеспечивает управление процессом.

При выращивании кристаллов методом Чохральского на вход регулятора поступает опорный сигнал, в качестве которого выступает производная программной силы $y_{sp} = \dot{W}_{prog}$. Учитывая периодичность опроса датчика, перейдем к дискретной форме записи выражений. В регуляторе из опорного сигнала $\dot{W}_{prog}[k]$ вычитается текущее значение реальной производной силы $\dot{W}_{real}(k)$, где k – номер выборки. Полученное значение рассогласования $e[k]$ поступает на входы ПИД-регулятора, релейного регулятора и блока “Супервизор”. В нормальном режиме функционирования “Супервизор” коммутирует выход ПИД-регулятора с входом объекта управления. ПИД-регулятор осуществляет выработку управляющего воздействия $u[k]$. Блок “Супервизор” отслеживает величину рассогласования $e[k]$. Если рассогласование выходит из заранее заданного интервала $[-e, +e]$, то “Супервизор” отключает ПИД-регулятор и подключает к входу объекта управления релейный регулятор. Происходит накопление данных о входном $\dot{W}_{prog}[k]$ и выходном $u[k]$ сигналах объекта управления. На основе этих данных специальный программный блок вычисляет новые коэффициенты ПИД-регулятора. После “Супервизор” переключает управление на ПИД-регулятор.

При выращивании кристаллов методом Степанова (EFG) величина рассогласования $e[k]$ поступает на вход блока “Супервизор”, блока релейного регулятора и блока предиктора управляющего воздействия. В этом случае ПИД-регулятор не участвует в управлении. Блок “Супервизор” использует инкрементальный релейный регулятор с зоной нечувствительности $[-e_s, +e_s]$ [11]. В течение заданного количества срабатываний релейного регулятора вычисляется изменение мощности нагрева. Блок “Супервизор” отключа-



Рис. 2. Кристалл алюмо-иттриевого граната, выращенный на установке “НИКА-3” в автоматическом режиме.



Рис. 3. Производственный участок роста профилированного сапфира на установках “НИКА-Профиль”.

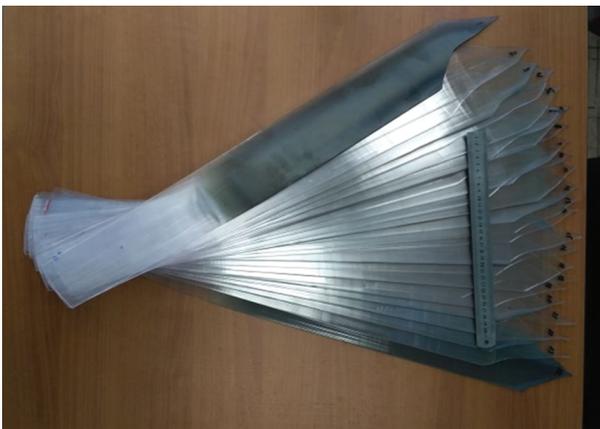


Рис. 4. Выращенные с применением адаптивной автоматизированной системы управления 24 сапфировые пластины шириной 90 мм и толщиной 1.4 мм, предназначенные для изготовления защитных экранов мобильных устройств.

ет релейный регулятор и подключает к управлению предиктор управляющего сигнала. Предиктор каждый такт управления изменяет мощность на заданную величину $u[k] = u[k - 1] + K_L[k]$. Корректор осуществляет подстройку коэффициента предиктора K_L , используя величину рассогласования $e[k]$: $K_L[k + 1] = K_L[k] - \lambda e[k]$, где λ – коэффициент коррекции. Блок “Супервизор” при выходе сигнала из заданного интервала $[-e_s, +e_s]$ переключает управление на релейный регулятор. В течение заданного количества срабатываний релейного регулятора вычисляется коэффициент линейного тренда управляющего сигнала, и блок “Супервизор” возвращает управление предиктору.

Описанную адаптивную унифицированную систему управления и унифицированный датчик веса размещают на установках серии “НИКА” для выращивания кристаллов методами Чохральского и Степанова. Чувствительность датчика веса в зависимости от массы получаемых кристаллов составляет от 10^{-5} до 2×10^{-5} Н. На рис. 2 показан кристалл алюмо-иттриевого граната, выращенный на установке “НИКА-3” в автоматическом режиме. Производственный участок роста профилированного сапфира на установках “НИКА-Профиль” представлен рис. 3. На рис. 4 показаны выращенные с применением адаптивной автоматизированной системы управления 24 сапфировые пластины шириной 90 мм и толщиной 1.4 мм, предназначенные для изготовления защитных экранов смартфонов, устройств.

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕТОДА КИРОПУЛОСА

Главным отличием метода Киропулоса от методов Чохральского и Степанова является то, что рост кристалла происходит не с поверхности расплава, а внутри него. Поэтому реальная скорость кристаллизации слитка в отличие от указанных методов не зависит от скорости вытягивания кристалла, а определяется температурным градиентом в расплаве. На часть кристалла, погруженную в расплав, действует выталкивающая сила, поэтому изменение показаний датчика веса обусловлено вариациями скорости кристаллизации и формы межфазной границы (например, резкое прорастание вершины конуса фронта кристаллизации в расплав). Выведенное уравнение наблюдения датчика для метода Киропулоса имеет вид [15]:

$$W(L) = g\rho_s \{V_{up}(L)\} + 2\pi r(L)\sigma \cos\{\alpha(L) + \beta\} - g(\rho_s - \rho_L)V_{low}(L) + \rho_L g \pi r^2(L)h(L), \quad (3)$$

$$V_{low}(L) = 1/3 \pi r^3(L) \text{ctg}(1/2 \gamma(L)), \quad (4)$$

$$V_{up}(L) = \pi \int r^2(L) d(L), \quad (5)$$

$$L = (v_{cr} + v_0)t, \quad (6)$$

где $V_{low}(L)$ – объем кристалла в расплаве, $V_{up}(L)$ – объем кристалла над расплавом, $\gamma(L)$ – угол при вершине конуса, описывающего форму межфазной границы, v_{cr} – линейная скорость кристаллизации (вертикальная компонента скорости продвижения фронта вглубь расплава в процессе роста), v_0 – скорость вытягивания кристалла. Отметим, что, как правило, линейная скорость кристаллизации на порядок превосходит скорость вытягивания $v_{cr} \gg v_0$. Таким образом, сигнал датчика веса кристалла при его выращивании методом Киропулоса является функцией двух свободных параметров – линейной скорости кристаллизации и формы фронта кристаллизации. Например, причиной уменьшения производной показаний датчика веса может являться как снижение линейной скорости кристаллизации v_{cr} , так и уменьшение угла γ . Ввиду этого объект управления не наблюдается в достаточно широкой зоне. Ширина зоны вычисляется согласно (3)–(6) на основании возможных изменений скорости кристаллизации и формы фронта и быстроты их изменения. Предлагаемый регулятор мощности нагревателя содержит зону нечувствительности, равную зоне, в которой отсутствует наблюдаемое объекта управления. Следует также отметить, что в ходе процесса выращивания может возникать контакт периферийных частей фронта кристаллизации со стенкой тигля. Причина этого заключается в неравномерности теплового поля, создаваемого нагревателем. Наиболее эффективно развитие (увеличение площади) такого контакта может быть предотвращено повышением скорости вытягивания кристалла, вызывающим мгновенное падение уровня расплава в тигле и его уход из зоны контакта. Исходя из указанных особенностей процесса и того, что $e = \dot{W}_{real} - \dot{W}_{prog}$, был реализован следующий алгоритм автоматического управления одновременно по каналам мощности нагревателя и скорости вытягивания кристалла:

$$\Delta P = \begin{cases} 0, & \text{IF}(e_1 < e < e_2) \\ +p_{1(PID)}, & \text{IF}(e > e_2) \\ -p_{2(PID)}, & \text{IF}(e < e_1) \end{cases}, \quad (7)$$

$$v = \begin{cases} v_0, & \text{IF}(e < e_{contact}) \\ v_{contact}, & \text{IF}(e > e_{contact}) \end{cases},$$

где ΔP – изменение мощности нагревателя на каждом такте управления e_1 и e_2 – пределы зон нечувствительности регулятора для положительной и отрицательной ошибки, $p_{1(PID)}$ и $p_{2(PID)}$ – величины изменения мощности нагрева, осуществляемые ПИД-регулятором при положительной и отрицательной ошибке, IF – логическая функция выполнения условия, $v_{contact}$ – скорость вытягивания кристалла при детектировании контакта кристалла со стенкой тигля, сопровождающееся уве-



Рис. 5. Установка серии “НИКА-М” для выращивания слитков сапфира методом Киропулоса, оснащенная системой управления процессом роста с обратной связью.

личением ошибки порогового значения $e_{contact}$. Заметим, что для расчета опорного значения согласно (3)–(6) необходимо найти форму кристалла $r(L)$. В [16] показано, что для решения этой задачи можно с необходимой для управления степенью точности ограничиться рассмотрением только процесса массопереноса в гидростатическом приближении.

На рис. 5 показана одна из установок серии “НИКА-М” для выращивания слитков сапфира методом Киропулоса, на которой успешно применяется система управления с обратной связью [15]. Контроль процесса роста в автоматическом режиме с обратной связью стал возможен благодаря новой

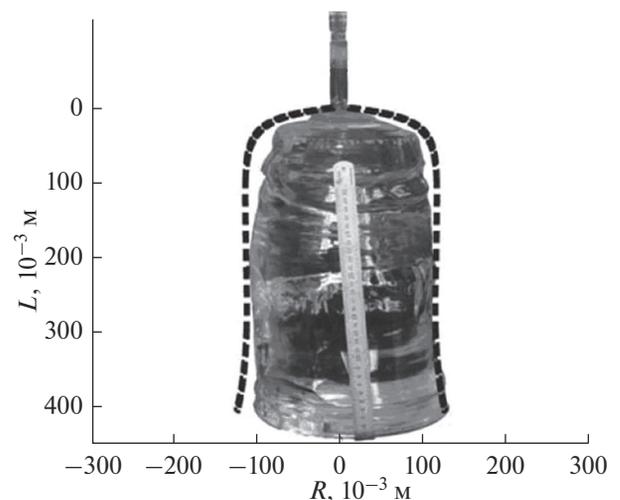


Рис. 6. Расчетная (штриховая линия) и реальная формы кристалла, полученного в автоматическом режиме выращивания.

системе динамического измерения всех сил, действующих на растущий кристалл и водоохлаждаемый шток. Программное обеспечение позволяет устранить шум, связанный с движением воды по штоку и другими помехами, и выделить полезный сигнал с устройства измерения сил.

На рис. 6 представлены расчетная (штриховая линия) и реальная формы кристалла, полученно-го в автоматическом режиме выращивания.

ВЫВОДЫ

Для установок выращивания кристаллов методами Чохральского и Степанова разработан адаптивный унифицированный регулятор, который программно переключается на соответствующий метод выращивания. Коэффициенты настройки регулятора автоматически устанавливаются в ходе процесса роста. При изменении разности производной программной силы и производной силы, измеряемой датчиком выше установленных пределов, регулятор автоматически переключается на релейный регулятор и возвращается на основной тип регулирования, после того как величина контролируемого разбаланса войдет в установленный коридор.

Для установки выращивания кристаллов методом Киропулоса создан адаптивный регулятор, учитывающий, что объект управления в силу специфики метода может быть не наблюдаем с помощью датчика веса в достаточно широких диапазонах. В связи с этим предложен и реализован специальный алгоритм управления по двум каналам: скорости подъема кристалла и мощности нагрева. В зоне наблюдаемости управление осуществляется по каналу мощности нагрева. В зоне отсутствия наблюдаемости — по каналу скорости или по двум каналам.

Адаптивные системы управления применяются на оборудовании роста кристаллов, выпускае-

мых Экспериментальным заводом научного приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bardsley W., Green G.W., Holliday C.H., Hurle D.T.J.* // J. Cryst. Growth. 1972. V. 16. P. 277.
2. *Zinnec A.E., Novis B.E., Brandle C.D.* // J. Cryst. Growth. 1973. V. 19. P. 187.
3. *Kimoto T., Wachi A., Sacurai S., Mikami M.* // Trans. Soc. Instrum. Contr. Eng. 1973. V. 48. Iss. 6. P. 595.
4. *Лейбович В.С., Сухарев В.А., Шушков В.М., Федоров В.А.* // Приборы и системы управления. 1975. № 5. С. 7.
5. *Лейбович В.С.* // Рост кристаллов. 1986. Т. 15. С. 143.
6. *Satch B.T., Inui J., Iwamoto H.* // Fujitsu Sci. Tech. J. 1976. V. 3. P. 624.
7. *Kurlov V.N., Rossolenko S.N.* // J. Cryst. Growth. 1997. V. 3–4. P. 417.
8. *Winklera J., Neubert M., Rudolph J.* // Acta Phys. Polonica A. 2013. V. 124. № 2. P. 181.
9. *Sahanskiy S.P.* // J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol. 2014. V. 7. № 1. P. 20.
10. *Borodin A.V., Frantsev D.N.* // J. Cryst. Growth. 2004. V. 275. P. 2089.
11. *Францев Д.Н.* Адаптивная система управления процессами роста кристаллов для методов Степанова и Чохральского: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. М.: ИФТТ РАН, 2009. 163 с.
12. *Бородин А.В.* Процессы кристаллизации и формообразования профилированных изделий из монокристаллов сапфира и разработка новых технологий их получения: Дис. ... д-ра тех. наук: 05.16.09. М.: МИСиС, 2010. 269 с.
13. *Borodin A.V., Borodin V.A., Zhdanov A.V.* // J. Cryst. Growth. 1999. V. 198–199. P. 220.
14. *Егунов Н.Д.* Методы классической и современной теории автоматического управления М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. Т. 1. 748 с.
15. *Бородин А.В., Бородин В.А., Смирнов К.Н., Ширяев Д.Б., Францев Д.Н., Юдин М.В.* // Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 3. С. 92.
16. *Singh G., Ghosh B., Deshpande R.Y.* // Kristall Technik. 1981. V. 16. P. 1239.

Adaptive Automated Control Systems for Growing Single Crystals by Czochralski, Stepanov (EFG) and Kyropoulos Methods Using a Weight Sensor

A. V. Borodin^{1, *}, V. A. Borodin^{1, *}, D. N. Frantsev^{2, **}, M. V. Yudin^{2, **}

¹Experimental Factory of Scientific Engineering with the Special Design Bureau RAS, Chernogolovka, 142432 Russia

²Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, 142432 Russia

*e-mail: bor@ezan.ac.ru

**e-mail: faramir@ezan.ac.ru

The results of the creation of adaptive control systems for growing single crystals of oxides and sapphire by Czochralski, Stepanov (EFG – edge-defined film-fed growth) and Kyropoulos methods using weight sensors are summarized. The developed adaptive automated control systems for these growing methods are used in crystal growth units produced by the Experimental Factory of Scientific Engineering with the Special Design Bureau RAS for industrial application and research.

Keywords: crystal growth, process control, adaptive system, automatic control, equipment, feedback.