

УДК 004.7+ 548.52

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 Δu как функции отклонения текущей площади кристалла от заданной за период оценки сигнала управления $T_{\text{ц}}$ 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 $X_{\text{тиг}}$ (с дискретностью Δ_m) и информация $X_{\text{изц}}$ о перемещении кристалла вверх (с дискретностью Δ_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; ρ_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):

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

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

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 контактом датчике; $X_{изрп}$ – число импульсов затравки, через которое выдается P импульсов перемещения тигля при замкнутом контактом датчике; P – число выдаваемых импульсов подъема тигля на шаговый привод; B – коэффициент умножения уставки; Δ_3 – дискретность отсчета перемещения затравки; Δ_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 Δ_3 ; $X_{тц}$ – перемещение тигля; $X_{итц}$ – перемещение тигля с дискретностью отсчета Δ_m ; $T_{ц}$ – период оценки сигнала управления (время отработки заданного количества импульсов $X_{итц}$).

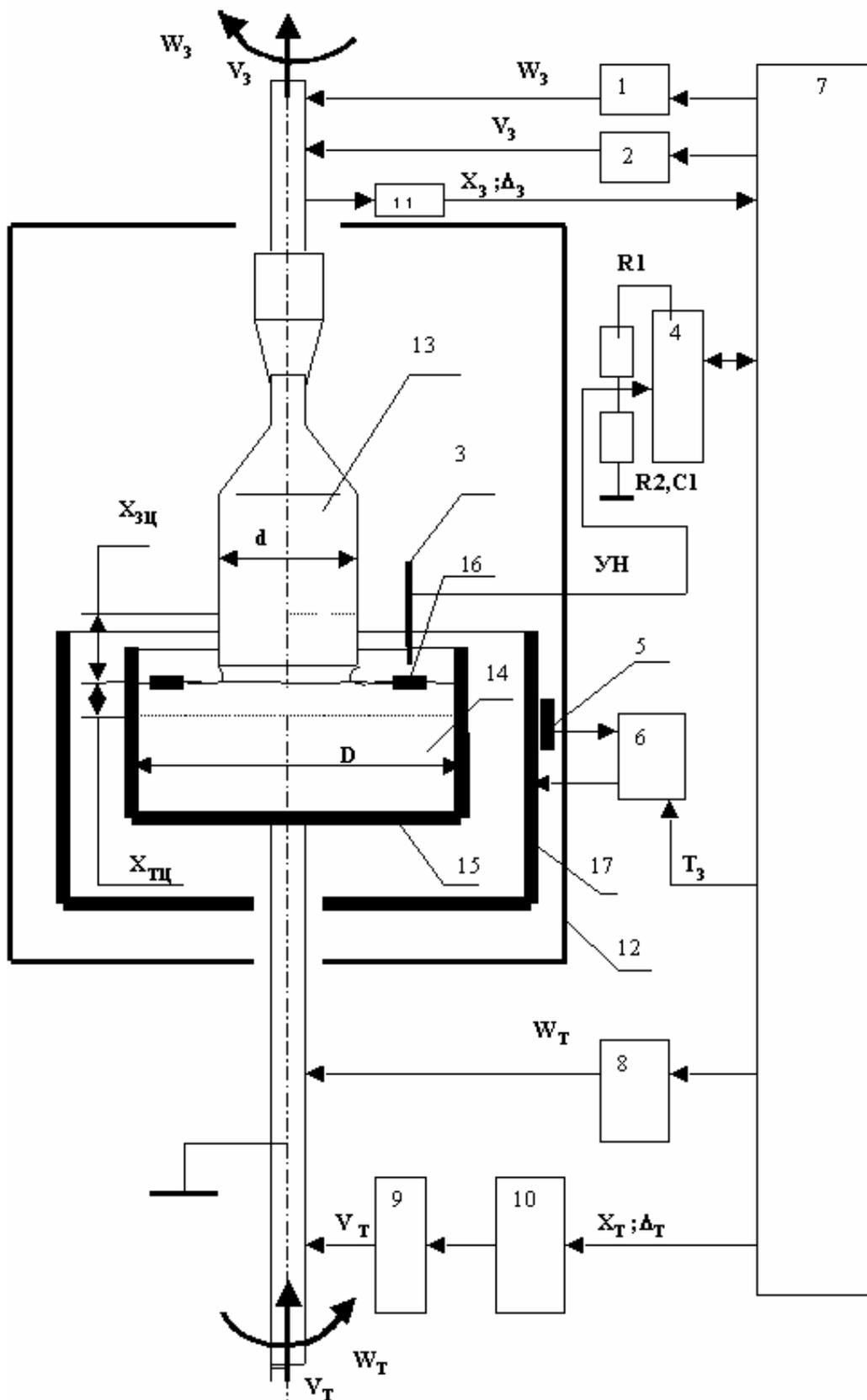


Рис. 1. Система управления на основе контактного метода:

- 1 – привод вращения затравки; 2 – привод перемещения затравки; 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 затравки; 12 – камера; 13 – слиток; 14 – расплав металла;
 15 – тигель; 16 – экран; 17 – нагреватель

Для вычисления сигнала управления Δy 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 τ замкнутого (13) и последующая пауза τ разомкнутого искусственных состояний датчика уровня, после чего происходит вычисление сигнала управления Δy по выражению (12) на основании подсчета длительности паузы $\Delta t_{dm}(d)$ до момента первого замкнутого состояния датчика уровня:

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

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

где $E = \frac{(\beta - 1)}{M \cdot \left(1 - \frac{1}{C}\right)}$; β – 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 оснастке, 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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 постоянен, 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-Спаркс», 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 Δu ($d_Diameter$). 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 технологических 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.

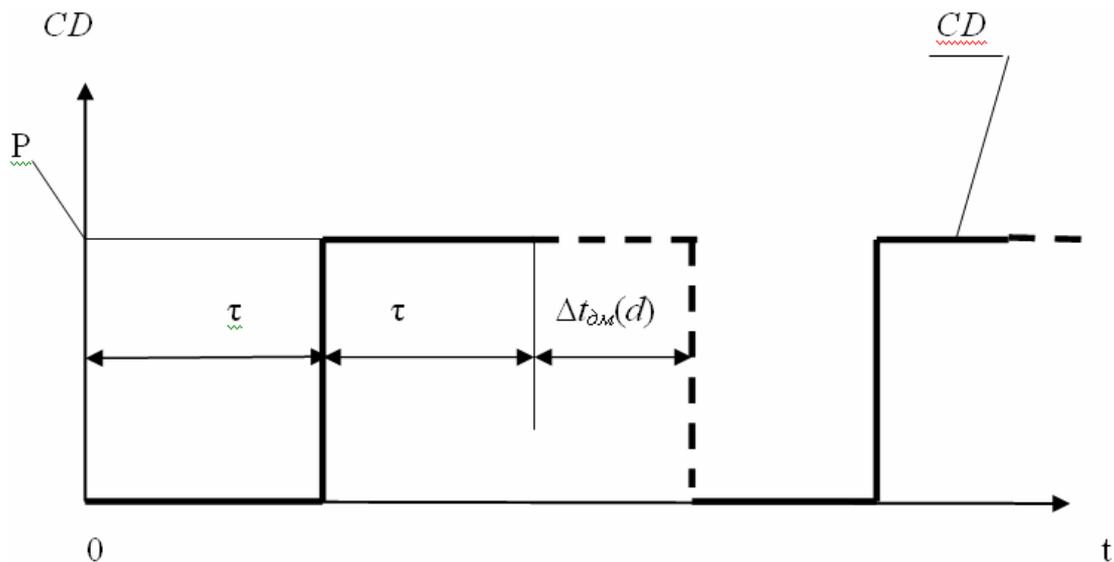


Рис. 2. График работы датчика уровня при вычислении сигнала управления: CD – работа контактного датчика уровня (P – датчик разомкнут)



Рис. 3. Микропроцессорная система управления вытягиванием монокристаллов германия

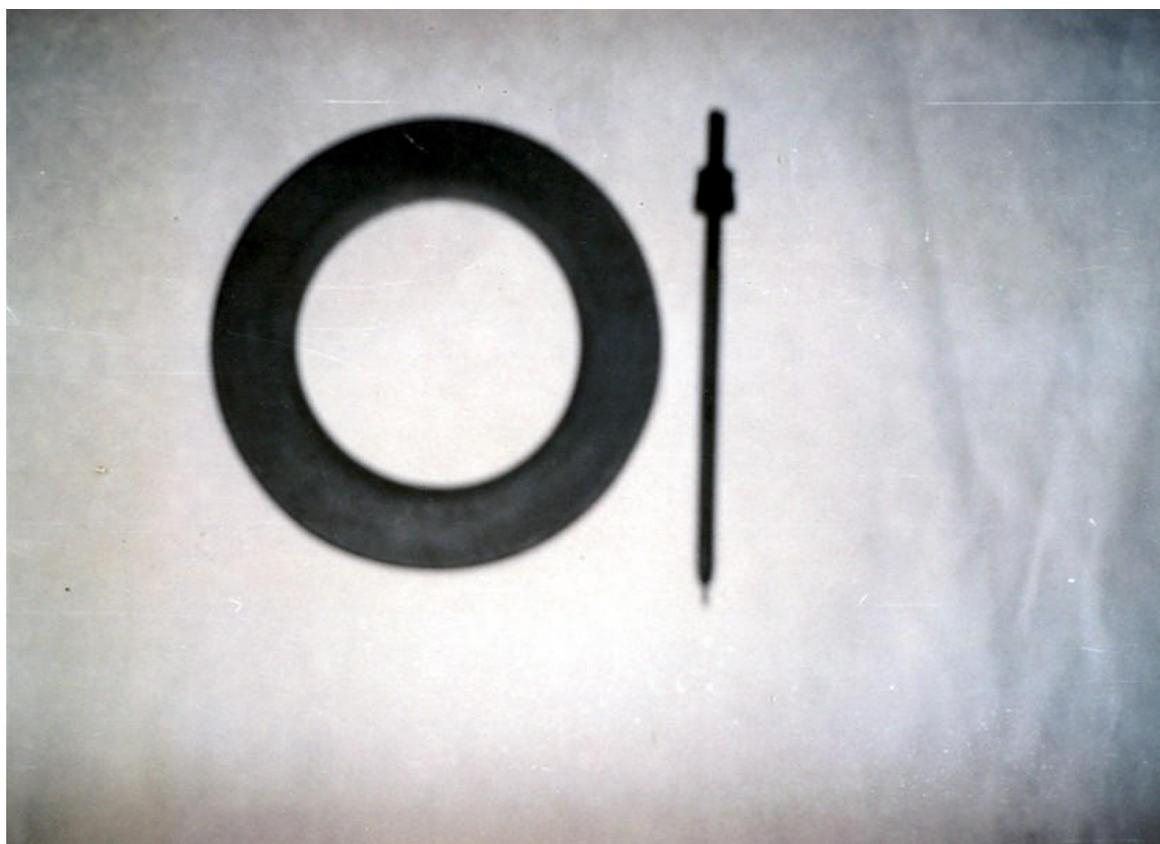


Рис. 4. Плавающий экран с графитовым датчиком уровня расплава



Рис. 5. Слиток германия диаметром 104 мм

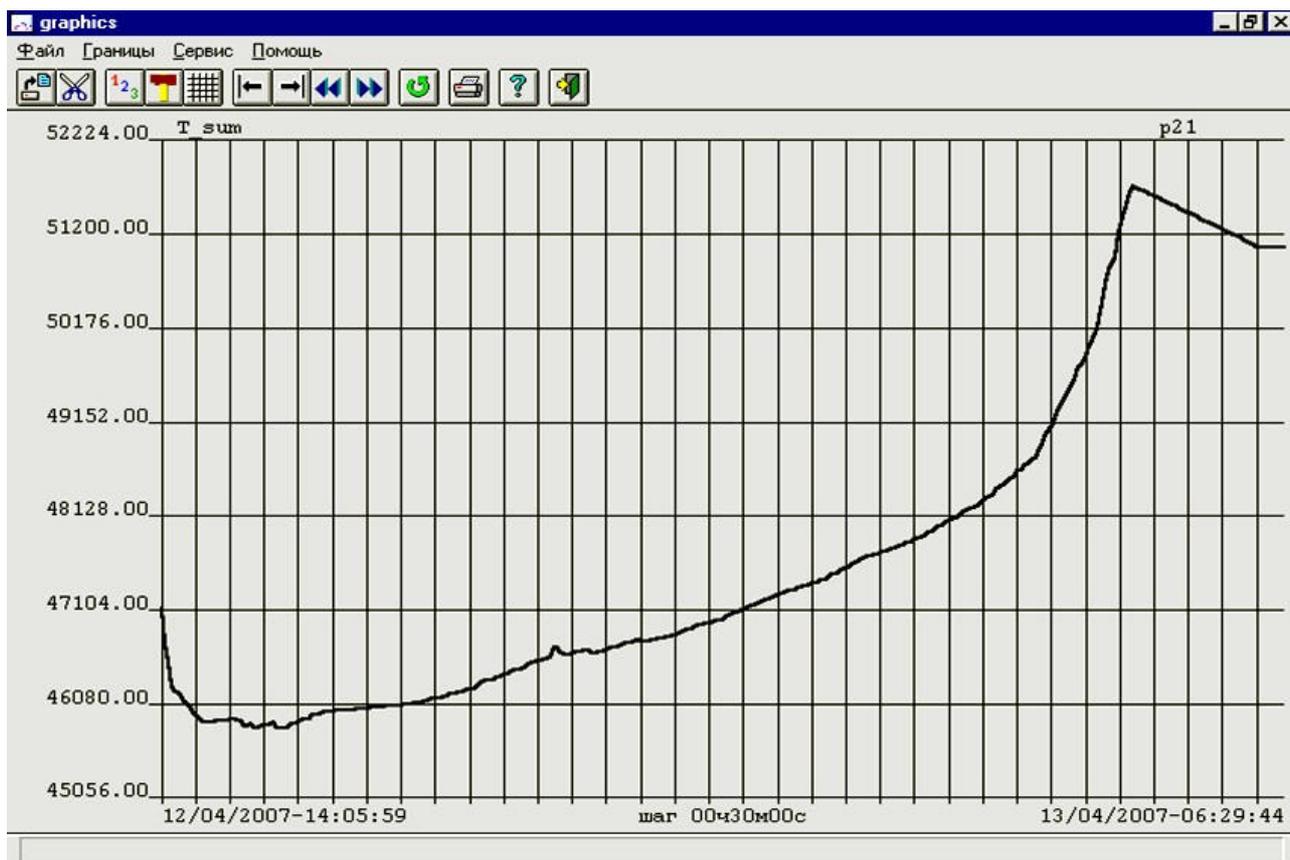


Рис. 6. График изменения температуры боковой точки нагревателя T_3 (T_{sum})

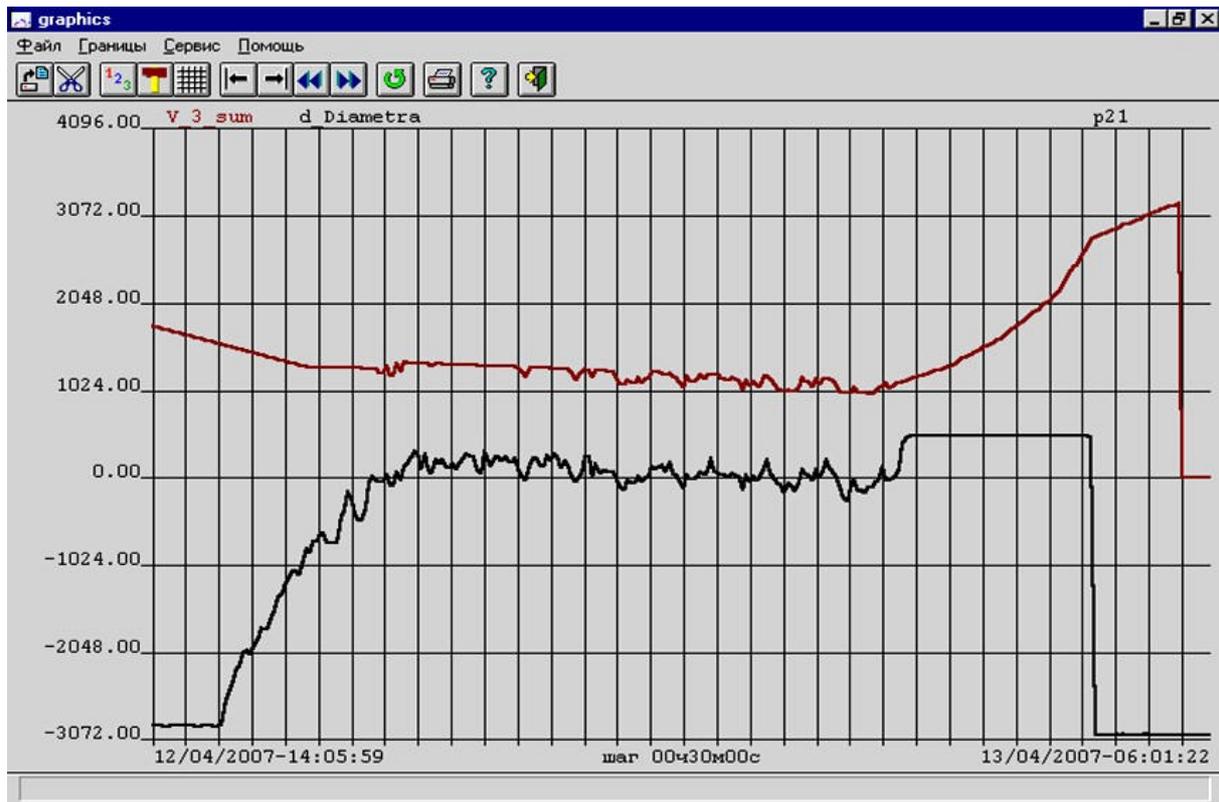


Рис. 7. График изменения скорости вытягивания затравки V_3 ($V\text{-}3_sum$) и сигнала управления Δu ($d_Diametra$)

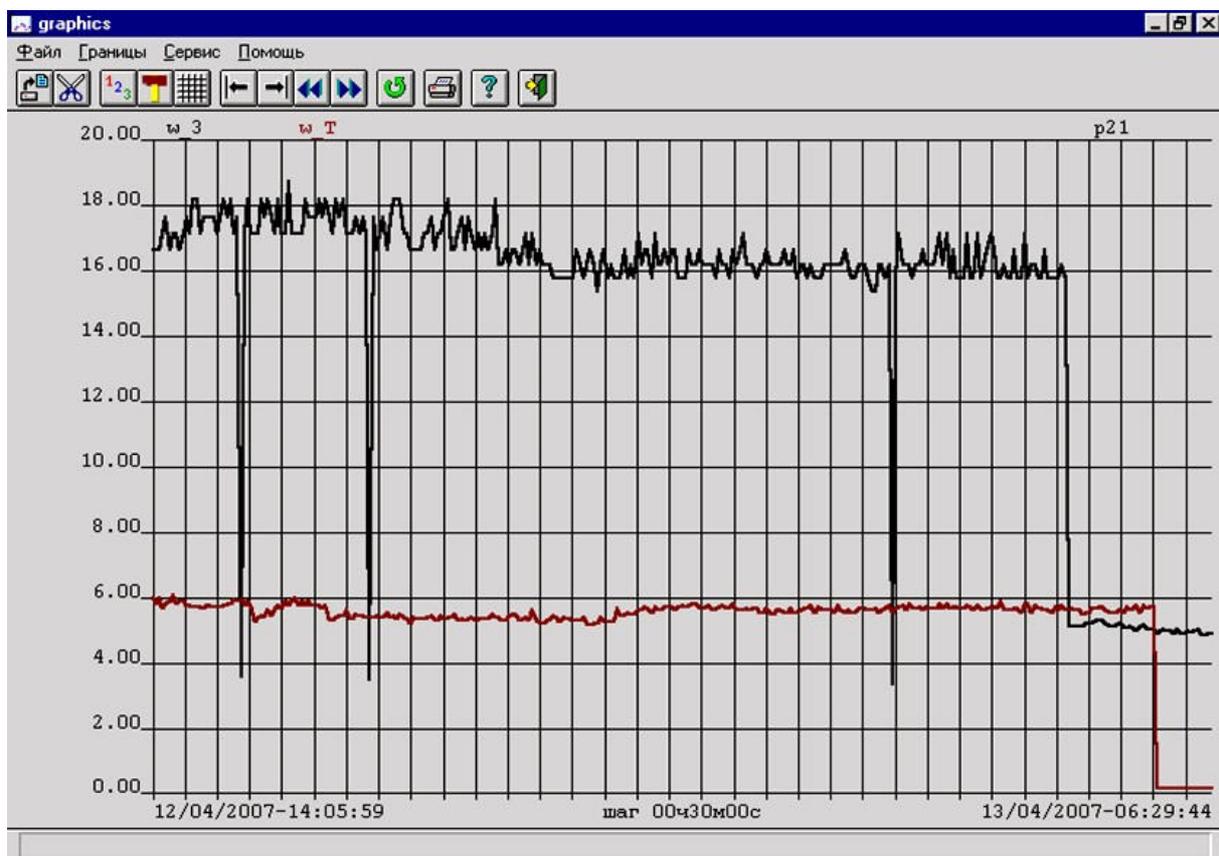


Рис. 8. График изменения скорости вращения затравки W_3 и скорости вращения тигля W_T

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. Стацурь – Красноярск: 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.

References

1. Patent 2128250, Russian Federation, MPK S30 V15/20, 15/22, 15/26. Way of management of process of germanium monocrystals growing from melt and the device for its realization / S.P. Sahanskiy, O.I. Podkopaev, V.F. Petrik, 1999, N 97101248/25.
2. Patent 2184803, Russian Federation, MPK S30 V15/20, 15/22, 15/12, 29/08. Way of management of process of germanium monocrystals growing from melt and the device for its realization / S.P. Sahanskiy, O.I. Podkopaev, V.F. Petrik, V.D. Laptенок, 2002, N 99123739/12.
3. **Sahanskiy, S.P.** Way of management of process of germanium monocrystals growing from melt / S.P. Sahanskiy, O.I. Podkopaev, V.D. Laptенок // In book: Perspective materials, technologies, design-economy: collection of scientific papers / Edited by V.V. Statsura // GACMiZ, Krasnoyarsk, 2000. – Issue 6. – P. 391-393. – [in Russian].
4. **Sahanskiy, S.P.** Basic mathematical parities of contact method of management of monocrystals growing by Czochralski method / S.P. Sahanskiy // In book: Bulletin of the Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetov / Edited by prof. G.P. Belyakov // Krasnoyarsk: SibGAU, 2005. – Issue 7. – P. 85-88. – [in Russian].
5. **Sahanskiy, S.P.** Growing monocrystals in closed thermal rigging by Czochralski method based on the contact method of crystal diameter management / S.P. Sahanskiy // Automation and modern technologies. – 2007. – N 1. – P. 38-41. – [in Russian].
6. Development of precision temperature regulation using a wavebeam guide // Moscow: Giredmet, Report on research scientific work, topic N SKBRM-1, 1962. – [in Russian].

GERMANIUM MONOCRYSTALS GROWING SYSTEM BASED ON CONTACT METHOD OF MEASUREMENT

© 2008 S. P. Sahanski

Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev

Germanium monocrystals growing system by Czochralski based on contact method of measurement of current crystal area has been developed and applied in industry. The system allows to grow germanium monocrystals in a closed thermal gadgetry ensuring the necessary low-gradient thermal conditions of crystal growing.

Contact method of measurement, current crystal area, closed thermal rigging

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_Caxanckiy@sibsau.ru. Работает в области комплексного решения задач автоматизации процессов выращивания монокристаллов германия, автоматизации процессов управления очисткой сточных вод промышленных предприятий.

Sahanskiy Sergey Pavlovich, Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnev, Cand. Tech. Sci., senior lecturer, teaches rates “Microprocessor systems”, “Digital Control systems and processing of the information”. E-mail: ius_Caxanckiy@sibsau.ru. Solves the problems of automation of germanium monocrystals growing at FSUE Germanium (Krasnoyarsk) and the problems of automation of managerial processes of sewage treatment of the industrial enterprises at JSC Krastsvetmet, Krasnoyarsk.