

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 535.31 : 53.082.5

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗОНЫ КРИСТАЛЛООБРАЗОВАНИЯ  
В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО**

**С. В. Михляев, О. И. Потатуркин**

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: mikhlyaev@iae.nsk.su*

Приведены данные компьютерного моделирования изображения мениска кристалла, выращиваемого из высокотемпературного расплава методом Чохральского. Исследуются тонкая структура изображения зоны кристаллообразования, формируемого оптической проекционной системой, и различные его составляющие, обусловленные собственным излучением нагревателя, расплава и кристалла, а также отражениями излучения от поверхностей расплава и кристалла. Анализируются причины возникновения параллакса изображения мениска, приводятся оценки его влияния на метрологические характеристики оптической системы контроля геометрии кристалла.

**Введение.** Для автоматического выращивания кристаллов из высокотемпературного расплава методом Чохральского [1] необходим постоянный мониторинг процесса выращивания, в ходе которого контролируется множество различных параметров: температура расплава и нагревателя, уровень расплава, диаметр кристалла и т. д. В современных комплексах, управляющих работой ростовых установок [2, 3], измерение температуры осуществляется пирометрами, для измерения уровня расплава используются, как правило, лазерные триангуляционные сенсоры, а для контроля диаметра выращиваемого кристалла – телевизионные или цифровые видеокамеры с оптическими проекционными системами [4–11]. Важно, что в силу конструктивных особенностей ростовых установок и специфических условий выращивания кристаллов традиционные оптические методы измерения размеров отражающих объектов, использующие специальным образом сформированное освещение, в данной задаче неприменимы [12]. Широко распространенным явля-

ется также весовой метод контроля диаметра кристалла, основанный на взвешивании кристалла или тигля с расплавом [13]. Однако из-за наличия погрешностей измерений, наиболее сильно проявляющихся в переходных режимах выращивания, этот метод применяется в основном при выращивании кристаллов с небольшими диаметрами и массой.

Метрологические проблемы при создании прецизионных измерительных устройств и систем технического зрения, предназначенных для контроля процесса выращивания кристаллов, в значительной степени обусловлены недостаточной физической обоснованностью и изученностью используемых оптических методов дистанционной диагностики высокотемпературного процесса кристаллизации, отсутствием необходимых знаний о закономерностях и особенностях формирования оптических сигналов зондирования сложной динамической системы «кристалл–расплав» и о зависимости информативных характеристик обрабатываемых сигналов от вариаций параметров технологического процесса выращивания кристаллов.

В многочисленных публикациях, ориентированных на решение широкого круга физико-технических и технологических проблем выращивания кристаллов методом вытягивания из высокотемпературных расплавов, рассматриваются в основном различные аспекты тепломассопереноса [14]. Вопросы изучения характеристик процесса выращивания, используемых в оптических методах контроля геометрии кристалла, при этом не затрагиваются. Несмотря на то что характеристики изображения мениска кристалла непосредственно и существенно влияют на метрологические параметры систем контроля и автоматического регулирования, в литературе ([1, 4, 5, 7, 9, 10]), посвященной системам контроля, 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 [15] отмечена необходимость исследования изображения мениска кристалла и предложен подход, позволяющий оценить параллакс в одном сечении изображения, формируемого оптической системой с малой апертурой.

В данной работе эти ограничения снимаются и путем компьютерного моделирования детально анализируется изображение мениска выращиваемого кристалла; исследуется параллакс изображения, вызываемый вариациями параметров формирующей изображение трехмерной (3D) сцены; анализируются информационные характеристики изображения, используемые в оптической системе контроля геометрии кристалла; оценивается влияние параллакса на метрологические характеристики системы контроля. При моделировании для задания профильной функции мениска используется приближенное решение капиллярного уравнения Лапласа, анализируются монохроматические изображения, формируемые идеальной оптической проекционной системой с учетом переотражений излучения нагревателя, расплава и кристалла от поверхностей расплава и кристалла.

**Описание моделируемой 3D-сцены.** 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.

Форма мениска кристалла  $z = z(r)$  в полярной системе координат, ось  $z$  которой направлена по оси кристалла, а начало координат совпадает с поверхностью расплава, описывается капиллярным уравнением Лапласа [1]

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

где  $\tilde{z} = z/a$ ,  $\tilde{r} = r/a$ ,  $a = \sqrt{2\gamma/\rho g}$ ,  $q = pa/2\gamma$ ,  $\rho$  – плотность расплава,  $\gamma$  – поверхностное натяжение,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $p$  – давление при  $z = 0$ .

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 для граничных условий  $z' = 0$  при  $z = 0$  и  $z = z_0$  при  $r = R$  представляется выражением [1]

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

где  $R$  – радиус кристалла,  $k = \gamma Rz_0 / (\rho g Rz_0 + \gamma \sin \beta)$ ,  $\beta$  – 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 разрастании кристалла, приводящем к увеличению диаметра кристалла.

Для определения высоты мениска  $z_0$  можно воспользоваться результатами, приведенными, например, в работе [16]:

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

Конфигурация моделируемой 3D-сцены показана на рис. 1. Она включает тигель с расплавом, кристалл, тепловой экран и оптическую проекционную систему, ось которой наклонена к оси кристалла под углом  $\alpha$ , а центр проекции объектива с апертурой  $D$  расположен в точке  $(L, 0, H)$  глобальной системы координат  $xyz$ . Расстояния  $d_1$  и  $d_2$  удовлетворяют условию оптического сопряжения:  $1/d_1 + 1/d_2 = 1/F$ , где  $F$  – фокусное расстояние объектива, поэтому любая точка  $m_2$  плоскости изображения  $z_2 = 0$  сопряжена с соответствующей точкой  $m_1$  плоскости  $z_1 = 0$ . Уровень расплава задается параметром  $h$ , радиусы кристалла, экрана и тигля – параметрами  $R$ ,  $R_s$  и  $R_c$  соответственно, высота стенки тигля –  $h_c$ , высота экрана над плоскостью  $z = 0$  –  $h_s$ . Смещение оси кристалла относительно центра глобальной системы координат определяется параметрами  $dx$ ,  $dy$ . Кроме того, задаются параметры, зависящие от физической природы кристалла (плотности, поверхностного натяжения и т. д.) и влияющие на форму мениска, а также температура и законы распределения температуры по длине кристалла и высоте свободной стенки тигля.

Для расчета световых распределений применяется метод обратной трассировки лучей [17], при этом интенсивность светового распределения в не-

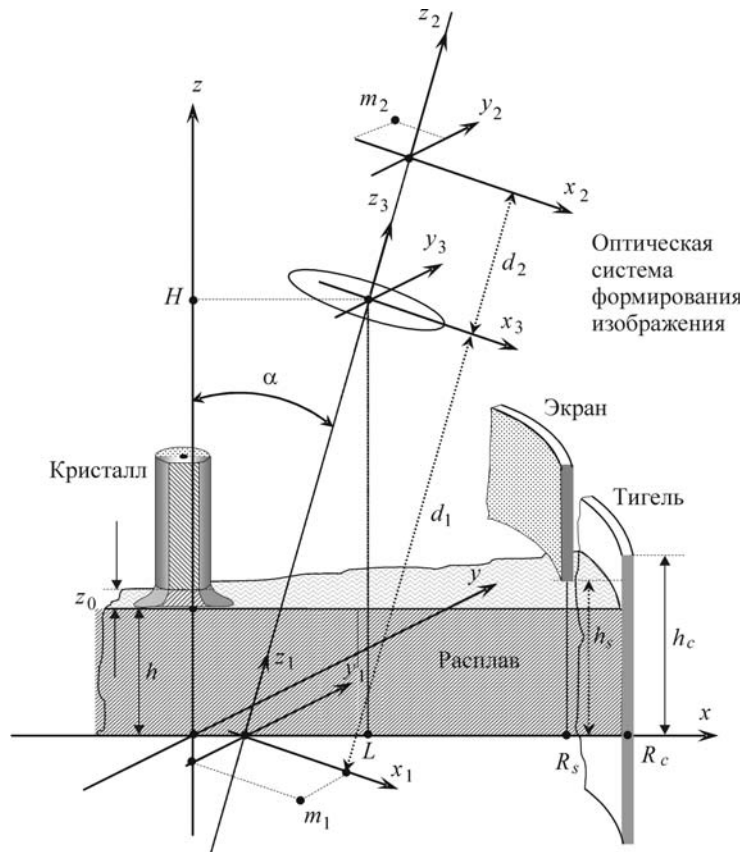


Рис. 1. Схема 3D-сцены для моделирования процесса формирования изображения зоны кристаллообразования

которой точке изображения  $m_2$  или точке пространства объектов в плоскости  $z = z_{\text{plane}}$  определяется совокупностью лучей, проходящих через эту точку и попадающих в апертуру оптической системы. При таком подходе существует взаимно однозначное соответствие между интенсивностями световых распределений в плоскости  $z = z_{\text{plane}}$  и сопряженной с ней плоскости изображения Шеймпфлюга, наклоненной к оптической оси проекционной системы под некоторым углом [18]. Анализируемые лучи равномерно распределены в квадрате  $D \times D$  плоскости апертуры  $z_3 = 0$  диаметром  $D$ , количество лучей по каждой из координат задается параметром  $N_D$ . Траектории лучей при многократных отражениях прослеживаются до попадания отраженного луча в стенку тигля, тепловой экран или до выхода его за пределы моделируемой сцены. Собственное излучение стенок ростовой камеры, как и отраженное от них излучение, в расчет не принимается. Интенсивность луча, попавшего в стенку тигля, определяется собственным излучением тигля, которое в соответствии с законом Планка зависит от распределения температуры по его поверхности. Факторами, влияющими на интенсивность луча, являются: его длина, количество отражений от кристалла и расплава, коэффициенты отражения, углы падения, координаты точки пересечения с тиглем. Аддитивная фоновая составляющая луча формируется при каждом от-

ражении от поверхности расплава и кристалла, зависит от их температуры, углов падения, коэффициентов отражения, координат точек отражения.

**Структура изображения зоны кристаллообразования.** Для исследования структуры изображения мениска и его параллакса разработано специализированное программно-алгоритмическое обеспечение, которое позволяет синтезировать монохроматические изображения зоны кристаллообразования, соответствующие реальным изображениям, получаемым с применением узкополосных спектральных фильтров в системе формирования изоб-

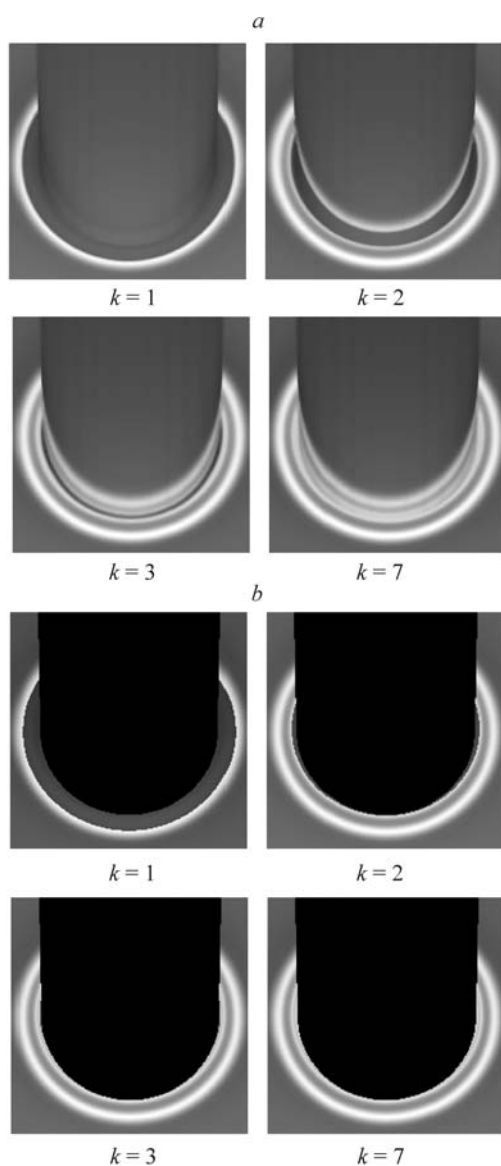


Рис. 2. Составляющие изображения мениска для различного количества отражений  $k$ : от расплава и кристалла (a) и от расплава (b) при  $R = 5$  мм,  $N_D = 21$ ,  $\beta = 79^\circ$

ражений, с заданным разрешением при различных значениях рассмотренных выше геометрических, технологических и физических параметров, а также анализировать полученное изображение, используя различные алгоритмы для выделения контура кристалла и аппроксимации точек границы окружностью. Особенностью программного обеспечения является возможность ограничивать предельное количество отражений анализируемых лучей от поверхности расплава и кристалла, а также исключать фоновую составляющую изображения, обусловленную собственным излучением расплава и кристалла, что, в свою очередь, позволяет провести детальный анализ характеристик формируемого изображения.

На рис. 2 и 3 приведены синтезированные изображения зоны кристаллообразования для кристалла с малым радиусом ( $R = 5$  мм), иллюстрирующие качественные изменения изображений, происходящие при вариациях различных параметров. Небольшое значение радиуса кристалла позволяет визуально оценить анализируемые эффекты, хотя точность аппроксимации профильной функции (2) при малых радиусах снижается.

Серия изображений мениска, полученных при учете различного количества отражений анализируемых лучей от расплава и кристалла и только от расплава, показана на рис. 2, *a, b* соответственно. Из этих рисунков следует, что внутренняя структура изображения мениска определяется многократными отражениями лучей и существенно зависит от физических параметров и геометрических характеристик как мениска, так и выращенной части кристалла. Поскольку геометрические характеристики кристалла могут изменяться в процессе выращивания, это может приводить к неконтролируемым вариациям внутренней структуры изображения, что затрудняет возможность применения ее для контроля и регулирования технологического процесса роста кристалла.

Внешняя граница изображения мениска формируется в основном за счет излучения стенок тигля в результате однократного отражения его от расплава, поэтому она более устойчива к вариациям геометрии выращенной части кристалла и использование ее для контроля диаметра кристалла более предпочтительно. Составляющая изображения, обусловленная собственным излучением расплава, в точке отражения менее существенна. Расчеты показывают, что вариации оптических характеристик расплава и кристалла также влияют в основном на внутреннюю структуру изображения мениска. Поэтому полученные при моделировании количественные результаты (представ-

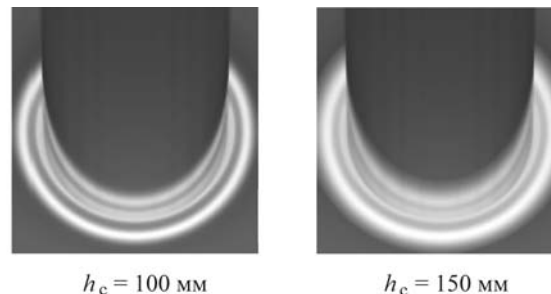


Рис. 3. Изображения мениска кристалла при различной высоте стенки тигля ( $h = 0$ ,  $R = 5$  мм,  $N_D = 21$ ,  $\beta = 79^\circ$ )

лены далее) основаны на анализе лишь внешней части изображения мениска, что вызвано отсутствием исчерпывающих данных об отражающих и излучающих свойствах расплава кремния [19].

Характер светового распределения во внешней границе изображения мениска зависит от излучения стенок тигля, т. е. определяется распределением температуры по высоте тигля с учетом зеркального отражения излучения от поверхности расплава. В частности, с увеличением длины выращенной части кристалла происходит выработка расплава в тигле, при этом система стабилизации уровня расплава поднимает тигель вверх, что приводит к увеличению высоты стенок тигля над поверхностью расплава. Изменение излучающей поверхности стенок тигля вызывает уширение переднего фронта и общей ширины изображения мениска (см. рис. 3). Отмеченный эффект наблюдается на практике и объясняет необходимость коррекции показаний системы измерения диаметра кристалла при увеличении длины кристалла.

Следует отметить, что искажения изображения мениска, в том числе и его внешней части, могут происходить при значительных вариациях радиуса в пределах уже выращенной части кристалла. В частности, это может иметь место при чередовании стадий подрезки и разращивания кристалла, приводящих к волнообразному изменению его диаметра, или при выращивании обратного конуса, когда отраженное от мениска излучение виньетируется телом кристалла.

Синтезированные монохроматические изображения кристалла для больших значений радиусов в сравнении с реальными полихроматическими изображениями представлены на рис. 4 и 5. Различия изображений объясня-

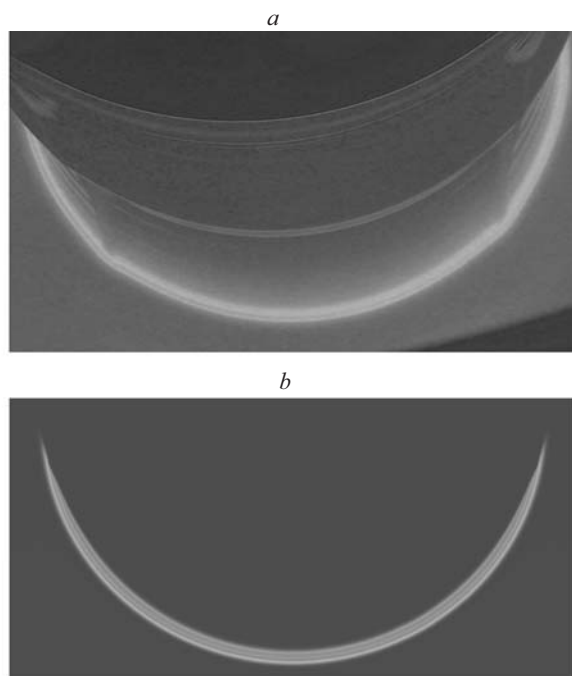


Рис. 4. Изображение цилиндрической части кристалла постоянного диаметра при  $R \sim 80$  мм: реальное (a) и синтезированное (b)



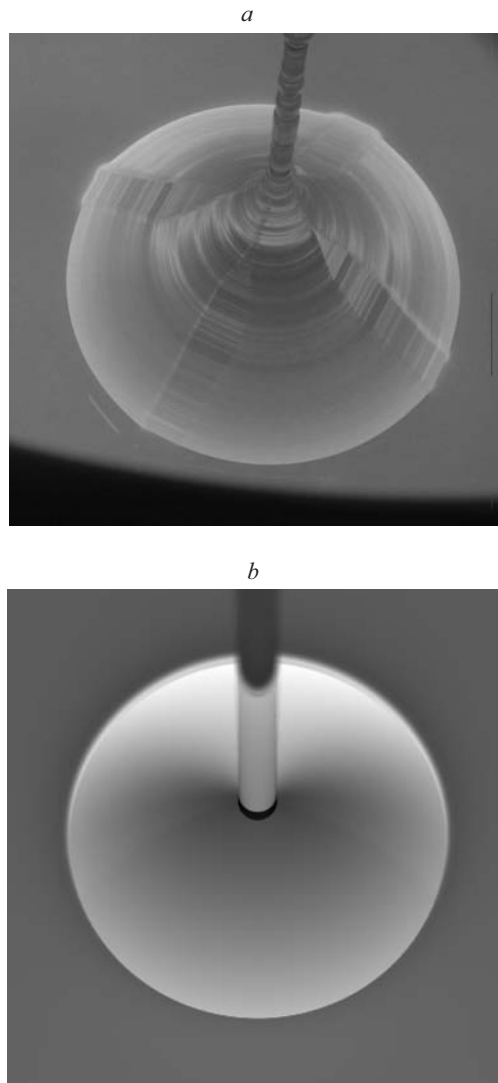


Рис. 5. Изображения конусной части кристалла ( $R \sim 20$ мм): реальное (а) и синтезированное (б)

ются главным образом погрешностями аппроксимации профильной функции мениска выражением (2); разным спектральным составом излучения, формирующего изображения; отсутствием в синтезированных изображениях фоновой составляющей, связанной с излучением стенок ростовой камеры. Причинами сглаживания внутренней структуры реальных изображений мениска являются полихроматичность излучения и нестационарность отражающей поверхности расплава. Вклад в различия изображений вносит также погрешность определения ракурса съемки, обусловленная техническими причинами.

**Параллакс изображения мениска** проявляется при любых изменениях 3D-структуры анализируемой сцены. В дополнение к приведенным в работе [15] оценкам параллакса для одного сечения изображения, полученным в



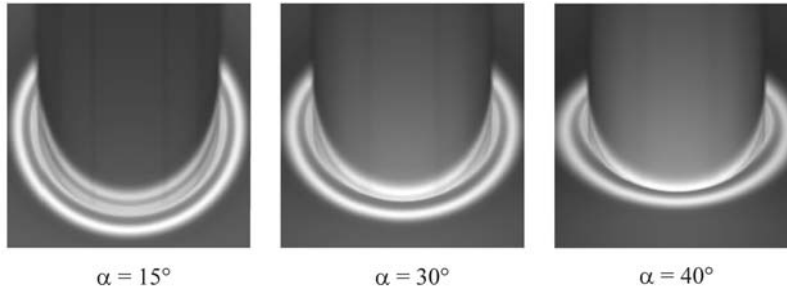


Рис. 6. Изображения мениска при различных ракурсах съемки  $\alpha$

предположении малых размеров апертуры оптической системы и малой высоты стенки тигля, рассмотрим влияние параллакса на характеристики изображения мениска в общем случае, без использования введенных ранее ограничений.

Для иллюстрации одного из проявлений параллакса на рис. 6 приведены синтезированные изображения мениска кристалла с малым радиусом ( $R = 5$  мм,  $\beta = 79^\circ$ ) при вариациях ракурса съемки, соответствующие различным положениям оптической системы (регистрирующей камеры) относительно анализируемой 3D-сцены. Очевидно, что изменения в изображениях будут приводить к существенно различающимся результатам при использовании таких изображений для измерения, например, геометрических характеристик мениска или диаметра кристалла. Поэтому уровень систематических погрешностей измерений оказывается специфическим для конкретной ростовой установки и в значительной степени определяется геометрией ростовой камеры, теплового узла и ракурсом съемки.

Искажения изображения мениска, обусловленные вариациями технологических параметров в процессе выращивания кристалла, вызывающими изменения геометрии рассматриваемой 3D-сцены, могут быть менее значительными и не восприниматься визуально. Тем не менее такие искажения могут приводить к заметным погрешностям при измерении диаметра кристалла. Для оценки уровня возникающих систематических погрешностей измерений использовались синтезированные изображения мениска. Алгоритм обработки изображений для определения параметров мениска и диаметра кристалла включал в себя вычисление субпиксельных координат внешней границы (контура) изображения мениска, компенсацию перспективных искажений и аппроксимацию полученных точек окружностью. Для выделения границы в изображении мениска могут быть использованы различные алгоритмы цифровой обработки, отличающиеся как точностью, так и вычислительными затратами [20]. В данной работе координаты границы определялись по положению точки перегиба в радиальном распределении интенсивности света во внешней границе изображения мениска с погрешностью порядка 0,001 мм. Для аппроксимации использовалась 101 точка границы при различных угловых размерах аппроксимируемой дуги окружности.

Результаты расчетов, относящиеся к параллаксу изображения, обусловленному смещениями оси кристалла в процессе выращивания, приведены на рис. 7 и 8. Формы аппроксимируемых контуров  $dR = R_{\text{кон}} - R_{\text{кр}} = dR(\varphi)$ , определяемых положениями точек перегиба радиального профиля интенсив-

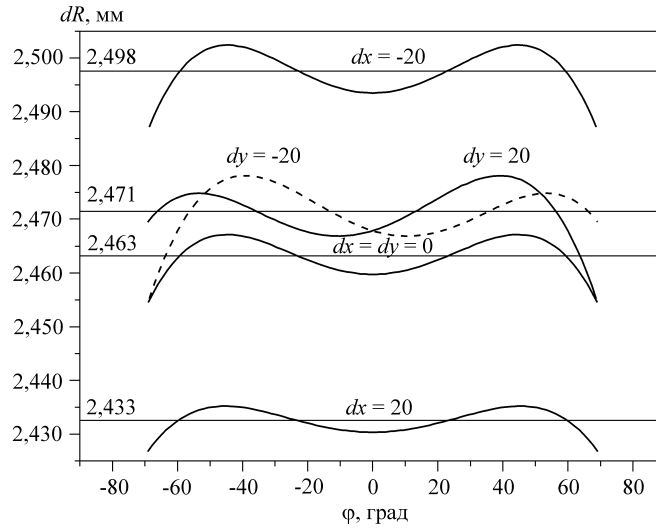


Рис. 7. Координаты аппроксимируемых контуров для различных смещений  $dx$ ,  $dy$  оси кристалла ( $R = 50$  мм,  $\beta = 79^\circ$ )

ности внешнего фронта изображения мениска, показаны на рис. 7 в полярных координатах для различных смещений  $dx$ ,  $dy$  оси кристалла. Сплошные горизонтальные линии для каждого контура соответствуют аппроксимирующим окружностям, а относящиеся к ним численные значения – отклонения их радиуса от радиуса кристалла. Отметим, что сложная форма контура изображения мениска приводит к зависимости определяемого радиуса

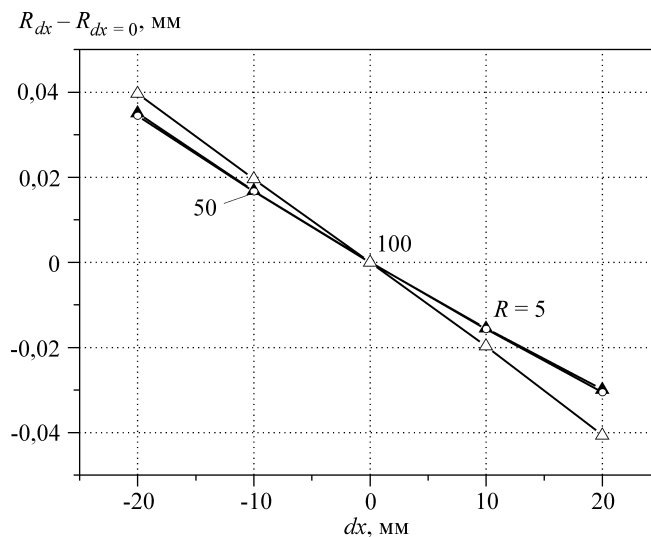


Рис. 8. Погрешности измерения радиуса кристалла  $R$ , обусловленные смещением  $dx$  его оси

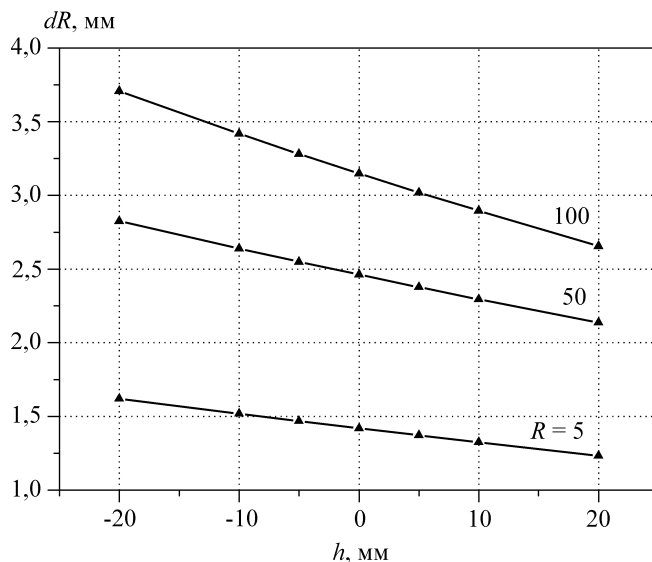


Рис. 9. Погрешности определения радиуса кристалла  $dR$  в зависимости от уровня расплава при  $\beta = 79^\circ$  и  $z\_plane = h$

окружности и положения ее центра от величины центрального угла аппроксимирующей дуги  $d\varphi$ , что необходимо учитывать при проведении прецизионных измерений. Как следует из рис. 8, погрешности определения диаметра кристалла линейно зависят от смещения  $dx$  оси кристалла и могут достигать значительной величины (около  $\pm 0,08$  мм при  $|dx| = 20$  и  $R = 100$  мм для выбранной геометрии схемы измерения). Влияние смещений по координате  $y$  менее существенно. Для компенсации погрешностей необходимо использовать алгоритмы аппроксимации окружности, обеспечивающие получение несмещенной оценки координат ее центра.

Существенное влияние на результаты измерений оказывает параллакс изображения мениска, обусловленный изменением уровня расплава. Как видно из рис. 9, погрешности определения радиуса кристалла  $dR$  возрастают с увеличением радиуса и практически линейно зависят от уровня расплава  $h$ . При изменении уровня расплава в диапазоне  $\pm 20$  мм вариации измеряемого диаметра могут превышать 2 мм при  $R = 100$  мм.

Параллакс проявляется и при изменении радиуса кристалла. Зависимости погрешностей  $dR$  от величины радиуса представлены на рис. 10 для различных значений угла роста кристалла  $\beta$  при центральном угле аппроксимируемой дуги контура мениска  $d\varphi = 140^\circ$ . Погрешности возрастают с увеличением  $R$  и существенно зависят от угла роста кристалла. При изменении  $R$  от 20 до 120 мм систематическая погрешность определения диаметра кристалла может составлять значительную величину – 7 мм. Уменьшение зависимости погрешности измерений от  $R$  достигается при соответствующем выборе положения плоскости измерений  $z\_plane$ . В частности, при  $z\_plane = 10$  мм погрешность, как следует из рис. 10, практически не зависит от радиуса кристалла при  $R > 20$  мм.

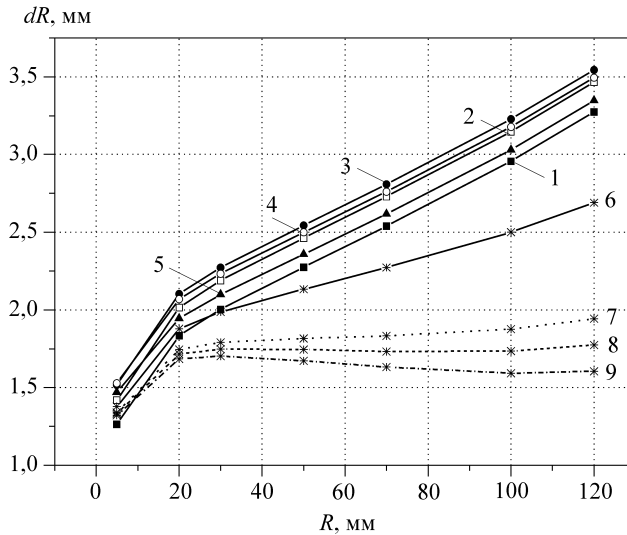


Рис. 10. Погрешности определения радиуса кристалла  $dR$  в зависимости от радиуса  $R$  для различных значений угла роста  $\beta$  и положений плоскости измерения  $z\_plane$  ( $\beta = 70^\circ$  (кривая 1),  $79^\circ$  (2),  $90^\circ$  (3),  $100^\circ$  (4),  $110^\circ$  (5),  $z\_plane = 4,6$  (6), 9 (7), 10 (8), 11 (9))

**Заключение.** В данной работе методами численного моделирования проведено исследование информационных характеристик изображения зоны кристаллообразования, формируемого оптической проекционной системой при выращивании кристаллов из высокотемпературного расплава методом Чохральского.

Установлено, что причиной появления тонкой структуры в изображении мениска являются многократные отражения излучения нагревателя от поверхностей расплава и кристалла. Показано, что изображение внешней части мениска, формируемое в результате однократного отражения излучения от расплава, наиболее устойчиво к вариациям геометрии выращенной части кристалла, поэтому использование его в алгоритмах цифровой обработки более предпочтительно.

Параллакс изображения мениска кристалла возникает при вариациях геометрических параметров трехмерной сцены, формирующей изображение зоны кристаллообразования и проявляется в специфических искажениях анализируемого изображения. Это приводит к погрешностям измерений системы контроля геометрии кристалла, возникающим при любых изменениях формы мениска кристалла, которая существенно зависит от геометрии выращиваемого кристалла и параметров технологического процесса. Источниками погрешностей измерений могут быть также вариации положения оси кристалла и уровня расплава в тигле, изменения геометрии ростовой установки.

Установлено, что из-за параллакса форма границы мениска, определяемая точками перегиба радиального распределения интенсивности во внешней части изображения мениска, отличается от окружности даже при коррекции перспективных искажений изображения, что приводит к зависимости вычисляемого радиуса кристалла от величины центрального угла аппроксимирующей границу дуги.

При выращивании кристаллов большого диаметра (порядка 200 мм) погрешности определения диаметра, обусловленные параллаксом, могут составлять единицы миллиметров. Для их компенсации необходимо использовать поправки, зависящие от стадии роста кристалла, его размеров, параметров технологического процесса, геометрии схемы измерения. Снижение зависимости погрешностей от вариаций радиуса кристалла обеспечивается надлежащим выбором положения плоскости измерения, что в значительной степени определяется метрологическими характеристиками используемой системы контроля уровня расплава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Процессы** роста и выращивание монокристаллов /Под ред. Н. Н. Шефталя. М.: Изд. иностр. лит., 1963.
2. **Mikhlyayev S. V., Nejevenko E. S.** A computer vision system to control the process of crystal growth // *Pattern Recogn. and Image Analys.* 1999. **9**, N 1. P. 156.
3. **Булавский Д. В., Зюбин В. Е., Карлсон Н. Н. и др.** Автоматизированная система управления установкой для выращивания монокристаллов кремния // *Автометрия.* 1996. № 2. С. 26.
4. **Багдасаров Х. С.** Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004.
5. **Gartner K. J., Rittinghaus K. F., Seeger A., Uelhoff W.** An electronic device including a TV-system for controlling the crystal diameter during Czochralski growth // *Journ. Cryst. Growth.* 1972. **13–14**. P. 619.
6. **Kasparian V., Batur C., Duval W. M. B. et al.** Application of stereo imaging for recognition of crystal surface shapes // *Journ. Cryst. Growth.* 1994. **141**, N 3–4. P. 455.
7. **Bachmann K. J., Kirsch H. J., Vetter K. J.** Programmed Czochralski growth of metals // *Journ. Cryst. Growth.* 1970. **7**, N 3. P. 290.
8. **Shiraishi Y., Takano K., Matsubara J. et al.** Growth of silicon crystal with a diameter of 400 mm and weight of 400 kg // *Journ. Cryst. Growth.* 2001. **229**, N 1. P. 17.
9. **O’Kane D. F., Kwap T. W., Gulitz L., Bednowitz A. L.** Infrared TV system of computer controlled Czochralski crystal growth // *Journ. Cryst. Growth.* 1972. **13–14**. P. 624.
10. **Kozik V. I., Nezhevenko E. S.** Monitoring of monocrystal diameter in growing vessel // *Proc. of the IASTED Intern. Conf. “Automation, Control, and Information Technology” (ACIT’2005).* Anaheim – Calgary – Zurich: ACTA Press, 2005. P. 59.
11. **Huang L. Y., Lee P. C., Hsieh C. K. et al.** On the hot-zone design of Czochralski silicon growth for photovoltaic applications // *Journ. Cryst. Growth.* 2004. **261**, N 4. P. 433.
12. **Лемешко Ю. А., Чугуй Ю. В., Яровая А. К.** Прецизионный размерный контроль диаметров круговых отражающих цилиндров // *Автометрия.* 2007. **43**, № 3. С. 112.
13. **Bardsley W., Hurler D. T. J., Joyce G. C.** The weighing method of automatic Czochralski crystal growth. Pt. I. Basic theory // *Journ. Cryst. Growth.* 1977. **40**, N 1. P. 13.
14. **Gevelber M., Wilson D., Duanmu N.** Modelling requirements for development of an advanced Czochralski control system // *Journ. Cryst. Growth.* 2001. **230**, N 1. P. 217.
15. **Михляев С. В.** Оценка параллакса изображения мениска выращиваемого кристалла // *Оптический журнал.* 2008. **75**, № 1. С. 66.

16. **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.
17. **Watt A. H.** 3D Computer Graphics. Massachusetts: Addison-Wesley, 2000.
18. **Rioux M., Bechthold G., Taylor D., Duggan M.** Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision // Opt. Eng. 1987. **26**, N 12. P. 1245.
19. **Lampert M. O., Koebel J. M., Siffert P.** Temperature dependence of the reflectance of solid and liquid silicon // Journ. Appl. Phys. 1981. **52**, N 8. P. 4975.
20. **Прудников А. М., Разин И. В., Эмдин В. С.** Адаптивный анизотропный фильтр для определения элементов пересечения контурным сигналом нулевого уровня // Автоматрия. 2006. **42**, № 1. С. 23.

*Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.*

---