

## УСТАНОВКА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

© 2008 С.П. Саханский

Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М.Ф. Решетнева

Разработана и внедрена в производство установка выращивания монокристаллов германия, по способу Чохральского, на основе контактного метода измерения текущей площади кристалла. Установка позволяет выращивать монокристаллы германия в закрытой тепловой оснастке, обеспечивая при этом необходимые низкоградиентные тепловые условия выращивания кристалла.

*Контактный метод измерения, текущая площадь кристалла, закрытая тепловая оснастка*

Системы автоматического управления выращиванием кристаллов, основанные на контактном методе измерения текущей площади, нашли практическое применение при выращивании монокристаллов германия на предприятии ФГУП «Германий» (г. Красноярск). Приоритет данным установкам дан в связи с возможностью выращивания многих марок кристаллов германия в закрытой тепловой оснастке, обеспечивающей необходимые тепловые условия роста, что затрудняет применение широко распространенных оптических систем измерения и управления выращиванием кристаллов.

В основу контактного метода измерения и управления выращиванием монокристаллов [1–5] по способу Чохральского входит управление текущей площадью (или диаметром при круглой форме) растущего кристалла на основе вычисления сигнала управления  $\Delta u$  как функции отклонения текущей площади кристалла от заданной за период оценки сигнала управления  $T_u$  при условии поддержания уровня расплава в тигле с точностью 1–2 мкм. Микропроцессорные системы управления выращиванием кристаллов германия, разработанные на базе патента [1], внедрены в 1998 г. на семи установках ФГУП «Германий». Данные системы управления (рис. 1) представляют систему управления выращиванием монокристаллов германия по способу Чохральского на базе микро-ЭВМ, под управлением которой в камере производится выращивание монокристаллического кристалла диаметром  $d$ . Кристалл вытягивается из расплава со скоростью вытягивания  $V_3$  и вращения  $W_3$  кристалла,

при этом расплавленный металл, находящийся в тигле (с внутренним диаметром  $D$ ), вращается с угловой скоростью  $W_T$ .

В процессе убывания расплава в тигле происходит размыкание и замыкание контактного датчика уровня относительно плавающего на поверхности металла в тигле графитового экрана. Сигнал с контактного датчика подается через сглаживающую цепочку С1, R1, R2 и блок согласования в ЭВМ для принятия решения об управлении подъемом тигля вверх, которое осуществляется через блок управления шаговым двигателем, на каждый шаг двигателя, в результате чего кроме скорости подъема тигля вверх  $V_m$  в системе формируется информация о перемещении тигля  $X_{umc}$  (с дискретностью  $\Delta_m$ ) и информация  $X_{uzc}$  о перемещении кристалла вверх (с дискретностью  $\Delta_3$ ).

Управление от ЭВМ скоростями вытягивания кристалла  $V_3$ , вращения кристалла  $W_3$ , вращения тигля  $W_T$  осуществляется через соответствующие приводы, а управление температурой расплава осуществляется посредством датчика температуры боковой поверхности нагревателя и регулятора температуры по заданию ЭВМ  $T_3$ . В качестве датчика температуры используется радиационный пирометр с сапфировым светопроводом [6].

Выражения, на которых основана работа установок по выращиванию германия, приведены ниже.

Скорость убывания расплава в тигле  $V_p$ , а также скорости подъема тигля вверх  $V_{mm}$  после размыкания контактного датчика и замедленная скорость подъема тигля после

замыкания контактного датчика  $V_{mm}/M$  определяются по выражениям (1-5), в которых введены коэффициенты увеличения скорости ( $C = 4$ ) и уменьшения скорости подъема тигля ( $M = 4$ ). Данное управление обеспечивает периодическое замыкание и размыкание контактного датчика в процессе работы в заданном диапазоне изменения уровня расплава (порядка 2 мкм):

$$V_p = V_3 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{жс}} \cdot \left[ \frac{d}{D} \right]^2, \quad (1)$$

$$V_{mm} = V_p \cdot \left[ \frac{d_{\max}}{d} \right]^2 = V_3 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{жс}} \cdot \left[ \frac{d_{\max}}{D} \right]^2, \quad (2)$$

$$d_{\max} = d_3 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-1/C}}, \quad (3)$$

$$\frac{V_{mm}}{M} = V_p \cdot \left[ \frac{d_{\min}}{d} \right]^2 = V_3 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{жс}} \cdot \left[ \frac{d_{\min}}{D} \right]^2, \quad (4)$$

$$d_{\min} = d_{\max} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad (5)$$

где  $V_p$  – скорость убывания расплава в тигле;  $V_3$  – скорость вытягивания кристалла;  $d$  – текущий диаметр кристалла;  $D$  – внутренний диаметр тигля;  $\rho_m$  – уд. плотность твердого материала;  $\rho_{жс}$  – уд. плотность жидкого материала;  $d_3$  – заданный диаметр выращиваемого кристалла;  $d_{\max}$  – максимальный допустимый диаметр выращиваемого кристалла, с соблюдением которого выполняется условие, при котором датчик и экран сомкнутся после размыкания;  $d_{\min}$  – минимальное допустимое значение диаметра кристалла, при котором соблюдается условие отставания экрана от датчика после замкнутого состояния.

Синхронизация скорости подъема тигля со скоростью вытягивания кристалла в момент разомкнутого и замкнутого состояния контактного датчика производится по выражениям (6 – 7):

$$X_{изрм} = P \cdot M \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{C}\right) \cdot K_y}{B}, \quad (6)$$

$$X_{изрм} = P \cdot M \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{C}\right) \cdot K_y}{B}, \quad (7)$$

где

$$K_y = B \cdot \frac{\Delta_m \cdot \rho_{жс}}{\Delta_3 \cdot \rho_m} \cdot \left[ \frac{D}{d_3} \right]^2 -$$

– уставка заданного диаметра;  $X_{изрп}$  – число импульсов затравки, через которое выдается  $P$  импульсов перемещения тигля при разомкнутом контактном датчике;  $X_{изрм}$  – число импульсов затравки, через которое выдается  $P$  импульсов перемещения тигля при замкнутом контактном датчике;  $P$  – число выдаваемых импульсов подъема тигля на шаговый привод;  $B$  – коэффициент умножения уставки;  $\Delta_3$  – дискретность отсчета перемещения затравки;  $\Delta_m$  – дискретность отсчета перемещения тигля;  $d_3$  – заданный диаметр выращиваемого кристалла.

В качестве привода подъема тигля применяется разомкнутый шаговый привод, обеспечивающий процесс многократного изменения скорости подъема тигля, на основании сигнала с контактного датчика и точную синхронизацию скоростей вытягивания кристалла и подъема тигля.

Для контактного метода измерения и управления выращиванием кристалла величины перемещений затравки, тигля и период оценки сигнала управления могут быть представлены в виде выражений (8 – 11):

$$X_{зц} = X_{изц} \cdot \Delta_3, \quad (8)$$

$$X_{тц} = X_{итц} \cdot \Delta_m, \quad (9)$$

$$X_{изц} = \frac{X_{итц} \cdot K_y}{B}, \quad (10)$$

$$T_{ц} = \frac{X_{изц} \cdot \Delta_3}{V_3} = \frac{X_{зц}}{V_3} = \frac{X_{итц} \cdot K_y \cdot \Delta_3}{B \cdot V_3}, \quad (11)$$

где  $X_{зц}$  – перемещение затравки;  $X_{изц}$  – перемещение затравки с дискретностью отсчета  $\Delta_3$ ;  $X_{тц}$  – перемещение тигля;  $X_{итц}$  – перемещение тигля с дискретностью отсчета  $\Delta_m$ ;  $T_{ц}$  – период оценки сигнала управления (время отработки заданного количества импульсов  $X_{итц}$ ).

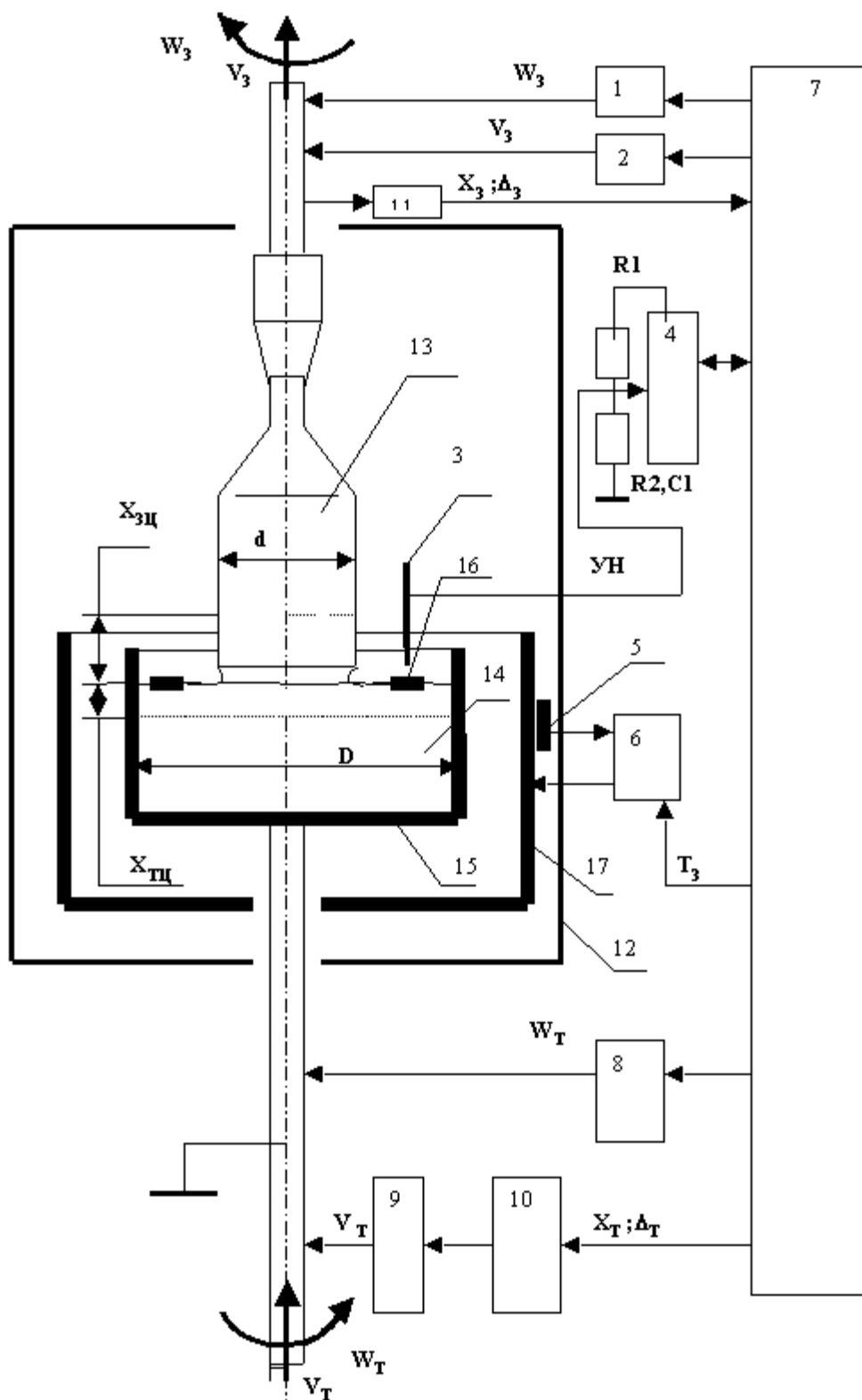


Рис. 1. Система управления на основе контактного метода:  
 1 – привод вращения заправки; 2 – привод перемещения заправки; 3 – контактный датчик;  
 4 – блок согласования с ЭВМ; 5 – датчик температуры; 6 – регулятор температуры; 7 – ЭВМ;  
 8 – привод вращения тигля; 9 – шаговый двигатель; 10 – блок управления шаговым двигателем;  
 11 – датчик перемещения заправки; 12 – камера; 13 – слиток; 14 – расплав металла;  
 15 – тигель; 16 – экран; 17 – нагреватель

Для вычисления сигнала управления  $\Delta y$  в системе управления принят алгоритм работы, представленный на рис. 2, который заключается в том, что в системе управления в момент замыкания контактного датчика выдерживается программная пауза  $\tau$  замкнутого (13) и последующая пауза  $\tau$  разомкнутого искусственных состояний датчика уровня, после чего происходит вычисление сигнала управления  $\Delta y$  по выражению (12) на основании подсчета длительности паузы  $\Delta t_{\text{ом}}(d)$  до момента первого замкнутого состояния датчика уровня:

$$\Delta y = \Delta t_{\text{ом}}(d) - \tau \cdot \left\{ C - 2 - \frac{C}{M} \right\}, \quad (12)$$

$$\tau = \frac{L_p \cdot T_u}{X_{\text{мн}} \cdot E}, \quad (13)$$

где  $E = \frac{(\beta - 1)}{M \cdot \left(1 - \frac{1}{C}\right)}$ ;  $\beta$  – коэффициент рабо-

чего минимального диаметра ( $\beta = 2,5$ );  $L_p$  – максимально допустимое задаваемое значение изменения уровня расплава (1 – 2 мкм).

Отличительной особенностью контактного метода измерения текущей площади кристалла является то, что он позволяет стабилизировать текущую площадь выращиваемого кристалла в закрытой тепловой установке, что является актуальным для выращивания монокристаллов германия кристаллографического направления «100», имеющих значительную огранку в течение всего процесса вытягивания кристалла.

Управление скоростью вытягивания кристалла  $V_3(x)$ , температурой боковой поверхности нагревателя  $T_3(x)$ , скоростью вращения затравки кристалла  $W_3(x)$  и тигля  $W_T(x)$  производится на основе выражений:

$$V_3(x) = V_{3n}(x) + Z \cdot K_V \cdot \Delta y, \quad (14)$$

$$T_3(x) = T_{3n}(x) + Z \cdot K_T \cdot \Delta y + Z \cdot A_T \cdot \int \Delta y \cdot dx, \quad (15)$$

$$W_3(x) = W_{3n}(x) - Z \cdot K_R \cdot \Delta y \quad (16)$$

$$W_T(x) = W_{mn}(x) - Z \cdot K_S \cdot \Delta y \quad (17)$$

$$V_{3n}(x) = V_{30}(x) + V_{3z}(x), \quad (18)$$

$$T_{3n}(x) = T_{30}(x) + T_{3z}(x), \quad (19)$$

$$W_{3n}(x) = W_{30}(x) + W_{3z}(x), \quad (20)$$

$$W_{mn}(x) = W_{m0}(x) + W_{mz}(x), \quad (21)$$

где  $K_V, K_T, K_R, K_S$  – пропорциональные коэффициенты регулирования;  $A_T$  – интегральный коэффициент регулирования по температуре;  $V_{3n}(x), W_{3n}(x), W_{mn}(x), T_{3n}(x)$  – программное задание закона изменения технологических параметров;  $V_{30}, W_{30}, W_{m0}, T_{30}$  – начальные значения технологических параметров выращивания до включения автоматического режима;  $V_{3z}(x), W_{3z}(x), W_{mz}(x), T_{3z}(x)$  – переменная составляющая программных заданий изменения технологических параметров;  $V_3(x), W_3(x), W_T(x), T_3(x)$  – общее управление технологическими параметрами;  $Z$  – признак захвата управления по диаметру на цилиндрической части кристалла;  $x$  – перемещение кристалла.

Процесс стабилизации диаметра кристалла происходит в системе управления по выражениям (14 – 21) при включении признака захвата управления по диаметру ( $Z = 1$ ) на цилиндрической части выращиваемого кристалла. В процессе стабилизации диаметра кристалла на цилиндрической части с достаточной точностью можно положить, что высота жидкого столбика мениска кристалла над расплавом и угол его роста постоянны, а их влиянием на сигнал управления можно пренебречь.

Программное задание всех четырех технологических параметров процесса выращивания кристалла германия  $V_{3n}(x), W_{3n}(x), W_{mn}(x), T_{3n}(x)$  в микропроцессорных системах задается за счет автоматического расчета и ввода в программу управления кадровой системы управления.

Конструктивное исполнение микропроцессорной системы автоматического управления вытягиванием монокристаллов германия приведено на рис. 3. Система управления разработана и изготовлена на основе программируемого контроллера МУ58 (изготовитель ОАО «Росток-Спарк», г. Киев). На рис. 4 показан вид плавающего графитового экрана с графитовым датчиком уровня расплава, а на рис. 5 – вид монокристаллического слитка германия диаметром 104 мм.

Система управления внедрена на установке № 21 (на ФГУП «Германий») и прошла промышленную отработку при выращивании монокристаллов германия кристаллографического направления «100» диаметром 104 мм в закрытой тепловой оснастке. Внедрение системы управления позволило наладить выполнение крупного международного заказа.

Рабочие графики работы установки №21 приведены на рис. 6–8. На рис. 6 приведен график изменения температуры боковой точки нагревателя  $T_3$  ( $T_{sum}$ ) на протяжении всего цикла вытягивания кристалла, а на рис. 7 график изменения скорости вытягивания кристалла  $V_3$  ( $V_{z\_sum}$ ) и сигнала управления  $\Delta u$  ( $d\_Diameter$ ). На рис. 8 приведен график изменения скорости вращения затравки  $W_3$  и скорости вращения тигля  $W_T$ .

В процессе вытягивания кристалла вращение затравки (рис. 8) по программе замедлялось в течение 1–2 мин в трех выбранных технологом точках выращивания прямого и обратного конуса кристалла для того, чтобы проявить в них и проконтролировать форму фронта кристаллизации монокристаллов германия.

Без замедления вращения монокристалла германия кристаллографического направления «100» проявить форму фронта

кристаллизации готового кристалла за счет применения стандартных травителей оказалось невозможным, а само замедление вращения кристалла привело к локальному изменению в выбранных точках распределения сопротивления кристалла, что позволило проявить и проконтролировать форму фронта кристаллизации.

Система управления легко может быть распространена на выращивание монокристаллов таких материалов, как алюминий и медь.

### Заключение

Разработана и внедрена в производство информационно-измерительная управляющая система автоматического выращивания монокристаллов германия в закрытой тепловой оснастке на основе нового контактного метода измерения текущей площади кристалла.

Система управления позволяет выращивать в закрытой тепловой оснастке высококачественные монокристаллы германия, алюминия и меди, для которых возможно применение графитового тигля с плавающим на поверхности расплава графитовым экраном.

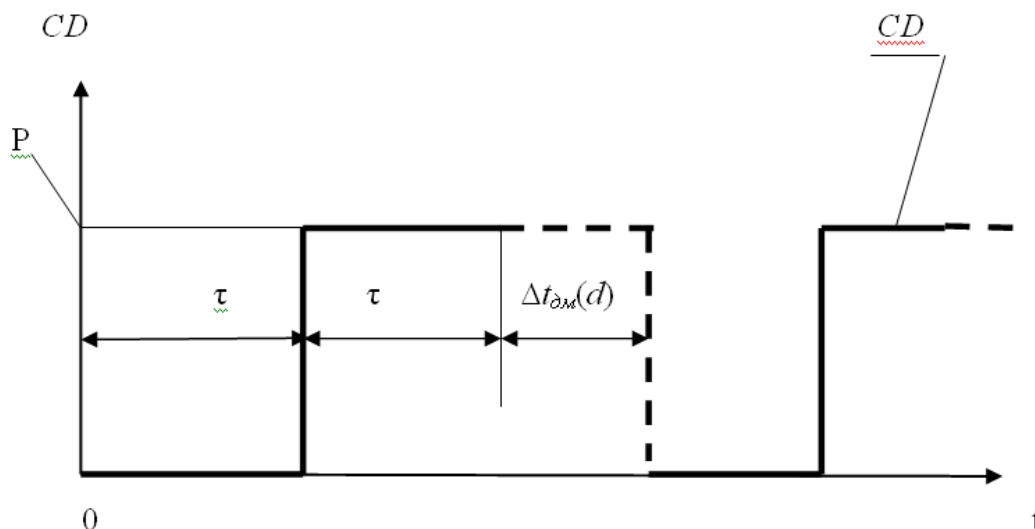
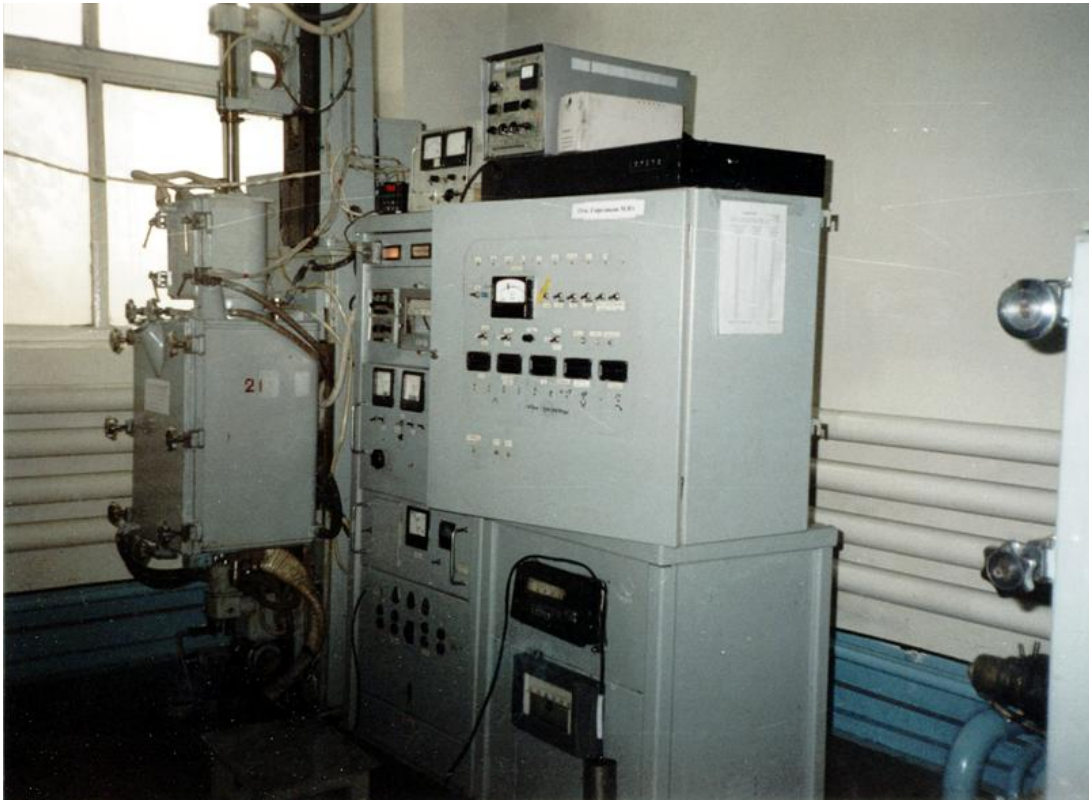
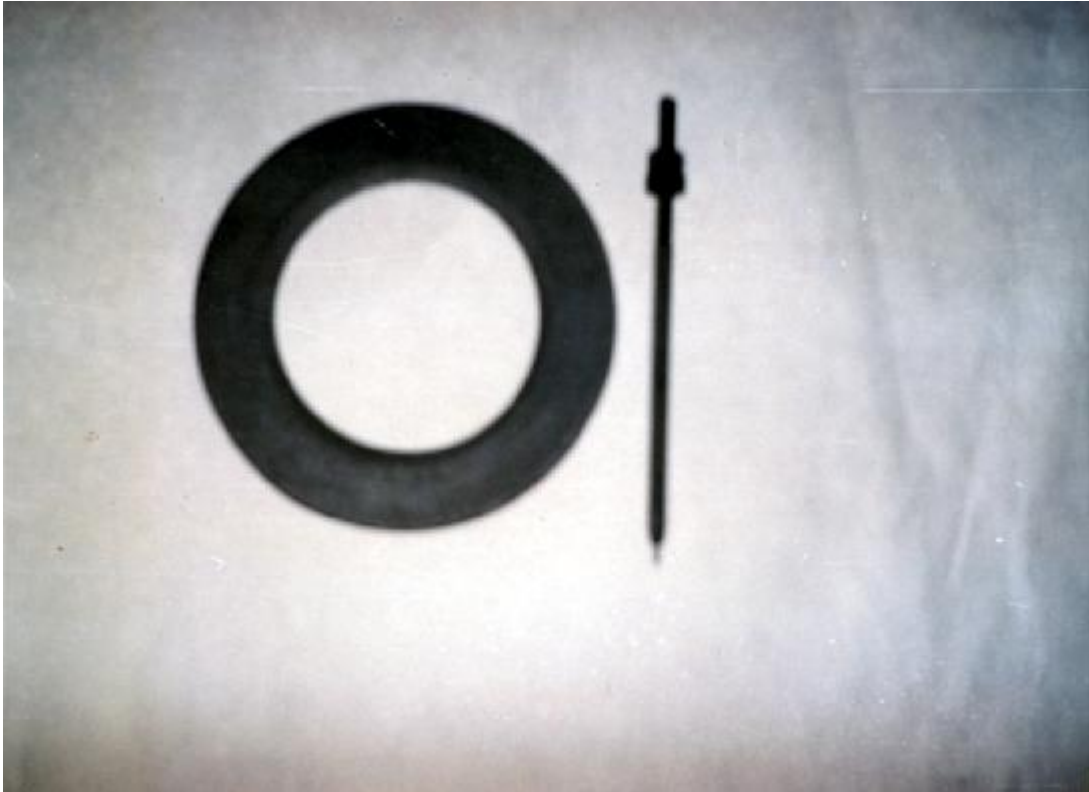


Рис. 2. График работы датчика уровня при вычислении сигнала управления:  
 $CD$  - работа контактного датчика уровня ( $P$  - датчик разомкнут)



*Рис. 3. Микропроцессорная система управления вытягиванием монокристаллов германия*



*Рис. 4. Плавающий экран с графитовым датчиком уровня расплава*



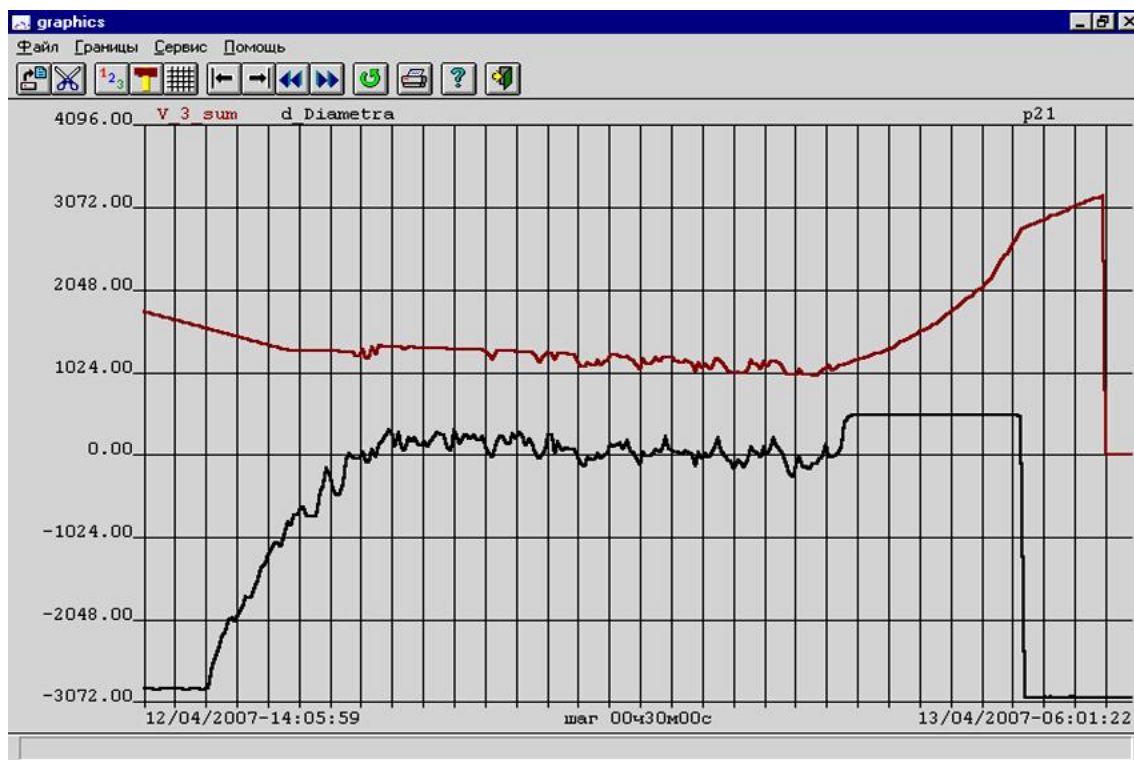


Рис. 7. График изменения скорости вытягивания заправки  $V_3$  ( $V_3\_sum$ ) и сигнала управления  $Dy$  ( $d\_Diametra$ )

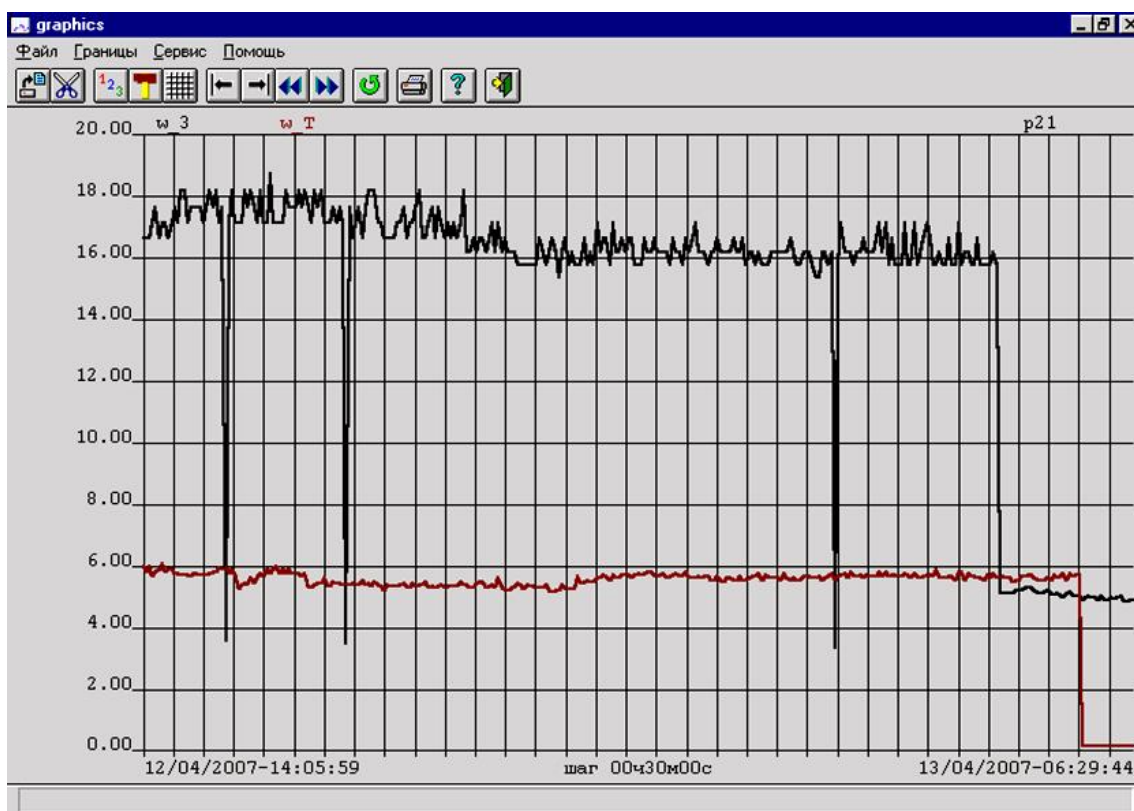


Рис. 8. График изменения скорости вращения заправки  $W_3$  и скорости вращения тигля  $W_T$



### Библиографический список

1. Патент 2128250 РФ, МПК С30 В15/20, 15/22, 15/26. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления [текст] / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, 1999, № 97101248/25.

2. Патент 2184803, РФ, МПК С30 В15/20, 15/22, 15/12 29/08. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления [текст] / С.П. Саханский, О.И. Подкопаев, В.Ф. Петрик, В.Д. Лаптенюк, 2002, № 99123739/12.

3. **Саханский, С.П.** Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава [текст] / С.П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Д. Лаптенюк. // В кн.: Перспективные материалы, технологии, конструкции-экономика. Сборник научных трудов / Под ред. В.В. Стацеры – Крас-

ноярск: ГАЦМиЗ, 2000. – Вып. 6. – С. 391–393.

4. **Саханский, С.П.** Основные математические соотношения контактного метода управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского [текст] / С. П. Саханский // В кн.: Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева / Под ред. проф. Г. П. Белякова – Красноярск: СибГАУ, 2005. – Вып. 7. – С. 85-88.

5. **Саханский, С.П.** Выращивание монокристаллов в закрытой тепловой оснастке по способу Чохральского на основе контактного метода управления диаметром кристалла [текст] / С. П. Саханский, // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – №1. – С. 38-41.

6. Разработка прецизионного регулирования температуры с использованием светопровода [текст] // М.: Гиредмет, Отчет по НИР, тема № СКБРМ-1, 1962.

### Сведения об авторе

**Саханский Сергей Павлович**, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат технических наук, доцент, преподает курсы «Микропроцессорные системы», «Цифровые системы управления и обработки информации». E-mail: [ius.Saxanskiy@sibsau.ru](mailto:ius.Saxanskiy@sibsau.ru). Работает в области комплексного решения задач автоматизации процессов выращивания монокристаллов германия, автоматизации процессов управления очисткой сточных вод промышленных предприятий.