

ОЦЕНКА ПАРАЛЛАКСА ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕНИСКА ВЫРАЩИВАЕМОГО КРИСТАЛЛА

© 2008 г. С. В. Михляев, канд. техн. наук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

E-mail: mikhlyaev@iae.nsk.su

Предложен подход, позволяющий исследовать параллакс изображения мениска кристалла, выращиваемого из расплава методом вытягивания, и оценить его влияние на метрологические характеристики оптических систем контроля геометрии кристалла.

Коды OCIS: 150.3040, 110.0110, 110.2960.

Поступила в редакцию 13.03.2007.

1. Введение

Оперативное измерение диаметра кристалла является одной из важнейших составляющих технологического процесса выращивания кристаллов методом Чохральского [1, 2]. Для контроля геометрии кристаллов большого диаметра в основном применяются оптические методы, в том числе основанные на цифровой обработке изображений зоны кристаллообразования (зоны мениска кристалла), формируемых оптической проекционной системой [3–8]. Несмотря на то что характеристики изображения мениска непосредственно и существенно влияют на метрологические параметры систем контроля и автоматического регулирования, в литературе, посвященной системам контроля, практически отсутствуют данные об исследованиях особенностей изображения мениска кристалла и зависимостей его характеристик от стадий роста кристалла и параметров технологического процесса. Отдельные сведения, представленные в основном в патентной литературе, носят описательный характер и не могут быть использованы в практических приложениях.

В работе предлагается подход, позволяющий исследовать и оценить параллакс изображения зоны кристаллообразования при методе Чохральского, выявить источники погрешностей измерений оптических систем контроля геометрии кристалла, установить и объяснить зависимости характеристик изображения мениска и метрологических характеристик систем контроля от технологических параметров, оценить уровень систематических составляющих погрешностей измерений, обусловленных параллаксом изображения мениска. Представленные результаты частично рассматривались ранее при анализе алгоритмов цифровой обработки изображения мениска и измерения диаметра кристалла [8].

2. Анализ параллакса изображения мениска

Изображение зоны кристаллообразования, формируемое видеосистемой измерения диаметра кристалла, образуется в результате отражения мениском и телом кристалла излучения нагревателя, а также за счет собственного излучения мениска и кристалла. Общая схема системы формирования изображения мениска кристалла представлена на рис. 1а в цилиндрической системе координат zOr . В дальнейшем рассматривается вариант формирования лишь одного сечения ($y = 0$) изображения трехмерной сцены. Измерение диаметра кристалла осуществляется по соответствующему этому сечению видеосигналу [4]. Предполагается также, что используется оптическая система с малой (точечной) апертурой, а размером нагревателя (тигля), выступающим над поверхностью расплава ($z = 0$), можно пренебречь.

Форма мениска кристалла $z = z(r)$ описывается капиллярным уравнением Лапласа [2]

$$\tilde{z}''\tilde{r} + \tilde{z}'(1 + \tilde{z}'^2) \pm 2(q - \tilde{z})(1 + \tilde{z}'^2)^{3/2}\tilde{r} = 0, \quad (1)$$

где $\tilde{z} = z/a$, $\tilde{r} = r/a$, $a = \sqrt{2\gamma/\rho g}$, $q = pa/2\gamma$, ρ – плотность расплава, γ – поверхностное натяжение, g – ускорение силы тяжести, p – давление при $z = 0$, $\tilde{z}'$ и $\tilde{z}''$ – первая и вторая производные функции $\tilde{z}(\tilde{r})$.

В общем виде уравнение (1) не имеет аналитического решения, поэтому в качестве профильных кривых мениска $z = z(r)$ (или $r = r(z)$) можно использовать лишь приближенные аналитические решения или табличные значения. Одно из приближенных решений уравнения Лапласа при граничных условиях $z' = 0$ при $z = 0$ и $z = z_0$ при $r = R$ описывается выражением [2]

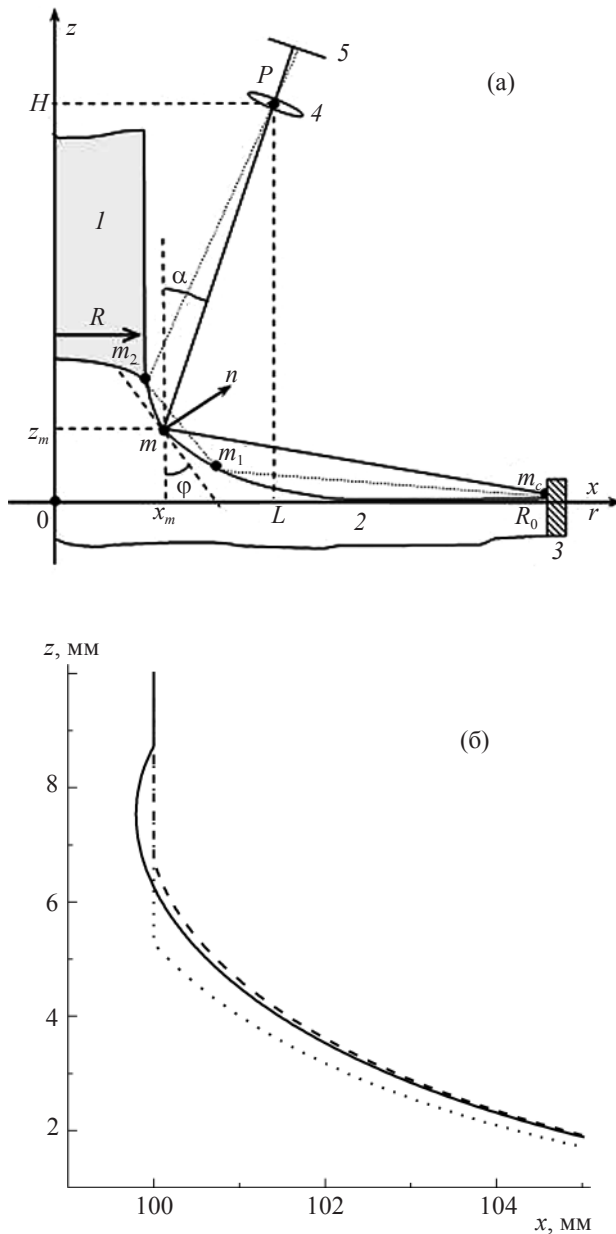


Рис. 1. а – схема формирования изображения мениска. 1 – кристалл, 2 – расплав, 3 – тигель, 4 – оптическая система, 5 – плоскость изображения; б – профильные функции мениска для кристалла кремния $R = 100$ мм. $\beta = 110^\circ$ (1), 79° (2), 60° (3).

$$r = R + \left(\sqrt{4k - z_0^2} - \sqrt{4k - z^2} \right) + \sqrt{k} \ln \left(z_0 \left(2\sqrt{k} + \sqrt{4k - z^2} \right) / z \left(2\sqrt{k} + \sqrt{4k - z_0^2} \right) \right), \quad (2)$$

где R – радиус кристалла, $k = \gamma R z_0 / (\rho g R z_0 + \gamma \sin \beta)$, а β – угол между горизонтальной линией и касательной к поверхности мениска в точке его соприкосновения с кристаллом (угол роста кристалла). Заметим, что в процессе выращивания кристалла угол роста не остается постоянным: он увеличивается

при подрезке кристалла, сопровождающейся уменьшением его диаметра, и уменьшается при разращивании кристалла, приводящем к увеличению диаметра кристалла.

При расчетах для определения высоты мениска z_0 можно воспользоваться результатами, приведенными, например, в работах [9, 10],

$$z_0 = \left(2\gamma(1 - \cos \beta) / \rho g + (\gamma \sin \beta / 2R\rho g)^2 \right)^{1/2} - \gamma \sin \beta / 2R\rho g. \quad (3)$$

На рис. 1б показаны профильные функции мениска, рассчитанные в соответствии с (2), (3) для кристалла кремния ($\gamma = 0,72$ Н/м, $\rho = 2,51$ г/см³) при $R = 100$ мм и различных значениях угла роста кристалла β , соответствующих выращиванию кристалла постоянного диаметра ($\beta = 79^\circ$), разращиванию кристалла ($\beta = 60^\circ$) и его подрезке ($\beta = 110^\circ$). Видно, что вариации β существенно влияют на форму и высоту мениска и вызывают изменения условий формирования его изображения.

Наличие различных факторов, влияющих на характеристики изображения мениска, приводит к появлению погрешностей измерений и вызывает необходимость использования поправок на вычисляемый диаметр кристалла. Поправки определяются обычно по результатам обмеров выращенных кристаллов и не учитывают возможные изменения условий формирования изображения мениска и выращивания кристалла.

В значительной степени появление погрешностей измерений обусловлено параллаксом изображения мениска, который определяется трехмерной природой сцены, формирующей его изображение, и проявляется, в частности, при изменении угла роста кристалла, вариациях его диаметра, смещениях оси кристалла и т. п.

Рассмотрим схему, позволяющую исследовать параллакс изображения мениска. Как следует из рис. 1а, условие, при котором излучение от точки m_c нагревателя (тигля радиусом R_0) после отражения от мениска в точке $m(x_m, z_m)$ проходит через центр проекции P оптической системы и формирует соответствующую точку изображения зоны кристаллообразования, записывается в виде

$$x_m + z_m \operatorname{tg}(2\varphi + \alpha) = R_0, \quad (4)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = (L - x_m) / (H - z_m), \quad \operatorname{tg} \varphi = r'_z, \quad (5)$$

а r'_z – производная профильной функции (2) по z .

Условия (4), (5) определяют зависимости координат точки отражения, а значит, и соответствующей ей точки изображения от различных техно-

логических и геометрических параметров, используемых в выражениях (2)–(5) и приведенных на рис. 1а. Вариации этих параметров вызывают изменения положения точки отражения и приводят к погрешностям измерений. Заметим, что в изображении присутствуют также точки, соответствующие многократным отражениям излучения от мениска (например, в точках m_1 и m_2 на рис. 1а). Эти точки расположены во внутренней части изображения мениска (на продолжении луча m_2P на рис. 1а), внешняя часть которого, непосредственно граничащая с изображением расплава, определяется изображениями точек однократного отражения. В дальнейшем ограничимся рассмотрением лишь внешней части изображения мениска (точек однократного отражения), поскольку внутренняя его часть наиболее подвержена неконтролируемым искажениям из-за переотражений излучения от поверхности кристалла [5, 7]. Исключим из рассмотрения также фоновую составляющую изображения, вызванную собственным излучением расплава и кристалла.

Получим выражения для оценки погрешностей измерений, связанных с параллаксом изображения мениска и обусловленных изменениями радиуса кристалла и возможными смещениями оси кристалла от центра тигля.

Изменение радиуса кристалла приводит к смещению точки отражения $m(x_m, z_m)$, причем не только за счет изменения формы мениска, но и за счет изменения положения точки отражения (угол α). Погрешность определения радиуса кристалла, согласно (4) и рис. 1а, дается выражением $\Delta R = x_m - R$.

Смещение оси кристалла по координате x на величину Δ также вызывает изменение положения точки отражения $m(x_\Delta, z_\Delta)$ и, соответственно, изменение угла α , что приводит к появлению погрешности измерений $\Delta R_x = x_m - x_\Delta$, где расстояние точки отражения от оси кристалла x_Δ находится из условий

$$\Delta + x_\Delta + z_\Delta \operatorname{tg}(2\varphi + \alpha_\Delta) = R_0, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_\Delta = (L - x_\Delta - \Delta)/(H - z_\Delta), \quad (7)$$

а x_m определяется выражениями (4), (5).

Необходимо отметить, что измеряемые координаты $\tilde{x}_m$ точек отражения отличаются от истинных значений x_m , поскольку они являются проекциями соответствующих им точек изображения мениска на некоторую плоскость измерения $z = z_1$. Измеряемые значения зависят от выбора плоскости измерения, положение которой задается при калибровке системы измерения и контролируется в процессе роста кристалла. Погрешность измерения радиуса кристалла в зависимости от положения плоскости измерения определяется выражением

$$\Delta R = \tilde{x}_m - R = x_m - R - (z_m - z_1)\operatorname{tg}\alpha, \quad (8)$$

где $\operatorname{tg}\alpha = (L - x_m - \Delta)/(H - z_m)$.

Выражения (4)–(8) учитывают изменение координат лишь одной точки отражения мениска и могут служить только для оценки погрешностей измерения диаметра кристалла в одном сечении. В общем случае, для более точного определения погрешностей измерений, обусловленных параллаксом изображения мениска, необходимо учитывать совокупность всех точек анализируемой трехмерной поверхности и их общий вклад в формируемое изображение. Кроме того, при оценке метрологических характеристик систем контроля диаметра кристалла следует принимать во внимание используемые алгоритмы обработки изображений и вычисления требуемых параметров [6–8].

3. Результаты расчетов

Численные расчеты, соответствующие выражениям (2)–(8), проводились для кристалла кремния при параметрах ростовой установки $H = 700$ мм, $R_0 = 300$ мм.

Результаты расчетов координат точки отражения, согласно выражениям (4)–(7), для различных радиусов кристалла и различных смещений оси кристалла приведены на рис. 2. Как следует из этого рисунка, положение точки отражения существенно зависит от радиуса кристалла, смещения его оси и геометрии ростовой установки.

На рис. 3 приведены зависимости высоты мениска и координат точки отражения от угла роста кристалла β , рассчитанные в соответствии с выражениями (2)–(5). Из рисунка следует, что для больших значений радиуса кристалла z -координата точки отражения слабо зависит от угла роста и радиуса кристалла, несмотря на то что при изменении β высота мениска z_0 меняется значительно. Расстояние точки отражения от тела кристалла по координате x при этом существенно зависит от изменения β .

Результаты расчетов погрешностей измерений (8) для различных положений плоскости измерения z_1 представлены на рис. 4а, 4б.

На рис. 4а приведены зависимости погрешности измерений ΔR от радиуса кристалла. Видно, что погрешность измерения существенно зависит от R . Эта зависимость при $R > 20$ мм уменьшается с приближением положения плоскости измерения к координате $z = z_1 = 6,5$ мм, примерно равной высоте мениска z_0 при стационарном росте кристалла постоянного диаметра, в соответствии с рис. 1, и 3. Для кристаллов с малыми радиусами зависимость ΔR от R остается существенно нелинейной.

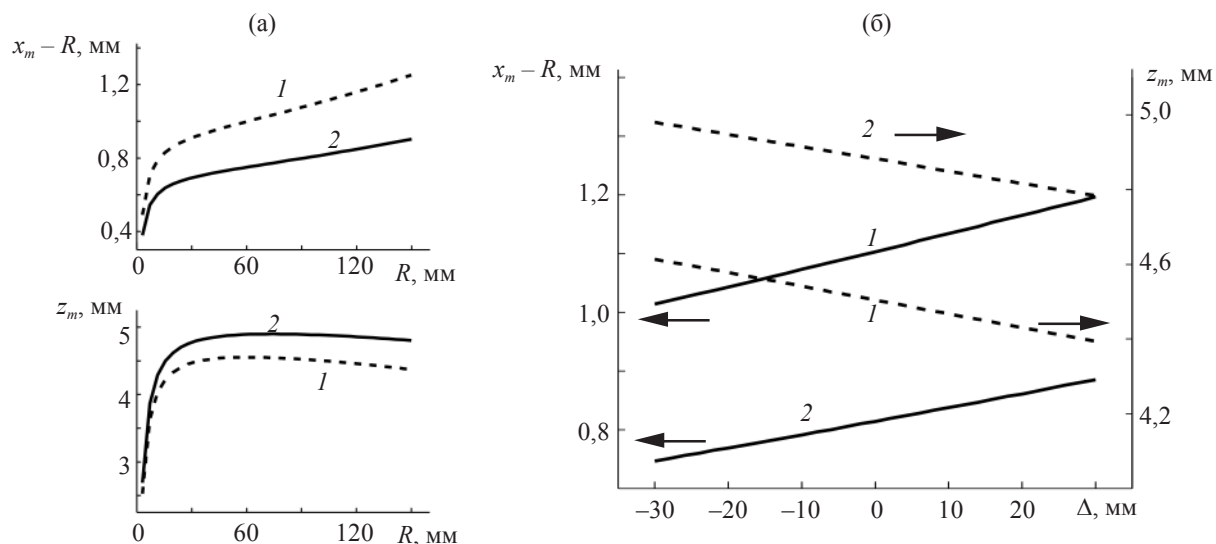


Рис. 2. Координаты точки отражения в зависимости от радиуса кристалла R (а) и смещения его оси Δ (б) при $\beta = 79^\circ$. 1 – $\alpha = 16^\circ$, 2 – $\alpha = 23^\circ$.

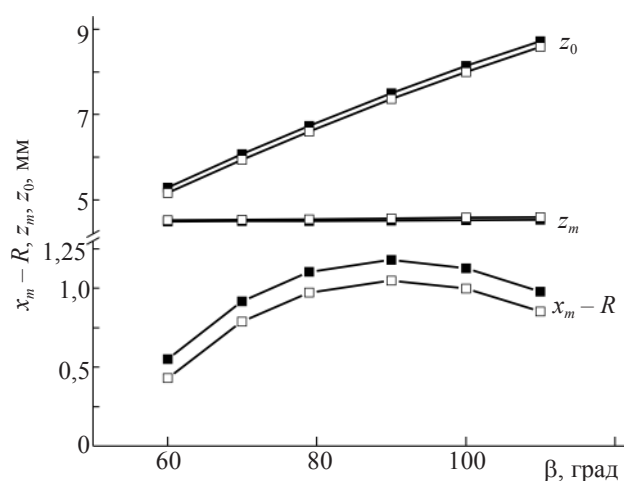


Рис. 3. Зависимости высоты мениска z_0 и координат точки отражения x_m, z_m от угла роста кристалла β для радиусов кристалла $\square$ – 50 и $\blacksquare$ – 100 мм.

Как следует из рис. 4б, при $z_1 = 6,5$ мм также заметно уменьшается зависимость погрешности измерений ΔR от возможного смещения Δ оси кристалла в процессе измерения.

На рис. 5 приведены зависимости ΔR от радиуса кристалла при различных значениях угла роста β . При том же значении $z_1 = 6,5$ мм погрешность измерений существенно и нелинейно зависит от β , что соответствует данным рис. 3, а зависимость ее от R при $R > 20$ мм и различных значениях β остается слабой.

Расчеты показывают, что оптимальное положение плоскости измерения зависит также от геометрии схемы измерения.

Из представленных на рис. 4 результатов следует, что погрешность измерений существенным образом зависит от положения плоскости измере-

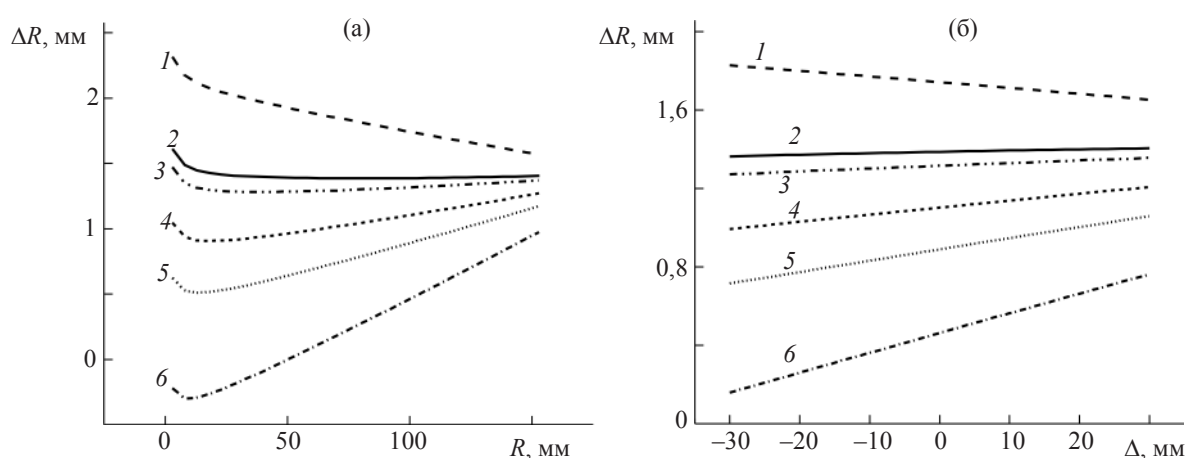


Рис. 4. Зависимости погрешности измерений ΔR от радиуса кристалла R (а) и смещения его оси Δ (б) для различных положений плоскости измерения z_1 . 1 – $z_1 = 9$, 2 – 6,5, 3 – 6, 4 – 4,5, 5 – 3, 6 – 0 мм. $R = 100$ мм.

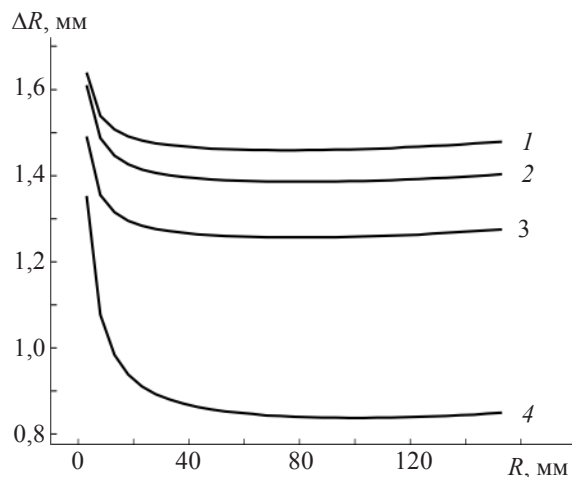


Рис. 5. Зависимости погрешности измерений ΔR от радиуса кристалла R для различных значений угла роста β при $z_1 = 6,5$ мм. 1 – $\beta = 90^\circ$, 2 – 79° , 3 – 110° , 4 – 60° .

ний. При правильном ее выборе зависимости погрешностей измерений от радиуса кристалла и вариаций положения его оси могут быть существенно ослаблены.

4. Заключение

При использовании оптических методов контроля геометрии кристалла, выращиваемого из расплава методом вытягивания, необходимо учитывать возможные составляющие погрешностей измерений, вызываемые параллаксом изображения мениска.

Предложенный в работе подход позволяет исследовать параллакс изображения мениска выращиваемого кристалла и оценить его влияние на метрологические характеристики оптических систем контроля диаметра кристалла.

Параллакс обусловлен вариациями геометрических параметров трехмерной поверхности, формирующей изображение зоны кристаллообразования, и приводит к искажениям анализируемого изображения. Искажения изображения и вызываемые ими погрешности измерений возникают при любых изменениях формы мениска кристалла, которая существенно зависит от параметров технологического процесса. Источниками погрешностей измерений могут быть также вариации положения кристалла и уровня расплава в тигле, изменения геометрии ростовой установки.

Для компенсации погрешностей измерений, связанных с параллаксом изображения мениска, необходимо использовать соответствующие поправки, которые зависят от стадии роста кристалла, его размеров, параметров технологического процесса, гео-

метрии схемы измерения. Снижение зависимостей погрешностей измерений от вариаций радиуса кристалла и смещений его оси в процессе выращивания обеспечивается также при надлежащем выборе положения плоскости измерения, что в значительной степени определяется метрологическими характеристиками используемой системы контроля уровня расплава.

Для более точной оценки погрешностей измерений, обусловленных параллаксом изображения мениска, необходимо учитывать совокупность всех точек анализируемой трехмерной сцены и их общий вклад в формируемое изображение. При оценке метрологических характеристик систем контроля геометрии кристалла следует также принимать во внимание используемые алгоритмы обработки изображений и вычисления требуемых параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lawson W.D., Nielsen S. Preparation of single crystals. London: Butterworths Scientific Publications, 1958. 255 p.
2. Шауков Ю.М. Выращивание монокристаллов методом вытягивания. М.: Металлургия, 1982. 310 с.
3. Kasparian V., Batur C., Duval W.M.B., Rosenthal B.N., Singh N.B. Application of stereo imaging for recognition of crystal surface shapes // Journal of Crystal Growth. 1994. V. 141. P. 455–464.
4. Mikhlyayev S.V., Nezhevenko E.S. A computer vision system to control the process of crystal growth // Pattern Recognition and Image Analysis, IAPC "Nauka/Interperiodica". Russia. 1999. V. 9. № 1. P. 156–158.
5. Mikhlyayev S.V., Nezhevenko E.S. Metrological problems of melting level and crystal geometry measurement during crystal growing // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. Seventh Int. Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. P. 572–578.
6. Mikhlyayev S.V. Method for measuring the diameter of a growing crystal // Proc. of 7th Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. St.Petersburg. 2004. V. 3. P. 799–802.
7. Kozik V.I., Nejevenko E.S. Monitoring of monocrystal diameter in growing vessel // Proc. of the Second IASTED Int. Conf. Automation, Control and Information Technology, June 20–24, Novosibirsk, Russia. 2005. P. 59–62.
8. Mikhlyayev S.V. Measuring the diameter of a growing crystal // Proc. of the Second IASTED Int. Conf. Automation, Control and Information Technology, June 20–24, Novosibirsk, Russia. 2005. P. 53–58.
9. Щелкин Ю.Ф. Определение формы жидкого столбика при выращивании монокристаллов методом Чохральского из расплава со свободной поверхностью // Физика и химия обработки материалов. 1971. № 3. С. 29–33.
10. Bardsley W., Frank F.C., Green G.W., Hurle D.T.J. The meniscus in Czochralski growth // Journal of Crystal Growth. 1974. V. 23. P. 341–344.