

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.315.592

## ОПТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПЛАВА МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

© 2012 г. С. В. Михляев

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН*

Рассмотрены вопросы оптического мониторинга уровня расплава и диаметра кристалла, выращиваемого из высокотемпературного расплава методом Чохральского. Представлены результаты исследований, выполненных в Институте автоматики и электрометрии СО РАН при разработке системы технического зрения для цифровых комплексов управления автоматическими ростовыми установками. В состав системы входят лазерный триангуляционный сенсор, измеряющий уровень расплава в тигле, и цифровая видеосистема со средствами обработки данных, осуществляющая контроль диаметра выращиваемого кристалла. Проанализированы метрологические проблемы, имеющие важное значение для корректного управления процессом выращивания кристаллов, связанные с нестационарностью и вариациями кривизны поверхности расплава, а также с проявлением параллакса изображения зоны кристаллообразования, формируемого оптической измерительной системой. Обсуждены схемы совместных измерений уровня расплава и диаметра кристалла, позволяющие исключить систематическую составляющую погрешности измерений, связанную с вращением расплава.

**Ключевые слова:** оптический мониторинг, метод Чохральского, уровень расплава, диаметр кристалла, изображение мениска, лазерная триангуляция, параллакс.

### Введение

Производство кристаллических материалов с заданными характеристиками является одним из основных условий, определяющих уровень развития электронной промышленности. Подавляющая часть кристаллов для этих целей, в частности кремния, производится методом Чохральского. Несмотря на известность и широкую распространенность этого метода, он продолжает оставаться предметом изучения и исследования ученых и технологов. Это связано с необходимостью совершенствования технологии производства, повышения качества и размеров выращиваемых кристаллов, разработкой новых более эффективных автоматических ростовых установок повышенной производительности. Для этого требуется не только глубокое изучение явлений тепломассопереноса, чему уделяется достаточно много внимания [1, 2], но также проведение исследований, направленных на выявление таких физических параметров процесса выращивания, которые могут быть измерены с необходимой точностью и использованы для эффективного автоматического регулирования этого

процесса. В современных ростовых установках, предназначенных для выращивания кристаллов из высокотемпературного расплава и оснащенных системами технического зрения (СТЗ), такими параметрами, определяемыми с помощью СТЗ, являются температура нагревателя и расплава, уровень расплава в тигле, а также диаметр выращиваемого кристалла. Измерение температуры осуществляют, как правило, пирометрами, для определения уровня расплава используют лазерные триангуляционные сенсоры или весовые системы, а для контроля диаметра выращиваемого кристалла — телевизионные или цифровые видеосистемы со средствами цифровой обработки данных [3—7].

Ниже рассмотрены вопросы мониторинга оптическими средствами уровня расплава и диаметра кристалла. Представлены результаты приоритетных исследований, выполненных в Институте автоматики и электрометрии СО РАН при разработке СТЗ, входящих в состав цифровых комплексов управления автоматическими ростовыми установками. Детально обсуждены метрологические проблемы, не исследованные ранее, но имеющие важное значение для

корректного управления процессом выращивания кристаллов, связанные с нестационарностью и вариациями кривизны поверхности расплава, а также с параллаксом изображения зоны кристаллообразования, формируемого оптической измерительной системой. Изображение зоны кристаллообразования формируется в основном за счет излучения нагревателя, отраженного от зеркальных поверхностей расплава и кристалла. Поэтому любые изменения конфигурации 3D-сцены, участвующей в формировании изображения, приводят к параллаксу, который проявляется в специфических искажениях изображения. Для исследования этого эффекта применено компьютерное моделирование, позволяющее синтезировать изображения зоны кристаллообразования и варьировать различные технологические параметры процесса выращивания. Проанализированы погрешности измерений уровня расплава и диаметра кристалла, обусловленные как физическими факторами, так и алгоритмами, применяемыми при цифровой обработке данных. Предложены схемы совместных измерений уровня расплава и диаметра кристалла, позволяющие исключить систематическую составляющую погрешности измерений, связанную с вращением расплава.

**Особенности контроля уровня расплава**

В методе Чохральского кристалл формируется из жидкой фазы (высокотемпературного расплава, находящегося в тигле) путем вытягивания [8]. Кристалл и тигель с расплавом при этом могут вращаться с различными угловыми скоростями и независимо перемещаться по вертикальной координате (рис. 1). Для достижения оптимальных условий роста кристалла необходимо в сложной динамической системе «кристалл—расплав» обеспечить стабилизацию уровня расплава в зоне кристаллообразования (зоне мениска кристалла) относительно нагревателя, а также измерение и автоматическое регулирование диаметра кристалла на различных стадиях процесса выращивания. Используемые для измерений оптические системы устанавливаются над иллюминаторами вакуумной камеры ростовой установки и осуществляют оперативный контроль уровня расплава и диаметра кристалла. Точность измерений этих параметров имеет определяющее значение для обеспечения оптимальных условий роста кристалла и работы автоматизированной системы управления ростовой установкой.

Особенности контроля уровня расплава и возникающие при этом метрологические проблемы связаны с нестационарностью его отражающей зеркальной поверхности, а также с наличием у поверхности регулярной составляющей кривизны, обусловленной вращением расплава.

В традиционной схеме триангуляционных измерений зондирующий лазерный пучок направлен

под определенным углом  $\alpha$  на свободную поверхность расплава в периферийной области тигля, расположенную на некотором расстоянии  $r = r_1$  от его центра (точка М на рис. 1). Измерения уровня расплава вблизи центра вращения при этом невозможны в силу значительного (от единиц до сотен миллиметров) изменения диаметра кристалла в процессе выращивания. Принцип триангуляционных измерений основан на определении положения отраженного от поверхности зондирующего светового пучка, координата которого изменяется при изменении уровня расплава  $h$ . Диапазон измерений триангуляционного сенсора для плоской зеркальной поверхности определяется выражением  $h \leq D/(4 \sin \alpha)$ , где  $D$  — апертура оптической системы сенсора. Нестационарность поверхности расплава, обусловленная явлениями теплопереноса, вибрациями оборудования, неустойчивостью скорости вращения тигля и другими факторами, приводит к вариациям угла отклонения отраженного зондирующего пучка, вызывает его виньетирование апертурой объектива и служит причиной дополнительных погрешностей измерений. Апертура объектива при этом играет роль режекторного углового фильтра, ограничивающего возможные предельные углы отклонения  $\varphi^\pm$  отраженного зондирующего пучка, а значит, и углы наклона поверхности:

$$\operatorname{tg} \varphi^\pm(h) = \pm \frac{D}{2d_1} \frac{1 \pm 4h \sin \alpha / D}{1 - h \cos 2\alpha / d_1 \cos \alpha}, \quad (1)$$

где  $d_1$  — расстояние от поверхности расплава до сенсора вдоль его оптической оси [9]. Действие фильтра

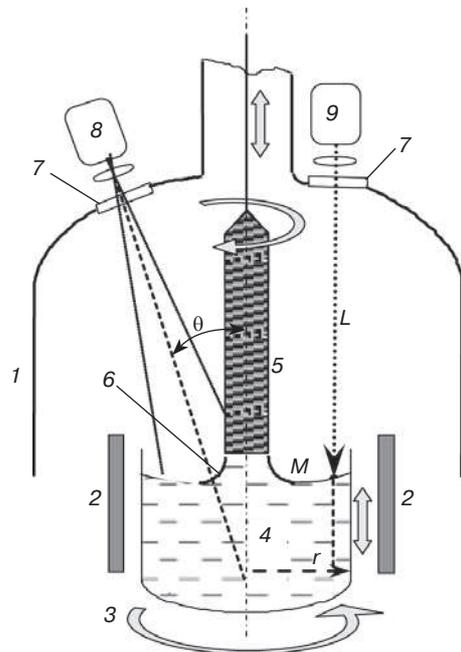


Рис. 1. Схема установки для выращивания кристаллов методом Чохральского: 1 — вакуумная камера; 2 — нагреватель; 3 — тигель; 4 — расплав; 5 — кристалл; 6 — мениск кристалла; 7 — иллюминаторы; 8, 9 — оптические системы контроля диаметра кристалла и уровня расплава (L — зондирующий световой пучок)



существенно меньше и проявляется лишь при больших значениях  $\omega$  [11]. Эти погрешности могут быть скорректированы расчетным путем, если известна геометрия схемы измерений и угловая скорость вращения расплава.

Комплексный учет отмеченных особенностей триангуляционного лазерного зондирования нестационарной поверхности вращающегося расплава позволил создать датчик уровня расплава для цифрового комплекса управления автоматическими ростовыми установками, имеющий следующие метрологические характеристики: диапазон измерений  $\pm 20$  мм, чувствительность 0,01 мм, погрешность измерений  $\pm 0,1$  мм, допустимая угловая скорость вращения расплава 18 об/мин (при двухлучевой схеме зондирования).

**Методы совместных измерений уровня расплава и диаметра кристалла**

Диаметр кристалла определяется по изображению зоны кристаллообразования, формируемому проекционной оптической системой, наклоненной к оси кристалла под некоторым углом  $\theta$  (см. рис. 1). В изображении при этом выделяют точки границы между расплавом и кристаллом (контур кристалла), измеряют их координаты, по результатам аппроксимации которых вычисляют диаметр кристалла. Для формирования точек контура могут применяться различные алгоритмы, основанные, в частности, на использовании градиентных операторов [12]. При аппроксимации точек окружностью необходимо учитывать, что из-за затенения изображения мениска телом кристалла точки контура расположены на дуге, угловой размер которой зависит от стадии роста кристалла. Данное обстоятельство требует применения специальных алгоритмов обработки, дающих оценки параметров окружности, не зависящие от угловых размеров аппроксимируемой дуги. В частности, метод определения параметров окружности по трем точкам здесь неприемлем в силу больших смещений даваемых им оценок радиуса и положения центра кристалла. Более адекватными решаемой задаче представляются многоточечные итерационные методы оценки параметров окружности. При ограниченных вычислительных ресурсах для этих целей можно использовать также более простой четырехточечный аналитический метод расчета, обеспечивающий малый уровень смещения получаемых оценок [13].

Для определения диаметра кристалла оптическим методом необходимо знать уровень расплава в зоне кристаллообразования, который задает расстояние до измерительной системы и, следовательно, масштаб анализируемого изображения кристалла. Из-за прогиба поверхности расплава, вызванного его вращением, это расстояние может изменяться в широких пределах. Максимальный прогиб поверх-

ности расплава относительно его плоскости при  $\omega = 0$  задается квадратичной зависимостью от  $\omega$ :  $h_0 = \omega^2 R^2 / 4g$ . В свою очередь, для измерения уровня расплава непосредственно в зоне кристаллообразования необходимо знать расстояние этой зоны от центра кристалла, т. е. его радиус. Таким образом, неизвестные параметры — уровень расплава и диаметр кристалла — могут быть определены лишь в результате совместных измерений. Для этих целей авторами предложены два метода измерений: расчетный и метод прямых измерений.

Расчетный метод позволяет определять контролируемые параметры по результатам измерения триангуляционным сенсором уровня расплава  $h_1$  вне зоны кристаллообразования на расстоянии  $r = r_1$  от центра тигля и компенсировать систематическую составляющую погрешности измерения диаметра кристалла, зависящую от угловой скорости вращения расплава. Уровень расплава  $h_m$  непосредственно в зоне мениска кристалла и диаметр кристалла  $D_k$  определяются при этом из выражений

$$h_m = H + \frac{4gH^2}{\omega^2 K^2} - \frac{2H}{K} \left[ r_1^2 + \frac{2gH}{\omega^2} \left( 1 - \frac{h_1}{H} + \frac{2gH}{\omega^2 K^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$D_k(h_m) = K \left( \frac{1 - h_m}{H} \right), \tag{3}$$

где  $H$  — расстояние от центра объектива оптической системы измерения диаметра кристалла до горизонтальной плоскости, соответствующей началу отсчета ( $h = 0$ ) уровня расплава;  $K = D_1 / (1 - h_1/H)$ ;  $D_1$  — измеренное значение диаметра кристалла, соответствующее нескорректированному уровню расплава  $h = h_1$ .

Результаты, иллюстрирующие возможность коррекции систематической составляющей погрешности измерения диаметра кристалла, обусловленной вращением расплава, представлены на рис. 3. Как следует из рис. 3, поправка на диаметр  $D_k - D_1$  может быть значительной, особенно при больших

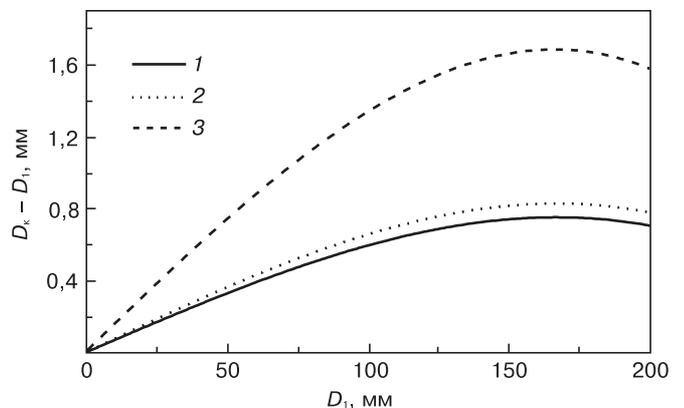


Рис. 3. Зависимости поправок на диаметр кристалла  $D_k - D_1$  для различных угловых скоростей вращения расплава  $N = 30\omega/\pi$  от значений диаметра  $D_1$ , соответствующих уровню расплава, измеренному вне зоны мениска ( $r_1 = 145$  мм;  $H = 700$  мм;  $h_1 = 0$ ): 1 —  $N = 20$  об/мин; 2 — 21; 3 — 30

угловых скоростях вращения расплава. Учет этой поправки позволяет существенно снизить общую погрешность измерения диаметра кристалла и обеспечить условия для выращивания кристаллов заданной геометрии.

В методе прямых измерений диаметр кристалла и уровень расплава определяются непосредственно в зоне кристаллообразования с помощью более сложной бинокулярной оптической системы [11]. Бинокулярный сенсор состоит из двух проекционных подсистем, расположенных под различными углами к оси ростовой установки и формирующих два изображения зоны мениска кристалла. Предлагаемый метод, как и рассмотренный выше, также основан на цифровой обработке изображений мениска кристалла, но уровень расплава, задающий масштаб изображения, определяется по двумерным координатам сопряженных точек разноракурсных изображений.

Из преимуществ метода прямых измерений отметим возможность измерения уровня расплава непосредственно в зоне мениска и отсутствие ограничений на допустимую скорость вращения расплава. К недостаткам следует отнести невозможность измерения уровня расплава на начальной стадии процесса выращивания, когда отсутствует изображение мениска, а также особые требования к конструкции ростовой установки, которая должна обеспечивать возможность размещения оптических подсистем бинокулярного сенсора под заданными углами для обеспечения требуемых метрологических характеристик.

### Особенности изображения зоны кристаллообразования

Характеристики изображения мениска, используемого для определения диаметра растущего кристалла, непосредственно и существенно влияют на метрологические параметры систем контроля и автоматического регулирования. Несмотря на это, в литературе, посвященной системам контроля, практически отсутствуют данные об исследованиях особенностей этого изображения 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.

Изображение зоны кристаллообразования в виде узкой яркой полосы вокруг кристалла формируется оптической проекционной системой в результате отражения поверхностью мениска излучения нагревателя, а также собственного излучения расплава и кристалла. Определенный вклад дает также излучение стенок ростовой камеры и отраженное излучение. В силу существенно более высокой температуры нагревателя вклад его излучения в формирование изображения является наиболее значимым.

Параметры изображения определяются излучением, попадающим в апертуру объектива, поэтому зависят от формы мениска, оптических и геометрических характеристик кристалла, расплава и нагревателя, а также от взаимного расположения всех элементов трехмерной сцены, участвующих в формировании изображения.

Рассмотрим некоторые особенности изображения зоны кристаллообразования, выявленные в результате компьютерного моделирования оптической системы формирования изображения мениска кристалла [14]. Заметим, что в силу различных причин компьютерное моделирование является практически единственным методом, позволяющим исследовать характеристики изображения кристалла, выращиваемого из высокотемпературного расплава методом Чохральского. Для определенности в дальнейшем изложении ограничимся анализом процесса выращивания монокристаллического кремния. Характерные параметры этого процесса следующие: температура расплава  $\sim 1420^\circ\text{C}$ , температура нагревателя  $\sim 1800^\circ\text{C}$ , диаметр кристалла на различных стадиях выращивания  $\sim 3\text{—}300$  мм.

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:

$$\tilde{z}''\tilde{r} + \tilde{z}'(1 + \tilde{z}'^2) \pm 2(q - \tilde{z})(1 + \tilde{z}'^2)^{3/2}\tilde{r} = 0, \quad (4)$$

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 (4) не имеет аналитического решения, поэтому при моделировании в качестве профильной функции мениска  $r = r(z)$  было выбрано приближенное решение [8] уравнения Лапласа при граничных условиях  $z' = 0$  (при  $z = 0$ ) и  $z = z_0$  (при  $r = R$ ):

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

где  $R$  — радиус кристалла;  $k = \gamma R z_0 / (\rho g R z_0 + \gamma \sin \beta)$ ;  $\beta$  — угол между горизонтальной линией и касательной к поверхности мениска в точке его соприкосновения с кристаллом (угол роста кристалла). Высоту мениска  $z_0$  определяли согласно работе [15]:

$$z_0 = \left[ \frac{2\gamma(1 - \cos \beta)}{\rho g} + \left( \frac{\gamma \sin \beta}{2R\rho g} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\gamma \sin \beta}{2R\rho g}. \quad (5)$$

Конфигурация моделируемой 3D-сцены показана на рис. 4. Она включает тигель с расплавом,

кристалл, тепловой экран и оптическую проекционную систему, оптическая ось которой наклонена к оси кристалла под углом  $\theta$ , а центр проекции объектива с апертурой  $D$  расположен в точке  $(L, 0, H)$  глобальной системы координат  $x_1y_1z_1$ . 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  $R_t$  соответственно, высота стенки тигля —  $h_t$ , высота экрана —  $h_s$ . Смещение оси кристалла относительно центра глобальной системы координат определяется параметрами  $dx$ ,  $dy$ . Кроме того, зада-

ются параметры, определяемые физической природой кристалла (плотность, поверхностное натяжение 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 формируемых оптической системой световых распределений (синтезированных изображений) применяли метод обратной трассировки лучей, при этом интенсивность светового распределения в некоторой точке изображения  $m_2$  определялась совокупностью лучей, проходящих через эту точку и попадающих в апертуру оптической системы. Траектории лучей при многократных отражениях прослеживали 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 принимали. Интенсивность луча, попавшего в стенку тигля, определяется собственным излучением тигля, которое, в соответствии с законом Планка, зависит от распределения температуры по его поверхности. Существенными факторами, влияющими на интенсивность луча, являются количество отражений от кристалла и расплава, коэффициенты отражения, углы падения, координаты точки пересечения с тиглем. Аддитивная фоновая составляющая луча формируется при каждом отражении от поверхности расплава и кристалла, зависит от их температуры, углов падения, коэффициентов отражения, координат точек отражения.

Получаемые в результате расчетов синтезированные изображения (рис. 5) использовали для оценки влияния различных факторов на метрологические характеристики оптической системы контроля диаметра кристалла. В частности, исследовали параллакс изображения мениска, который проявляется при вариациях технологических параметров процесса выращивания, приводящих к любым изменениям 3D-структуры анализируемой сцены и, следовательно, к искажению изображения. Алгоритм обработки изображений для определения параметров мениска и диаметра кристалла включал вычисление субпиксельных координат границы (контура) изображения мениска, компенсацию перспективных искажений оптической системы и аппроксимацию полученных точек окружностью. Координаты границы определяли по положению точки перегиба в радиальном распределении интенсивности света во внешней границе изображения мениска.

На рис. 6 приведены результаты расчетов, относящиеся к параллаксу изображения мениска, вызванному изменениями уровня расплава. Как следует из приведенных зависимостей, погрешности измерения диаметра кристалла  $dD$ ,

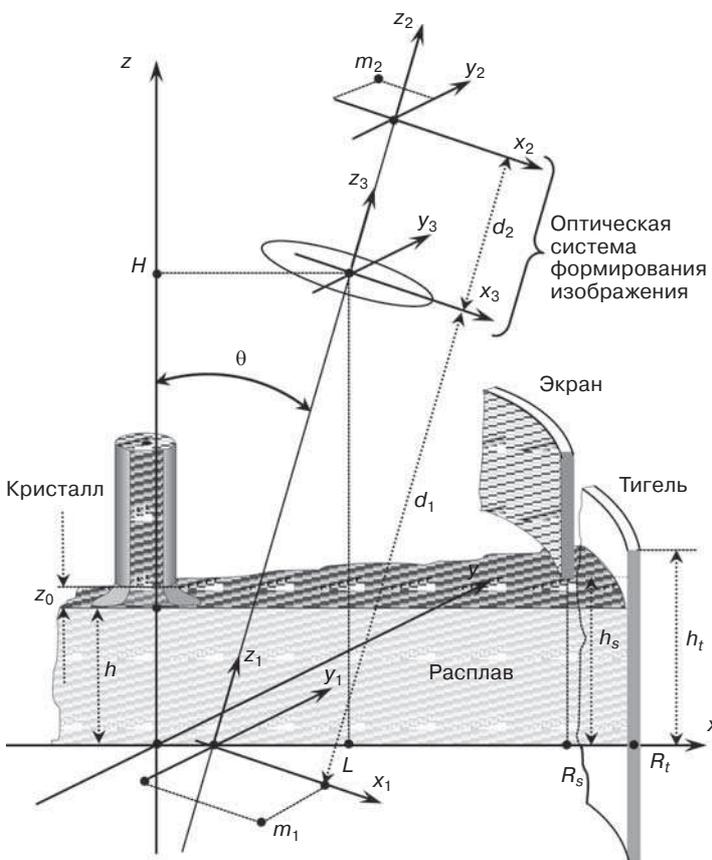


Рис. 4. Схема 3D-сцены для моделирования процесса формирования изображения зоны кристаллообразования

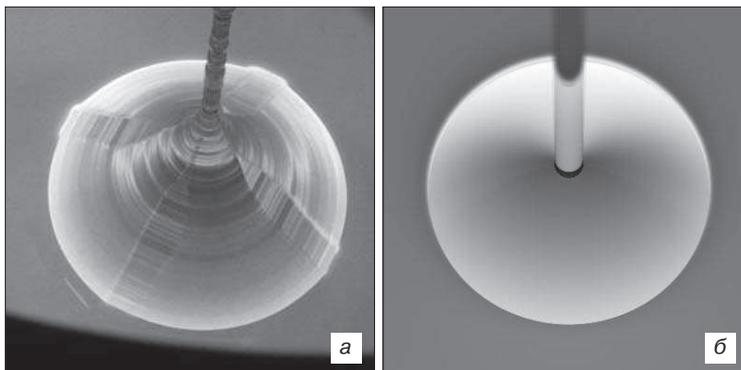


Рис. 5. Примеры реального (а) и синтезированного (б) изображений кристалла при выращивании его конусной части ( $R \sim 20$  мм)

обусловленные параллаксом, возрастают с увеличением диаметра 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  $D = 200$  мм.

Следует отметить, что параллакс возникает и при смещениях оси кристалла, которые могут происходить в процессе выращивания. Расчеты показали, что уровень погрешностей измерения диаметра кристалла при этом оказывается заметно меньше: погрешность линейно зависит от смещения  $dx$  оси кристалла и может достигать десятых долей миллиметра (при  $|dx| = 20$  и  $R = 100$  мм). Влияние смещений по координате  $y$  менее существенно. Для компенсации погрешностей необходимо использовать алгоритмы аппроксимации окружности, обеспечивающие получение несмещенной оценки координат ее центра.

Наиболее заметно параллакс проявляется при изменении диаметра кристалла. Зависимости погрешностей измерения  $dD$  от диаметра  $D$  представлены на рис. 7 для различных значений угла роста кристалла  $\beta$  при центральном угле аппроксимируе-

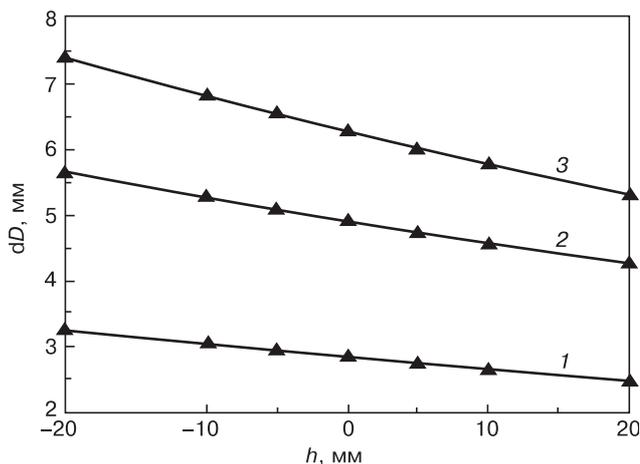


Рис. 6. Погрешности определения диаметра кристалла  $dD$  в зависимости от уровня расплава  $h$  при  $\beta = 79^\circ$  для различных значений  $D$ , мм: 1 — 10; 2 — 100; 3 — 200

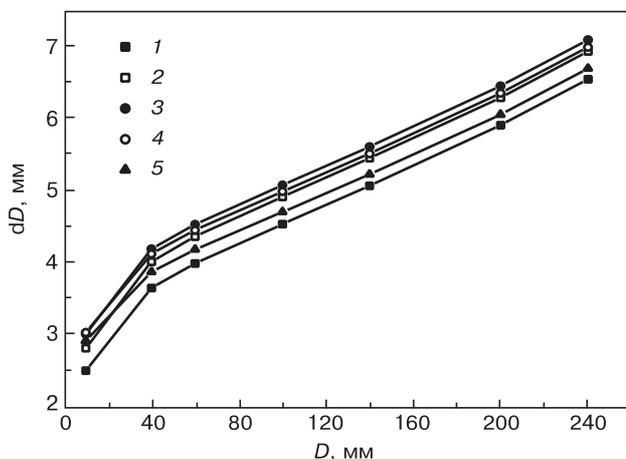


Рис. 7. Погрешности определения диаметра кристалла  $dD$  в зависимости от его диаметра  $D$  для различных значений угла роста  $\beta$ : 1 —  $\beta = 70^\circ$ ; 2 —  $79^\circ$ ; 3 —  $90^\circ$ ; 4 —  $100^\circ$ ; 5 —  $110^\circ$

мой дуги контура мениска  $d\varphi = 140^\circ$ . Погрешности измерений возрастают с увеличением диаметра и существенно зависят от угла роста кристалла. При изменении  $D$  от 40 до 240 мм систематическая погрешность измерения диаметра кристалла может достигать значительной величины — 7 мм. Как показали проведенные авторами исследования, снижение зависимости погрешностей измерений от вариаций радиуса кристалла может быть обеспечено путем коррекции положения плоскости измерения оптической системы, что в значительной степени определяется метрологическими характеристиками используемой системы контроля уровня расплава [14].

Таким образом, при оптическом мониторинге уровня расплава и диаметра кристалла в современном технологическом процессе выращивания кристаллов из высокотемпературного расплава методом Чохральского необходимо учитывать нестационарность и кривизну поверхности расплава, а также параллакс изображения мениска кристалла, формируемого оптической измерительной системой. Игнорирование этих факторов может приводить на практике к погрешностям регулирования процесса выращивания, значительным неконтролируемым вариациям геометрии кристалла и не позволяет в итоге получать кристаллы с заданными характеристиками.

## Заключение

Установлено, что нестационарность поверхности расплава, вызываемая явлениями теплопереноса, вибрациями оборудования, нестабильностью скорости вращения тигля и другими обстоятельствами, а также прогиб его поверхности, обусловленный вращением расплава, являются факторами, существенно влияющими на погрешности измерения и регулирования уровня расплава и диаметра кристалла. Снижение влияния этих факторов при контроле уровня расплава обеспечивается при использовании триангуляционных схем измерений с компенсацией дефокусировки, удовлетворяющих принципу Шеймпфлюга, а также специальных алгоритмов фильтрации и статистической обработки данных оптического зондирования, учитывающих значительные изменения амплитуды и формы сигналов, вызываемые возможными отклонениями лазерного луча за пределы апертуры оптической системы. Установлено, что при контроле геометрии кристалла необходимо использовать алгоритмы расчетов требуемых параметров, основанные на совместных измерениях диаметра кристалла и уровня расплава, поскольку только в этом случае может быть обеспечена независимость результатов измерений от вариаций угловой скорости вращения расплава. Для этих целей могут быть применены предложенные авторами расчетный метод и метод прямых измерений в зоне кристаллообразования.

Диаметр кристалла в процессе выращивания определяется путем измерения параметров изображения мениска кристалла, формируемого оптической проекционной системой. В процессе формирования изображения мениска участвует собственное излучение нагревателя, расплава и кристалла, а также излучение, отраженное от их зеркальных поверхностей. В результате компьютерного моделирования установлено, что в погрешность измерений значительный вклад вносит параллакс изображения мениска, проявляющийся в специфических искажениях анализируемого изображения при любых вариациях технологических параметров, приводящих к изменению геометрии формирующей изображение мениска 3D-сцены.

В частности, с помощью численных расчетов, выполненных в рамках принятой модели, показано, что при выращивании кристаллов кремния и типичных параметров ростовой установки погрешности измерения диаметра кристалла, обусловленные смещениями его оси в диапазоне  $\pm 20$  мм могут составлять десятки доли миллиметра, а погрешности, вызванные вариациями уровня расплава в том же диапазоне, могут достигать единиц миллиметров при радиусе кристалла 100 мм.

#### Библиографический список

1. Gevelber, M. Modelling requirements for development of an advanced Czochralski control system / M. Gevelber, D. Wilson, N. Duanmu // J. Cryst. Growth. – 2001. – V. 230, N 1. – P. 217–223.
2. Бердников, В. С. Гидродинамика и теплообмен при вытягивании кристаллов из расплавов. Ч. 2. Численные исследования режима свободной конвекции / В. С. Бердников // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2008. – № 3. – С. 4–17.

3. Mikhlyayev, S. V. A computer vision system to control the process of crystal growth / S. V. Mikhlyayev, E. S. Nejevenko // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1999. – V. 9, N 1. – P. 156–158.
4. Багдасаров, X. С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава / X. С. Багдасаров – М.: Физматлит, 2004. – 160 с.
5. Gartner, K. J. An electronic device including a TV-system for controlling the crystal diameter during Czochralski growth / K. J. Gartner, K. F. Rittinghaus, A. Seeger, W. Uelhoff // J. of Cryst. Growth. – 1972. – V. 13–14. – P. 619–623.
6. Shiraishi, Y. Growth of silicon crystal with a diameter of 400 mm and weight of 400 kg / Y. Shiraishi, K. Takano, J. Matsubara, T. Iida, N. Takase, N. Machida, M. Kuramoto, H. Yamagishi // Ibid. – 2001. – V. 229, N 1. – P. 17–21.
7. Huang, L.Y. On the hot-zone design of Czochralski silicon growth for photovoltaic applications / L. Y. Huang, P. C. Lee, C. K. Hsieh, W. C. Hsu, C. W. Lan // Ibid. – 2004. – V. 261, N 4. – P. 433–443.
8. Шашков, Ю. М. Выращивание монокристаллов методом вытягивания / Ю. М. Шашков – М.: Металлургия, 1982 – 312 с.
9. Михляев, С. В. Анализ оптических триангуляционных систем измерения профиля зеркальной поверхности / С. В. Михляев // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 4. – С. 78–91.
10. Amann, M.-C. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement / M.-C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, M. Rioux // Opt. Eng. – 2001. – V. 40, N 1. – P. 10–19.
11. Михляев, С. В. Применение методов оптической триангуляции для измерения уровня расплава при выращивании кристаллов / С. В. Михляев // Автометрия. – 2003. – Т. 39, № 5. – С. 30–41.
12. Beaudet, P. R. Rotational invariant image operators / P. R. Beaudet // Proc. Fourth Int. Conf. on Pattern Recognition. – Kyoto (Japan), 1978. – P. 579–583.
13. Михляев, С. В. Исследование неитерационного метода наименьших квадратов для оценивания параметров аппроксимирующей окружности / С. В. Михляев // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, № 5. – С. 41–50.
14. Михляев, С. В. Информационные характеристики изображения зоны кристаллообразования в методе Чохральского / С. В. Михляев, О. И. Потатуркин // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 35–48.
15. Щелкин, Ю. Ф. Определение формы жидкого столбика при выращивании монокристаллов методом Чохральского из расплава со свободной поверхностью / Ю. Ф. Щелкин // Физика и химия обработки материалов. – 1971. – № 3. – С. 29–33.

УДК 654.9:621.318

## ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

© 2011 г. Л. С. Лунин, Г. Я. Карапетьян, В. Г. Днепровский, В. Ф. Катаев  
Южный научный центр РАН

Разработан и изготовлен датчик перемещения на поверхностных акустических волнах (ПАВ), в котором перемещение измеряется по задержке сигнала, отраженного от валика, который движется вдоль поверхности распространения ПАВ. Датчик может работать в режиме отражения опрашивающего электромагнитного сигнала, т. е. быть пассивным и беспроводным. Максимальное измеряемое перемещение в таком датчике составляет 14 мм с точностью  $\pm 0,1$  мм.

**Ключевые слова:** датчик, поверхностные акустические волны, беспроводной дистанционный контроль.

### Введение

Проблемы беспроводного дистанционного контроля физических параметров (давления, температуры, влажности, напряженного состояния, радиационного фона) в настоящее время решают с помощью различных датчиков по радиосигналу: к датчику прилагается радиопередатчик, который осуществляет беспроводную

передачу информации от датчика. Но для передатчика требуется источник питания, который по мере необходимости заменяется. Вместе с тем датчик может быть установлен в труднодоступном месте или в условиях, когда для замены источника питания необходимо останавливать работу объекта, что не всегда возможно.

В работе [1] описан датчик перемещения на поверхностных