

УДК 004.07

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-550-561

Для цитирования: Саханский С. П., Юленков С. Е. Повышение точности контактного метода измерения текущей площади кристаллов, выращиваемых способом Чохральского // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 3. С. 550–561. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-550-561

For citation: Sahansky S. P., Yulenkov S. E. [Increasing the accuracy of the contact method of measuring the current square of crystals grown by the way of the Czochralsky]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 550–561 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-550-561

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ПЛОЩАДИ КРИСТАЛЛОВ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ СПОСОБОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

С. П. Саханский*, С. Е. Юленков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: Sahanskiy@yandex.ru

Для кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского, при контроле и управлении текущей площадью кристалла, на основе контактного метода измерения определены основные требования для обеспечения точности измерения площади кристалла на цилиндрической части выращивания. В системе управления по координатам перемещения кристалла и тигля необходимо применять фотосчитывающие оптические линейки с дискретностью отсчета 0,1 мкм для определения величины перемещений за время цикла оценки сигнала управления. Для устранения ошибки из-за точности стабилизации уровня расплава в тигле предложен следующий алгоритм работы установки выращивания кристаллов.

За время оценки сигнала управления на цилиндрической части выращиваемого кристалла принимается время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля. Начинается вычисление времени оценки сигнала управления в момент замыкания датчика расплава и заканчивается в момент замыкания датчика расплава при условии выборки заданного количества импульсов перемещения тигля.

Время оценки сигнала управления в предыдущем цикле управления используется в текущем цикле для вычисления паузы замыкания как части вычисленного времени цикла оценки. В системе управления в момент замыкания контактного датчика выдерживается пауза замкнутого и последующая такая же пауза разомкнутого состояния датчика уровня. В моменты пауз состояние контактного датчика системой управления не анализируется, и управление подъемом тигля происходит с замедленной и ускоренной скоростью подъема тигля в моменты «условно замкнутого» и «условно разомкнутого» состояний датчика уровня.

Все это обеспечивает в данной системе управления точность измерения текущей площади кристалла на цилиндрической части величиной не хуже 1 %.

Ключевые слова: выращивание, кристаллы, контактный метод измерения.

INCREASING THE ACCURACY OF THE CONTACT METHOD OF MEASURING THE CURRENT SQUARE OF CRYSTALS GROWN BY THE WAY OF THE CZOHRALSKY

S. P. Sahansky*, S. E. Yulenkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: Sahanskiy@yandex.ru

For crystals grown from a liquid melt by the Czochralski method, when monitoring and controlling the current crystal area, based on the contact method of measurement, the basic requirements for ensuring the accuracy of measuring the area of the crystal on the cylindrical part of the growing are determined. In the control system with respect to the coordinates of the movement of the crystal and the crucible, it is necessary to use photo-reading optical rulers, with a sampling resolution of 0.1 μm , to determine the amount of movement during the control signal evaluation cycle. To eliminate the error due to the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible, the following algorithm for the operation of the crystal growing apparatus is proposed. During the evaluation of the control signal on the cylindrical part of the growing crystal, the sampling time of the predetermined number of pulses of the crucible movement is adopted. Calculation of the evaluation time of the control signal begins at the moment of closure of the melt sensor and ends when the melt sensor closes, provided that a predetermined number of pulses of the crucible

transfer is sampled. The evaluation time of the control signal in the previous control cycle is used in the current cycle to calculate the closure pause as part of the calculated evaluation cycle time. In the control system, at the moment of closing the contact sensor, a pause of the closed sensor is maintained, followed by a similar pause of the open state of the level sensor. During the moments of pauses, the state of the contact sensor by the control system is not analyzed and the control of the crucible lift occurs with a slowed and accelerated rate of the crucible lift during the moments of the "conditionally" closed and "conditionally" open states of the level sensor. All this ensures in this control system the accuracy of measuring the current area of the crystal, on the cylindrical part, by a value not worse than 1 %.

Keywords: growing, crystals, contact method of measurement.

Введение. В работе [1] предложен оригинальный способ контроля процесса выращивания монокристалла по способу Чохральского, который основан на использовании в качестве программатора шаблона, имитирующего кристалл заданной формы. Тигель с расплавом и контейнер с жидкостью помещают на верхнечашечные лабораторные весы. В процессе роста шаблон погружают в жидкость с той же скоростью, с какой кристалл вытягивается из расплава. Шаблон и кристалл соединены гибкой тягой. Равновесие сохраняется, если количество твердой фазы и жидкости, вытесняемой шаблоном в единицу времени, одинаково. При нарушении равновесия (уменьшение или увеличение диаметра кристалла) сигнал рассогласования весов после оптоэлектронного преобразователя и усиления используется как программирующий для температурного контроля нагревателя совместно с сигналом от термопары. В устройстве [2] при вытягивании монокристалла заданного диаметра за счет лазерного измерителя контролируют непрерывно убывающий уровень расплава в тигле. Сигнал с лазерного измерителя уровня расплава сравнивают с программируемым датчиком изменения уровня, а разностный сигнал после данного сравнения используют для коррекции температуры расплава через регулятор мощности нагревателя и скорости вытягивания кристалла. Посредством данного регулирования стабилизируют текущий диаметр кристалла.

Микропроцессорные системы управления выращиванием кристаллов германия, разработанные на основе патентов [3; 4], были внедрены в полупроводниковое производство выращивания кристаллов германия (рис. 1). В свою очередь, данная разработка является аналогом систем управления, приведенных в работах [1; 2].

Работа систем управления, основанных на контактном методе измерения текущей площади выращиваемых кристаллов (рис. 1), заключается в следующем: под управлением системы управления в камере производится выращивание кристалла диаметром d , со скоростями выращивания V_3 и вращения W_3 кристалла, при этом расплавленный металл, находящийся в тигле с внутренним диаметром D , вращается с угловой скоростью W_T по мере убывания расплава в тигле.

Сигнал с контактного датчика подается через сглаживающий фильтр $C1, R1, R2$ и блок согласования в ЭВМ для принятия решения об управлении подъемом тигля вверх, которое осуществляется блоком управления шаговым двигателем. Кроме скорости подъема тигля вверх V_T в системе происходит формирование информации о перемещении тигля $X_{\text{итц}}$

(с дискретностью x_T) и информации $X_{\text{итц}}$ о перемещении кристалла (с дискретностью x_3). Управление от ЭВМ скоростями выращивания кристалла V_3 , вращения кристалла W_3 , вращения тигля W_T осуществляется через соответствующие приводы. Управление температурой расплава осуществляется на основе формирования задания температуры T_3 от ЭВМ на регулятор температуры, с обратной связью по датчику температуры боковой поверхности нагревателя.

Основы работы систем управления, при контактном методе измерения текущей площади выращиваемых кристаллов. Управление скоростью выращивания кристалла $V_3(x)$, температурой боковой поверхности нагревателя $T_3(x)$, скоростью вращения кристалла $W_3(x)$ и тигля $W_T(x)$ формируется на основе выражений (1)–(4):

$$V_3(x) = V_{3\text{н}}(x) + Z \cdot K_V \cdot y, \quad (1)$$

$$T_3(x) = T_{3\text{н}}(x) + Z \cdot A_T \cdot \int y \cdot dx, \quad (2)$$

$$W_3(x) = W_{3\text{н}}(x), \quad (3)$$

$$W_T(x) = W_{T\text{н}}(x), \quad (4)$$

где K_V – пропорциональный коэффициент регулирования по скорости; A_T – интегральный коэффициент регулирования по температуре; $V_{3\text{н}}(x)$, $W_{3\text{н}}(x)$, $W_{T\text{н}}(x)$, $T_{3\text{н}}(x)$ – программное задание закона 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 вдоль оси кристалла; y – сигнал управления по отклонению текущей площади выращиваемого кристалла от заданной.

Процесс стабилизации диаметра кристалла происходит в системе управления в соответствии с выражениями (1), (2), при включении признака захвата управления по диаметру ($Z = 1$) на цилиндрической части кристалла, на основе сигнала управления y .

Программные задания технологических параметров процесса выращивания кристалла германия $V_{3\text{н}}(x)$, $W_{3\text{н}}(x)$, $T_{3\text{н}}(x)$ в микропроцессорных системах были основаны на задании кадровой системы управляющих параметров, где в каждом кадре записана скорость, направление изменения параметра и время кадра. Если задать геометрию выращиваемого кристалла и его осевой градиент в твердой части, то можно предварительно смоделировать задание скорости и температуры выращивания на всех участках кристалла по разработанной авторами модели роста [5].

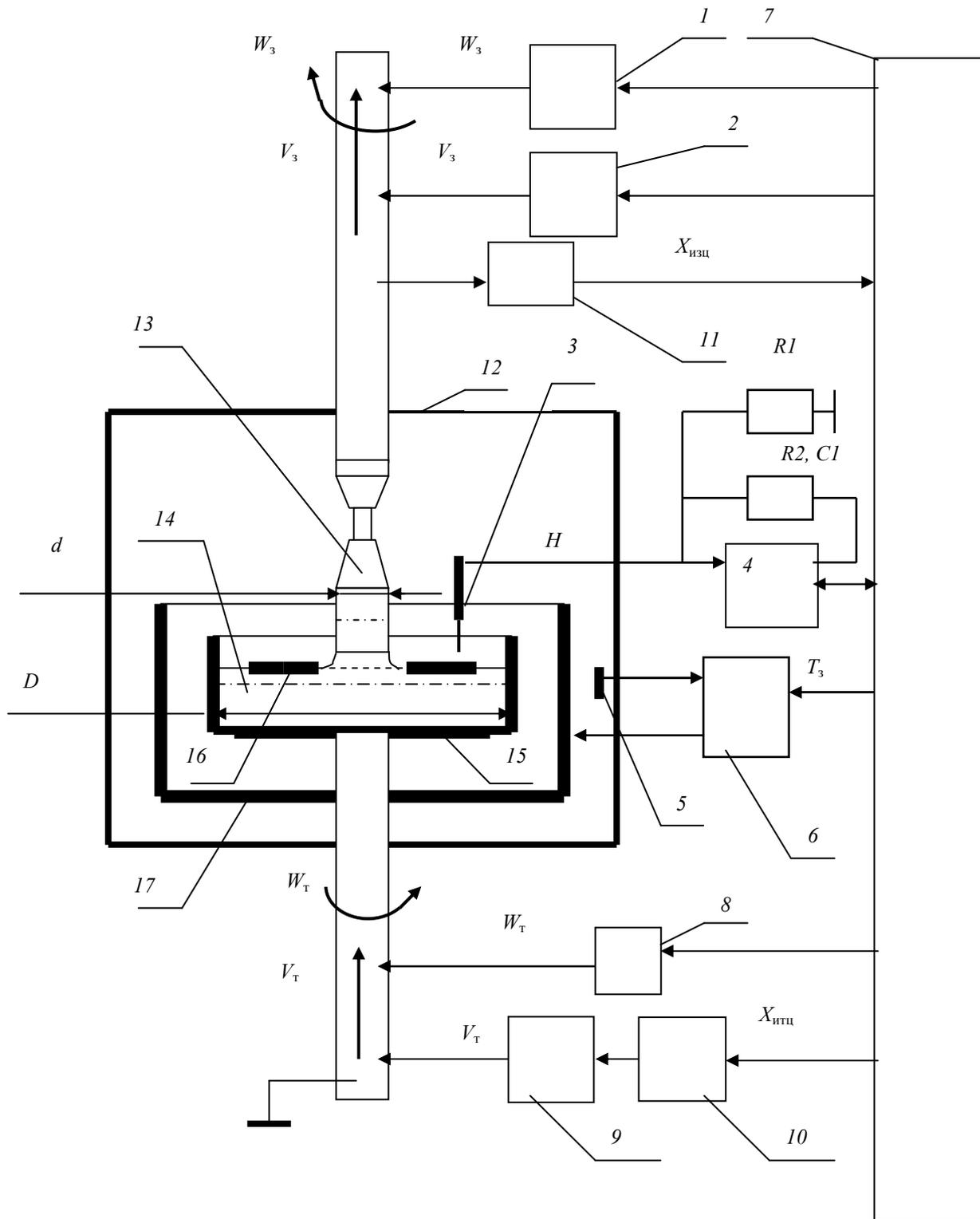


Рис. 1. Система управления на основе контактного метода измерения:

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

Fig. 1. Control system based on the contact method of measurement:

1 – seed rotation drive; 2 – seed drive; 3 – contact sensor; 4 – coordination unit with a computer; 5 – temperature sensor; 6 – temperature regulator; 7 – the computer; 8 – rotational drive of the crucible; 9 – stepper motor; 10 – stepper motor control unit; 11 – the sensor of seed movement; 12 – the chamber; 13 – ingot; 14 – melt of metal; 15 – crucible; 16 – screen; 17 – heater

Конструктивное исполнение системы автоматического управления вытягиванием монокристаллов германия приведено на рис. 2, а на рис. 3 приведен вид плавающего графитового экрана с графитовым датчиком уровня расплава, на рис. 4 показан вид выращенного монокристаллического слитка германия диаметром 104 мм.

Основой для контактного метода контроля и управления выращиванием кристаллов [6–18] является управление текущей площадью (или диаметром

при круглой форме) растущего кристалла по сигналу управления u , вычисленному как функция отклонения текущей площади кристалла от заданной, с использованием перемещений кристалла $X_{зц}$ и тигля $X_{тц}$ за период $T_{ц}$ оценки сигнала управления u . От точности определения сигнала управления u и отсутствия в вычисленном значении значительных помех напрямую зависит форма выращиваемого кристалла на его цилиндрической части.



Рис. 2. Микропроцессорная система управления вытягиванием монокристаллов германия

Fig. 2. Microprocessor control system for drawing germanium single crystals

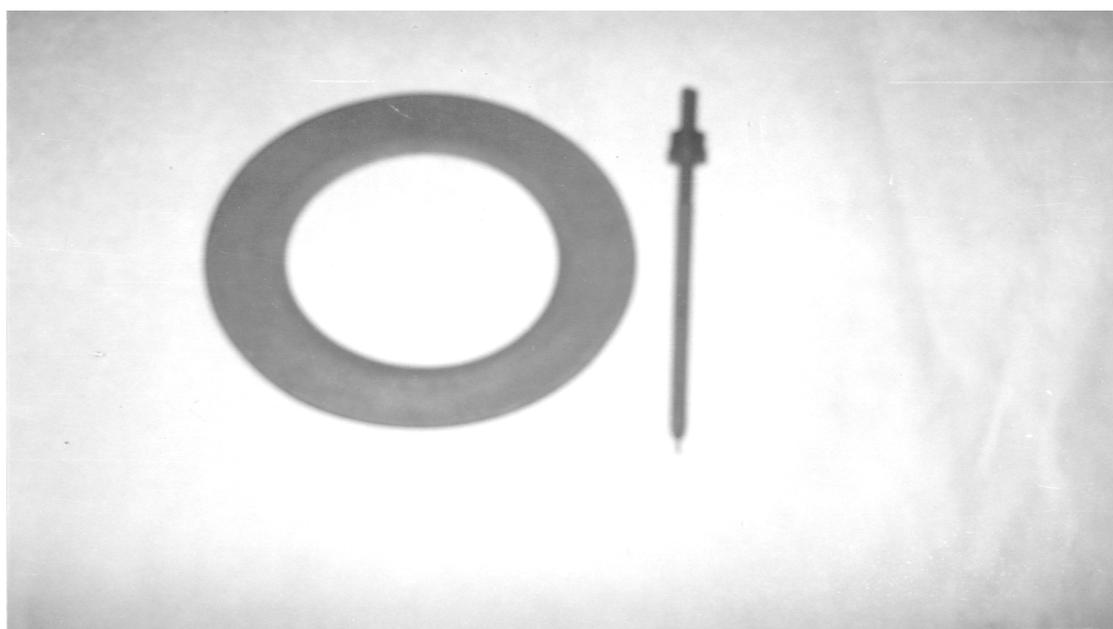


Рис. 3. Плавающий графитовый экран и датчик уровня расплава

Fig. 3. Floating graphite screen and melt level sensor

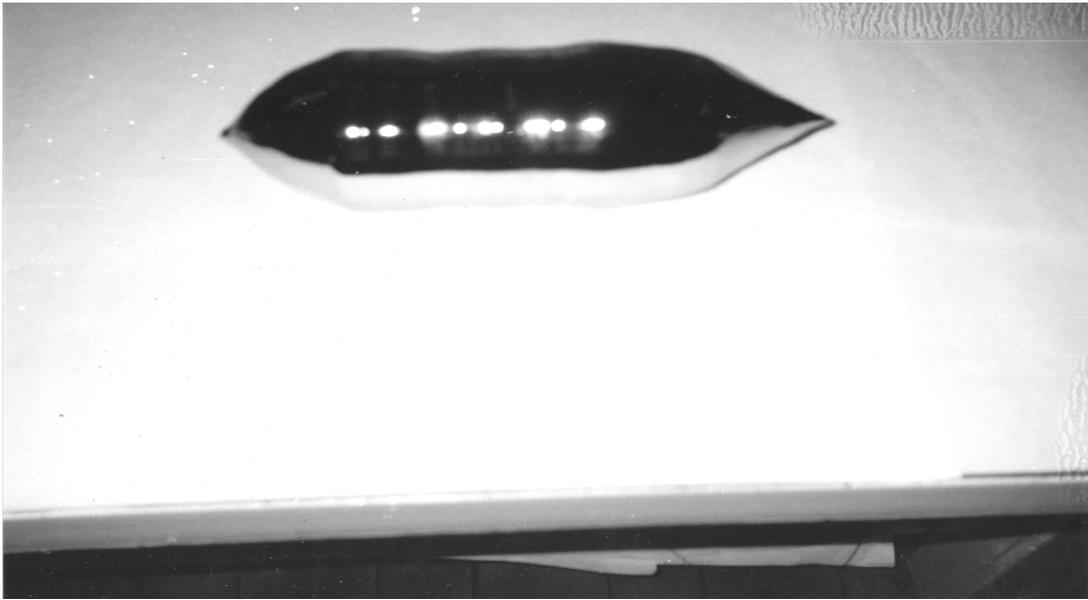


Рис. 4. Слиток германия диаметром 104 мм

Fig. 4. A germanium billet with a diameter of 104 mm

Скорость убывания расплава в тигле V_p , а также ускоренная скорость подъема тигля вверх V_{TM} после размыкания контактного датчика и замедленная скорость подъема тигля после замыкания контактного датчика V_{TM}/M определяются по выражениям (5)–(9), в которых введены коэффициенты увеличения скорости ($C = 4$) и уменьшения скорости подъема тигля ($M = 4$), что нашло применение при выращивании цилиндрической части кристалла и обеспечивает периодическое замыкание и размыкание контактного датчика в диапазоне изменения уровня расплава порядка 1–2 мкм. При выращивании прямого и обратного конуса кристалла для управления скоростью перемещения тигля вверх применяется условие полной остановки подъема тигля в моменты замкнутого состояния датчика уровня расплава ($M = \infty$):

$$V_p = V_3 \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d}{D} \right]^2, \quad (5)$$

$$V_T = V_{TM} = V_p \cdot \left[\frac{d_{\max}}{d} \right]^2 = V_3 \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d_{\max}}{D} \right]^2, \quad (6)$$

$$d_{\max} = d_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-1/C}}, \quad (7)$$

$$V_T = \frac{V_{TM}}{M} = V_p \cdot \left[\frac{d_{\min}}{d} \right]^2 = V_3 \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d_{\min}}{D} \right]^2, \quad (8)$$

$$d_{\min} = d_{\max} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad (9)$$

где V_T – скорость подъема тигля; V_p – скорость убывания расплава в тигле; V_3 – скорость выращивания кристалла; d – текущий диаметр кристалла; D – внутренний диаметр тигля; ρ_T – удельная плотность твердого материала; $\rho_{ж}$ – удельная плотность жидкого

материала; d_1 – заданный диаметр выращиваемого кристалла на цилиндрической части; d_{\max} – максимально допустимый диаметр выращиваемого кристалла, с соблюдением которого выполняется основное условие, при котором датчик и экран сомкнутся после размыкания; d_{\min} – минимально допустимое значение диаметра кристалла, при котором соблюдается условие отставания экрана от датчика после его замкнутого состояния.

Для контактного метода измерения сигнал управления y , величина перемещения затравки $X_{зц}$ и тигля $X_{тц}$ за время оценки $T_{ц}$ могут быть представлены в виде выражений (10)–(14):

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

$$K_y = B \cdot \frac{x_T \cdot \rho_{ж}}{x_3 \cdot \rho_T} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2, \quad (11)$$

$$y = \frac{X_{изц}}{A} \cdot \left(\left[\frac{d}{d_1} \right]^2 - 1 \right), \quad (12)$$

$$X_{зц} = X_{изц} \cdot x_3, \quad (13)$$

$$X_{тц} = X_{итц} \cdot x_T, \quad (14)$$

где A , B – коэффициенты масштабирования; K_y – установка заданного диаметра (площади) выращиваемого кристалла; $X_{изц}$ – перемещение затравки с дискретностью отсчета x_3 ; $X_{итц}$ – перемещение тигля с дискретностью отсчета x_T ; x_3 – дискретность отсчета перемещения затравки; x_T – дискретность отсчета перемещения тигля.

Выражение (12) показывает непосредственную связь сигнала управления y с отклонением текущей площади кристалла от заданной. За время цикла оцен-

ки $T_{ц}$ сигнал управления y вычисляют в системе управления по выражению (10), а с помощью записи в систему управления уставки диаметра K_y на цилиндрической части выращиваемого кристалла задают площадь выращивания.

В качестве привода подъема тигля для управления скоростью подъема вверх применяют разомкнутый шаговый привод с шаговым двигателем, обеспечивающий процесс многократного изменения скорости подъема тигля по сигналу с контактного датчика уровня.

Выражения для импульсов перемещения затравки $X_{изц}$, тигля $X_{итц}$ и времени $T_{ц}$ оценки сигнала управления y можно представить в виде выражений (15), (16):

$$X_{изц} = \frac{X_{итц} \cdot K_y}{B}, \quad (15)$$

$$T_{ц} = \frac{X_{изц} \cdot x_3}{V_3} = \frac{X_{итц}}{V_3} = \frac{X_{итц} \cdot K_y \cdot x_3}{B \cdot V_3}, \quad (16)$$

где $T_{ц}$ – период оценки сигнала управления (время отработки заданного количества импульсов $X_{итц}$ или $X_{изц}$).

Примем за время оценки $T_{ц}$ сигнала управления y на цилиндрической части выращиваемого кристалла время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$ (в процессе убывания расплава в тигле) в соответствии с выражениями (17), (18):

$$X_{тц} = X_{зц} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_j} \cdot \left[\frac{d_1}{D} \right]^2, \quad (17)$$

$$T_{ц} = \frac{X_{тц}}{V_3} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2. \quad (18)$$

Время суммарного движения t в процессе замыкания контактного датчика с замедленной скоростью и время суммарного движения с ускоренной скоростью движения тигля после размыкания датчика t_d , а также число циклов $K_{ц}$ по замыканию и размыканию датчика за период оценки сигнала управления $T_{ц}$ можно представить в виде выражений (19), (20):

$$t_d(d) = t \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{d_{\min}}{d} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{d_{\max}}{d} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (19)$$

$$K_{ц} = \frac{T_{ц}}{(t_d + t)}, \quad (20)$$

где t – время движения тигля с замедленной скоростью $V_{тм}/M$ после замыкания датчика за период оценки сигнала управления; t_d – время движения тигля с ускоренной скоростью $V_{тм}$ после размыкания датчика за период оценки сигнала управления; $K_{ц}$ – число циклов замыкания и размыкания датчика за время $T_{ц}$.

Точность контактного метода измерения текущей площади выращиваемого кристалла. В рассматриваемой системе управления установкой вытя-

гивания германия применена временная диаграмма управления (рис. 5) при выращивании цилиндрической части кристалла, состоящая в том, что в системе управления в момент замыкания контактного датчика необходимо выдержать программную паузу τ замкнутого и последующую паузу τ разомкнутого состояния датчика уровня. В моменты пауз величиной τ состояние контактного датчика системой управления не анализируется, и управление подъемом тигля происходит с замедленной и ускоренной скоростью подъема тигля в моменты «условно замкнутого» и «условно разомкнутого» состояний датчика уровня.

После выдержки двух пауз происходит анализ условий замыкания датчика уровня расплава и управление приводом перемещения тигля вверх.

Данное управление повышает помехозащищенность метода вычисления текущей площади на цилиндрической части выращиваемого кристалла за счет отсутствия реакции системы на срабатывания контактного датчика в моменты двух пауз.

Величина размыкания уровня расплава на цилиндрической части выращиваемого кристалла L_p задается в пределах 2 мкм. Время паузы τ и время $t_{дм}(d)$ замыкания датчика (после двух пауз) можно представить в виде выражений (21), (22) при условии размыкания датчика расплава на величину L_p :

$$\tau = \frac{L_p \cdot T_{ц}}{X_{тц} \cdot \left[\left(\frac{d_{\max}}{d_1} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (21)$$

$$t_{дм}(d) = \tau \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{d_{\min}}{d} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{d_{\max}}{d} \right)^2 - 1 \right]} - \tau, \quad (22)$$

где τ – время движения тигля с замедленной скоростью $V_{тм}/M$ после замыкания датчика (при убывании расплава на величину L_p); $t_{дм}(d)$ – время движения тигля с ускоренной скоростью $V_{тм}$ после выдержки двух пауз τ до замыкания датчика.

Число циклов $K_{ц}$ по замыканию и размыканию датчика за период оценки сигнала управления $T_{ц}$ можно представить в виде выражения (23):

$$K_{ц} = \frac{T_{ц}}{(t_{дм}(d) + \tau \cdot 2)}, \quad (23)$$

где $K_{ц}$ – число циклов замыкания и размыкания датчика за время $T_{ц}$.

Число замыканий контактного датчика $K_{ц}$ за период оценки $T_{ц}$ должно находиться в пределах 5–10, при этом необходимо обеспечить условие постоянного вращения графитового экрана в течение всего технологического процесса за счет наличия легкой выпадающей графитовой иголки на конце датчика (см. рис. 3), имеющей фиксированное нижнее положение. Временная диаграмма работы привода подъема тигля с учетом выдержки двух пауз после замыкания датчика уровня представлена на рис. 6.

По выражению (12) можно оценить величину вычисляемого сигнала управления y , представленную графически на рис. 7.

Погрешность r в вычислении сигнала управления в зависимости от точности стабилизации уровня расплава в тигле можно представить в виде выражения, которое графически представлено на рис. 8:

$$r = \frac{x \cdot \rho_{ж}}{x_3 \cdot \rho_{\tau}} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2, \quad (24)$$

где r – погрешность в вычислении сигнала управления за цикл измерения; x – точность стабилизации уровня расплава в тигле.

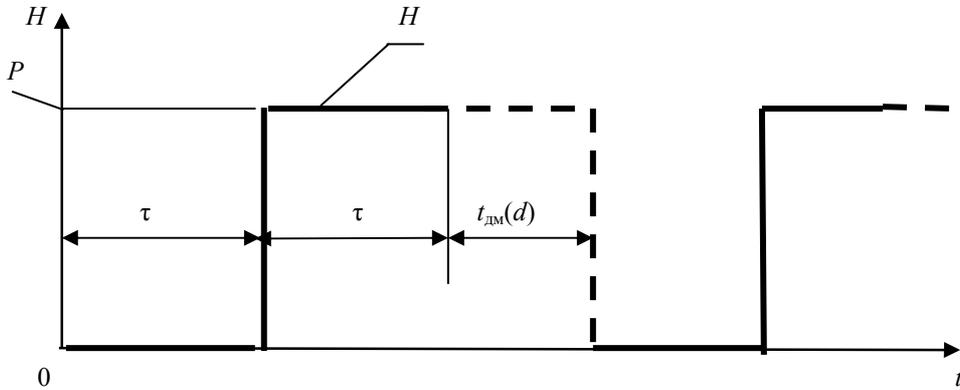


Рис. 5. Временная диаграмма работы датчика уровня:
H – работа контактного датчика уровня (P – датчик разомкнут)

Fig. 5. Timing diagram of the level sensor:
H – operation of the contact level sensor (P – sensor open)

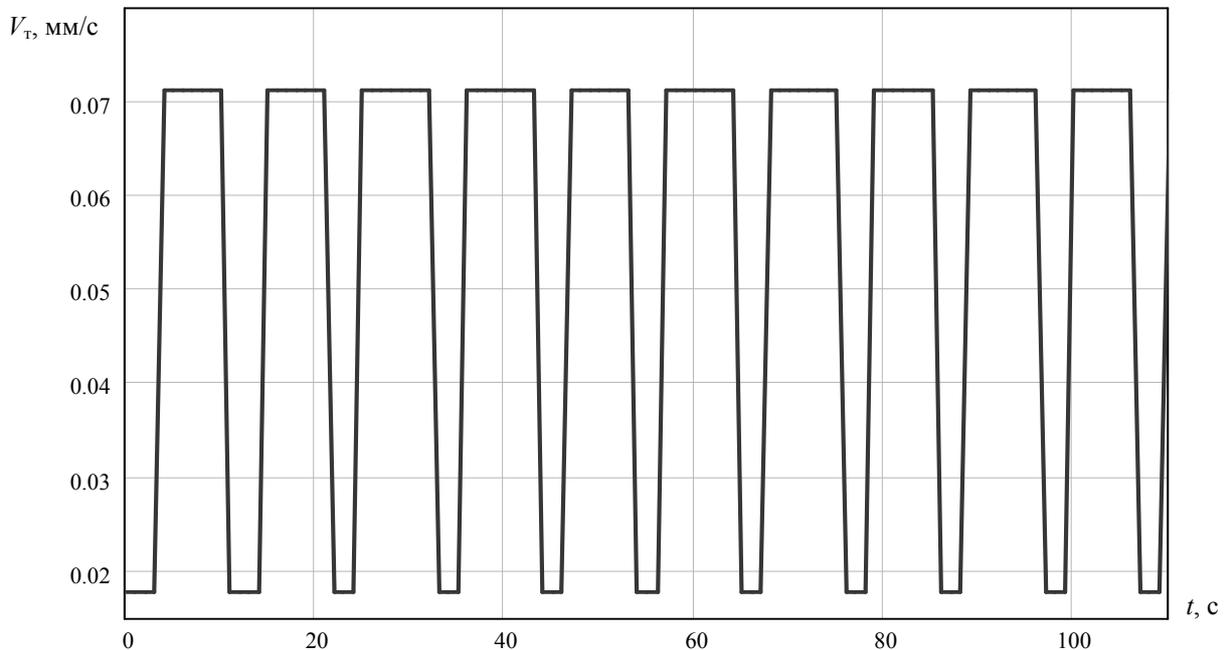


Рис. 6. Диаграмма изменения скорости подъема тигля V_{τ} :
 $x_{\tau} = 0,0266$ мкм; $x_3 = 0,0216$ мкм; $d_1 = 100$ мм; $D = 300$ мм; $d = 105$ мм; $V_3 = 0,0083$ мм/с; $C = 4$; $M = 4$;
 $L_p = 2$ мкм; $X_{зи} = 1000$ мкм; $\rho_{\tau} = 5,35$ г/см²; $\rho_{ж} = 5,57$ г/см²

Fig. 6. Diagram of the change in the crucible lift rate V_{τ} :
 $x_{\tau} = 0,0266$ μm; $x_3 = 0,0216$ μm; $d_1 = 100$ mm; $D = 300$ mm; $d = 105$ mm; $V_3 = 0,0083$ mm/s; $C = 4$; $M = 4$;
 $L_p = 2$ μm; $X_{зи} = 1000$ μm; $\rho_{\tau} = 5,35$ g/cm²; $\rho_{ж} = 5,57$ g/cm²

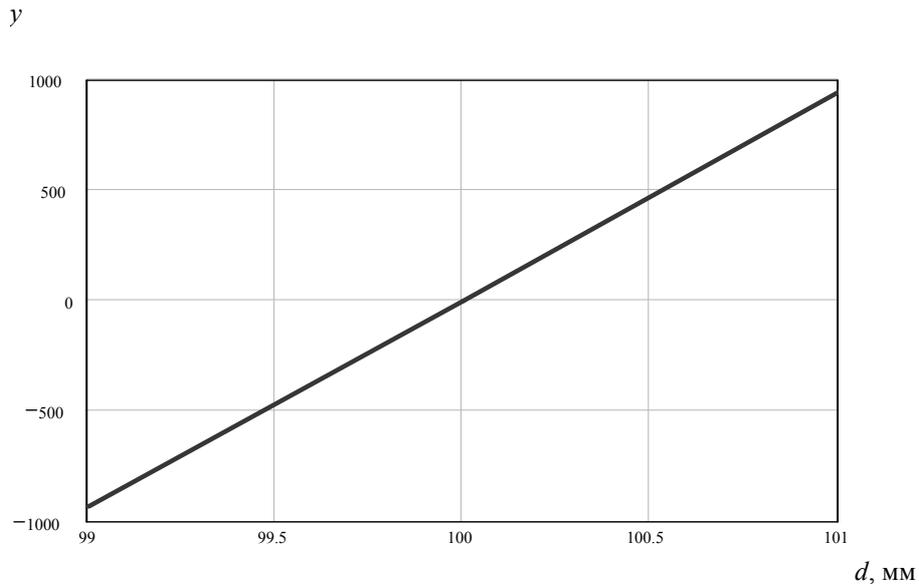


Рис. 7. Зависимость сигнала управления y от отклонения текущего диаметра d от заданного d_1 при $d_1 = 100$ мм, $x_3 = 0,02127$ мкм, $X_{3ц} = 1000$ мкм, $A = 1$

Fig. 7. Dependence of control signal y on deviation of the current diameter d from the given d_1 with: $d_1 = 100$ mm; $x_3 = 0,02127$ μm ; $X_{3ц} = 1000$ μm ; $A = 1$

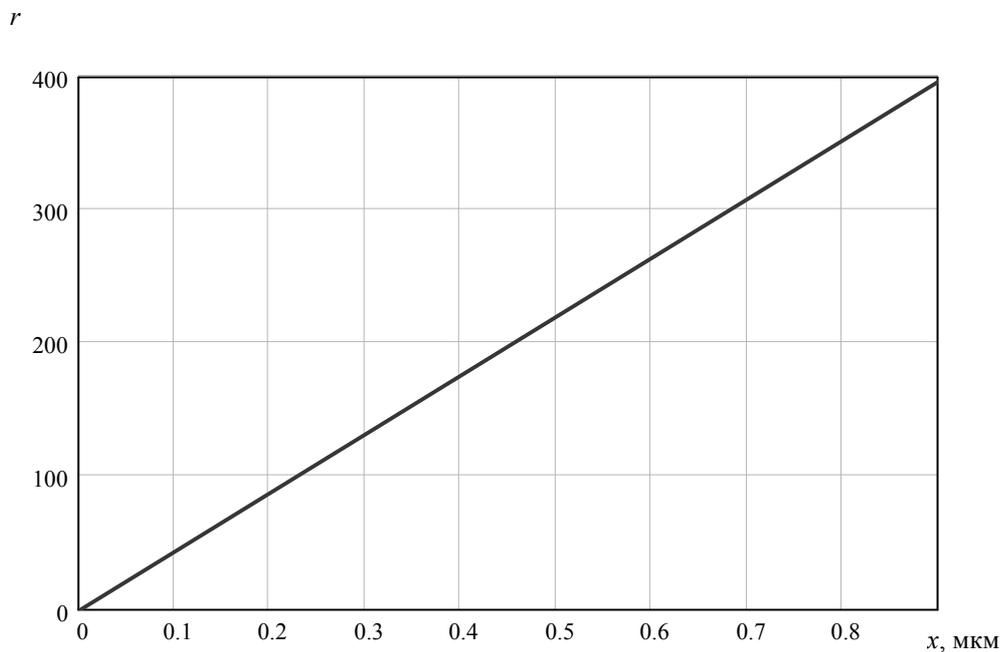


Рис. 8. Погрешность сигнала управления r в зависимости от точности стабилизации уровня расплава в тигле x при $x_3 = 0,0216$ мкм, $d_1 = 100$ мм, $D = 300$ мм, $A = 1$, $\rho_r = 5,35$ г/см², $\rho_{ж} = 5,57$ г/см²

Fig. 8. The error of the control signal r , depending on the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible x with: $x_3 = 0,0216$ μm ; $d_1 = 100$ mm; $D = 300$ mm; $A = 1$; $\rho_r = 5,35$ g/cm²; $\rho_{ж} = 5,57$ g/cm²

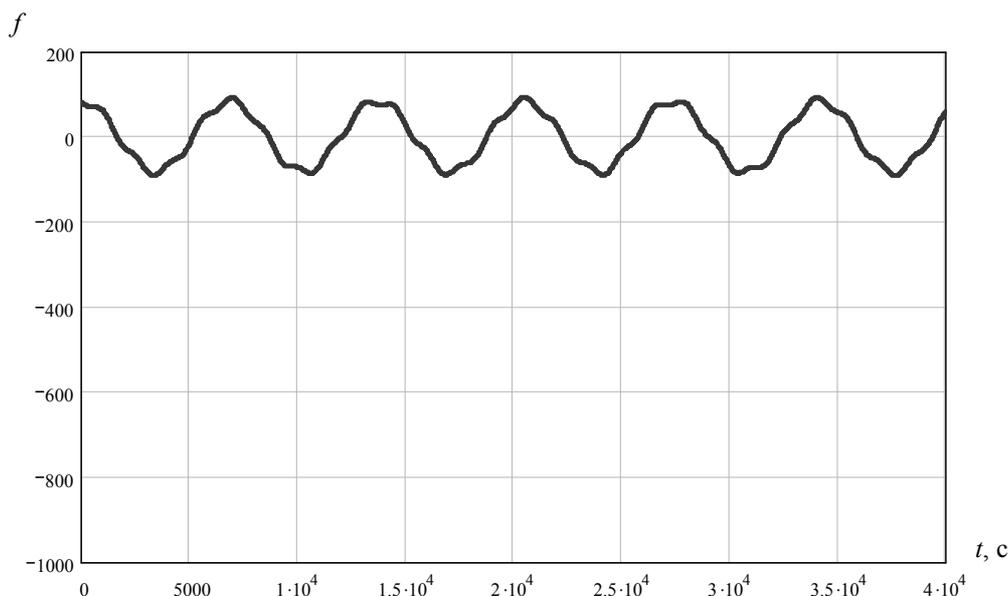


Рис. 9. Временная зависимость ошибки регулирования f при $x_t = 0,0266$ мкм, $x_3 = 0,0216$ мкм, $A_t = 0,2$ мкм, $A_3 = 0,2$ мкм, $d_1 = 100$ мм, $D = 300$ мм, $H_t = 2$ мм, $H_3 = 4$ мм, $\varphi_t = \pi/2$ рад, $\varphi_3 = \pi/8$ рад, $V_3 = 0,0166$ мм/с

Fig. 9. Time dependence of the control error f for $x_t = 0,0266$ μm ; $x_3 = 0,0216$ μm ; $A_t = 0,2$ μm ; $A_3 = 0,2$ μm ; $d_1 = 100$ mm; $D = 300$ mm; $H_t = 2$ mm; $H_3 = 4$ mm; $\varphi_t = \pi/2$ rad; $\varphi_3 = \pi/8$ rad; $V_3 = 0,0166$ mm/s

При коэффициенте $A = 1$, исходя из выражений (10)–(14), сигнал управления y , величину перемещения затравки $X_{зц}$ и тигля $X_{тц}$ за время оценки $T_{ц}$ можно представить в виде выражений

$$y = \frac{X_{тц} \cdot \frac{\rho_{ж}}{\rho_t} \cdot \left[\frac{D}{d_1}\right]^2 - X_{зц}}{x_3}, \quad (25)$$

$$X_{зц} = V_3 \cdot T_{ц} + A_3 \cdot \sin\left(\frac{V_3 \cdot t}{H_3} + \varphi_3\right), \quad (26)$$

$$X_{тц} = V_3 \cdot T_{ц} \cdot \left[\frac{d_1}{D}\right]^2 + A_t \cdot \sin\left(\left[\frac{d_1}{D}\right]^2 \cdot \frac{V_3 \cdot t}{H_t} + \varphi_t\right), \quad (27)$$

где A_t – амплитуда помехи по перемещению тигля, мкм; A_3 – амплитуда помехи по перемещению затравки, мкм; V_3 – скорость выращивания кристалла, мм/с; H_t – шаг винтовой пары по перемещению тигля, мм; H_3 – шаг винтовой пары по перемещению затравки, мм; φ_t – угол смещения помехи по тиглю, рад; φ_3 – угол смещения помехи по затравке, рад; t – время процесса вытягивания, с.

Синусоидальные члены в выражениях (26), (27) учитывают ошибки, возникающие в трапецидальных винтовых парах с периодичностью шага винта, для систем управления перемещением штока затравки и тигля без обратной связи, что в свою очередь создает в системах по перемещению помеху в сигнале управ-

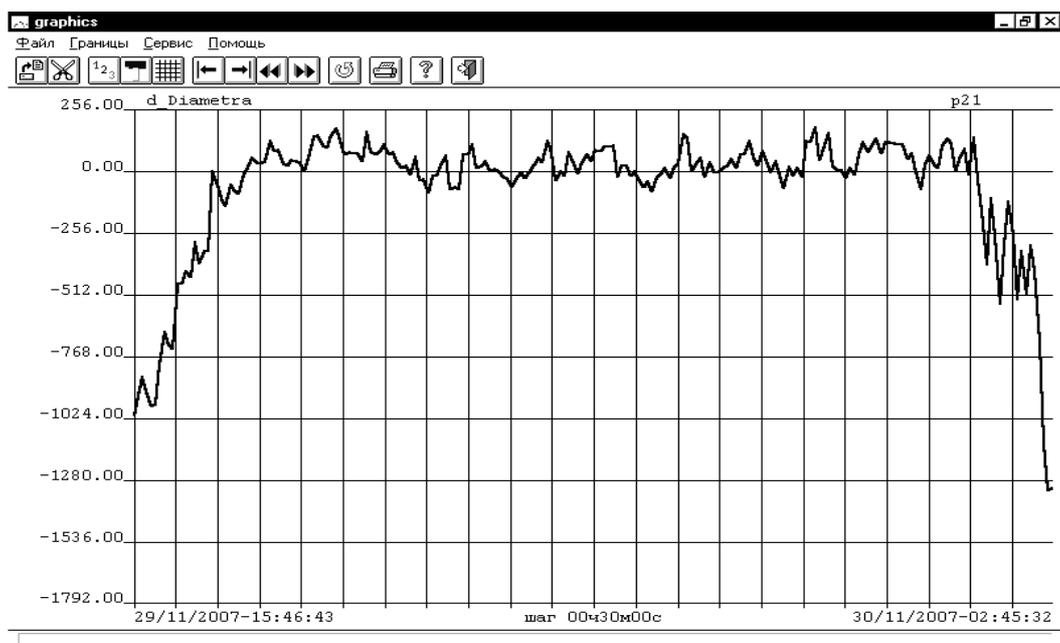
ления f , которая на основе выражений (26), (27) примет вид

$$f = \frac{\rho_{ж}}{\rho_t} \cdot \left[\frac{D}{d_1}\right]^2 \cdot \left[\frac{A_t}{x_3}\right] \cdot \sin\left(\left[\frac{d_1}{D}\right]^2 \cdot \frac{V_3 \cdot t}{H_t} + \varphi_t\right) - \left[\frac{A_3}{x_3}\right] \cdot \sin\left(\frac{V_3 \cdot t}{H_3} + \varphi_3\right). \quad (28)$$

Временная зависимость ошибки f приведена на рис. 9, она хорошо согласуется с графиком ошибки измерения, полученным при работе промышленной установки на рис. 10. Ошибка f соответствует неточности изготовления винтовой передачи в пределах шага винтовых пар трапецидальной формы и обусловлена неточностью стабилизации уровня расплава. На рис. 10 видно, что ошибка f имеет сложный периодический вид.

Так как в реальном процессе выращивания фаза сигналов ошибки φ_t и φ_3 носит случайный характер, то учесть и компенсировать данную ошибку на основе проверки и тестирования установки вытягивания программными средствами оказалось невозможным.

Уменьшение погрешности f возможно за счет применения прецизионных шариковых винтовых передач или установки в качестве отсчета перемещений на установке выращивания кристаллов по координатам перемещения затравки и тигля фотосчитывающих оптических линеек с дискретностью отсчета 0,1 мкм, что является наиболее приемлемым вариантом.

Рис. 10. График изменения сигнала управления y (d_Diametra)Fig. 10. Control signal change graph y (d_Diametra)

Для устранения ошибки из-за точности стабилизации уровня расплава в тигле r предлагается следующий программный алгоритм работы:

1. За время оценки $T_{ц}$ сигнала управления y на цилиндрической части выращиваемого кристалла берется время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$.

2. Начинается вычисление времени оценки $T_{ц}$ сигнала управления y в момент замыкания датчика расплава.

3. Заканчивается вычисление времени оценки $T_{ц}$ сигнала управления y в момент замыкания датчика расплава при условии выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$.

4. Время оценки $T_{ц}$ сигнала управления y в предыдущем цикле управления используется в текущем цикле для вычисления паузы замыкания по выражению (21).

Все это позволяет свести погрешность r в сигнале управления y до величины порядка 100–150 ед.

Заключение. Для кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского при контроле текущей площади кристалла на основе контактного метода измерения определены основные требования для обеспечения точности измерения текущей площади кристалла на цилиндрической части выращиваемого кристалла. В системе управления по координатам перемещения кристалла и тигля необходимо применять фотосчитывающие оптические линейки с дискретностью отсчета 0,1 мкм для отсчета величины перемещений за время цикла оценки.

Для устранения ошибки из-за точности стабилизации уровня расплава в тигле предлагается новый программный алгоритм работы установки выращивания кристаллов. За время оценки $T_{ц}$ сигнала управления y

на цилиндрической части выращиваемого кристалла принимается время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$. Начинается вычисление времени оценки $T_{ц}$ сигнала управления y в момент замыкания датчика расплава, заканчивается вычисление времени оценки $T_{ц}$ сигнала управления y в момент замыкания датчика расплава при условии выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$. Время оценки $T_{ц}$ сигнала управления y в предыдущем цикле управления используется в текущем цикле для вычисления паузы замыкания как части времени оценки $T_{ц}$. В системе управления в момент замыкания контактного датчика выдерживается пауза замкнутого и последующая такая же пауза разомкнутого состояния датчика уровня. В моменты пауз состояние контактного датчика системой управления не анализируется, и управление подъемом тигля происходит с замедленной и ускоренной скоростью подъема тигля в моменты «условно замкнутого» и «условно разомкнутого» состояний датчика уровня. Все это обеспечивает в данной системе управления точность измерения текущей площади кристалла на цилиндрической части величиной не хуже 1 %.

Библиографические ссылки

- Schmidt F., Voszka R. Phantom controlled automatic Czochralski growth apparatus // Crystal Research and Technology. 1981. Vol. 10, № 11. P. 127–128.
- Пат. 2337169 Федеративная Республика Германия, МКИ В0 1 J 17/18. 1974.
- Пат. 2128250 Российская Федерация, МПК С 30 В 15/20, 15/22, 15/26. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / Саханский С. П.,

Подкопаев О. И., Петрик В. Ф. Заявл. 16.01.97, опубл. 27.03.99, Бюл. № 9.

4. Пат. 2184803 Российская Федерация, МПК С 30 В 15/20, 15/22, 15/12 29/08. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / Саханский С. П., Подкопаев О. И., Петрик В. Ф., Лаптенков В. Д. Заявл. 12.11.99, опубл. 10.07.02, Бюл. № 19.

5. Саханский С. П. Управление формой полупроводниковых кристаллов при выращивании по способу Чохральского // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. № 7(1). С. 20–31.

6. Саханский С. П., Подкопаев О. И., Лаптенков В. Д. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава // Перспективные материалы, технологии, конструкции и экономика : сб. науч. тр. / под. ред. В. В. Стацур; ГАЦМиЗ. Красноярск, 2000. Вып. 6. С. 391–393.

7. Саханский С. П. Оценка точности управления на базе «улучшенного контактного метода» управления выращиванием монокристаллов германия из расплава по способу Чохральского // Решетневские чтения : материалы 4 Всерос. научн. конф., проводимой в составе 2-го Междунар. Сибир. авиац.-космич. салона «САКС-2002» (11–14 нояб. 2002, г. Красноярск) ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2002. С. 68–71.

8. Саханский С. П., Лаптенков В. Д. Особенности конструирования датчиков положения уровня расплава для германия // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика : сб. науч. тр. под общ. ред. В. В. Стацур; ГУЦМиЗ. Красноярск, 2005. Вып. 11. С. 169–170.

9. Саханский С. П., Лаптенков В. Д. Совмещение системы управления выращиванием монокристаллов германия на основе контактного метода измерения диаметра и одновременного вытягивания монокристалла из фильеры способом Степанова // Вестник СибГАУ, 2005. Вып. 6. С. 246–247.

10. Саханский С. П. Основные математические соотношения контактного метода управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского // Вестник СибГАУ 2005. Вып. 7. С. 85–88.

11. Саханский С. П., Лаптенков В. Д. Определение величины коррекции сигнала управления по диаметру, от изменения высоты столбика мениска кристалла, при контактном методе управления выращиванием монокристаллов способом Чохральского // Вестник СибГАУ, 2005. Вып. 7. С. 89–90.

12. Саханский С. П. Определение величины колебания расплава и чувствительности при контактном методе управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского // Вестник СибГАУ, 2006. Вып. 1(8). С. 103–104.

13. Саханский С. П. Погрешность контактного метода измерения текущей площади выращиваемого монокристалла германия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 2. С. 43–46.

14. Саханский С. П. Измерение площади монокристалла в системе автоматического управления выра-

щиванием германия // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 8. С. 44–48.

15. Саханский С. П. Установка выращивания монокристаллов германия на основе контактного метода измерения // Вестник Самарского государственного университета им. акад. С. П. Королева / Самарский гос. аэрокосмич. ун-т. Самара, 2008. Вып. 2. С. 100–105.

16. Саханский С. П. Измерение и управление площадью кристалла на установке вытягивания германия // Вестник СибГАУ, 2008. Вып. 1(18). С. 148–150.

17. Саханский С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 104 с.

18. Саханский С. П. Измерение площади кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского, на основе управления условиями замыкания контактного датчика уровня расплава // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2015. № 7(8). С. 835–850.

References

1. Schmidt F., Voszka R. Phantom controlled automatic Czochralski growth apparatus. *Crystal Research and Technology*. 1981, Vol. 10, No. 11, P. 127–128.

2. Pat. 2337169. Federal Republic of Germany, ICI B01 J17/18-1974.

3. Sahansky S. P., Podkopaev O. I., Petrik V. F. *Sposob upravleniya protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya iz rasplava i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for controlling the process of growing single crystals of germanium from the melt, and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2128250, 1997.

4. Sahansky S. P., Podkopaev O. I., Petrik V. F., Laptenok V. D. *Sposob upravleniya protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya iz rasplava i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for controlling the process of growing single crystals of germanium from the melt, and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2184803, 1999.

5. Sakhanskiy S. P. [Controlling the shape of semiconductor crystals when grown according to the Czochralski method]. *J/Sib. Fed. Univ. Eng., Technol.* 2014, Vol. 7, No. 1, P. 20–31 (In Russ.).

6. Sakhanskiy S. P. [Method for controlling the growth of germanium single crystals from a melt]. *Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruktсии i ekonomika : sb. nauchn. tr.; pod. red. V. V. Statsury GATsMiZ* [Perspective Materials, Technologies, Constructions and Economics: Sat. scientific. tr.; under. Ed. V. V. Statsura; GATSMiZ]. 2000, Iss. 6, P. 391–393. (In Russ.).

7. Sakhanskiy S. P. [Estimation of the accuracy of control based on the “improved contact method” for controlling the germanium germanium growth from a melt by the Czochralski method]. *Mat. 4 Vseros. nauchn. konf. “Reshetnevskie chteniya” (11–14 noyabrya 2002 g, Krasnoyarsk)* [Math. 4 Vseros. scientific. Conf “Reshetnev’s readings” (November 11–14, 2002, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk, 2002, p. 68–71 (In Russ.).

8. Sakhanskiy S. P. [Features of designing melt level position sensors for germanium] *Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruksii, ekonomika. Sb. nauchn. tr., pod obshch. red. V. V. Statsury; GATsMiZ* [Perspective materials, technologies, constructions, economy. Coll. scientific. Ed. V. V. Statsura, GATSMiZ. 2005, Iss. 11, P. 169–170.
9. Sakhanskiy S. P. [The combination of a control system for growing germanium single crystals on the basis of a contact method for measuring the diameter and simultaneous drawing of a single crystal from a spinneret by the Stepanov method]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 6, P. 246–247 (In Russ.).
10. Sakhanskiy S. P. [Basic mathematical relationships of the contact method for controlling the growth of single crystals by the Czochralski method]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 7, P. 85–88 (In Russ.).
11. Sakhanskiy S. P. [Determination of the correction value of the control signal by diameter, from the change in the height of the column of the meniscus of the crystal, with the contact method for controlling the growth of single crystals by the Czochralski method]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 7, P. 89–90 (In Russ.).
12. Sakhanskiy S. P. [Determination of the magnitude of the melt fluctuation and sensitivity with a contact method for controlling the growth of single crystals by the Czochralski method]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 1 (8), P. 103–104 (In Russ.).
13. Sakhanskiy S. P. [The error in the contact method for measuring the current area of the grown germanium single crystal]. *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*. 2009, No. 2, P. 43–46 (In Russ.).
14. Sakhanskiy S. P. [Measurement of the area of a single crystal in the system for automatic control of germanium germination.]. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie*. 2008, No. 8, P. 44–48 (In Russ.).
15. Sakhanskiy S. P. [Plant for growing germanium single crystals on the basis of the contact method of measurement]. *Bulletin of the Samara State University. acad. S. P. Korolev*. 2008, Iss. 2, P. 100–105 (In Russ.).
16. Sakhanskiy S. P. [Measurement and control of the crystal area on a germanium stretch unit]. *Vestnik SibGAU*. 2008, Vol. 1, No. 18, P. 148–150 (In Russ.).
17. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya: monografiya* [Management process of growing single crystals of germanium: monograph]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2008, 104 p.
18. Sakhanskiy S. P. [Measurement of the area of crystals grown from a liquid melt by the Czochralski method, based on the control of the conditions for closing the contact melt level sensor]. *J/Sib. Fed. Univ. Eng., Technol.* 2015, Vol. 7, No. 8, P. 835–850.