

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

2003, том 39, № 5

УДК 535.31 : 53.082.5

С. В. Михляев

(Новосибирск)

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ РАСПЛАВА
ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРИСТАЛЛОВ**

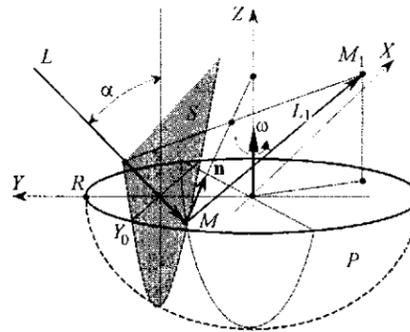
Дан анализ триангуляционных оптических методов измерения уровня расплава в тигле при выращивании кристаллов. Основное внимание уделяется методу активного зондирования, основанному на использовании лазерного триангуляционного сенсора. Приведены оценки метрологических характеристик (систематической составляющей погрешности измерений и диапазона измерений) в зависимости от уровня расплава, скорости его вращения, расстояния зоны измерения от центра вращения, координаты тигля. Даны оценки допустимой скорости вращения расплава. Сформулированы требования к оптической системе, обеспечивающие максимальный диапазон измерений, а также к алгоритмам обработки оптического сигнала, формируемого при отражении зондирующего луча от нестационарной зеркальной поверхности. Обсуждаются особенности измерения уровня расплава с использованием пассивного бинокулярного сенсора.

Введение. Оперативный контроль уровня расплава является одной из важнейших составляющих технологического процесса выращивания кристаллов. В рассматриваемом методе Чохральского кристалл формируется из жидкой фазы (расплава, находящегося в тигле) путем вытягивания [1]. Кристалл и тигель при этом могут вращаться с различными угловыми скоростями и независимо перемещаться по вертикальной координате. Для оптимальных условий роста кристалла необходимо обеспечить заданный уровень расплава в зоне кристаллообразования (зоне мениска) относительно нагревателя на различных стадиях процесса выращивания.

Для этих целей, особенно при выращивании кристаллов большого диаметра, применяются измерительные системы, основанные на оптической триангуляции. Различают активные и пассивные триангуляционные системы. Первые содержат источники света и формируют зондирующие световые пучки, вторые используют для измерений естественное излучение из зоны зондирования. В работе анализируются оптические методы измерения уровня расплава в тигле, основанные на использовании как активной (лазерный сенсор [2–4]), так и пассивной (бинокулярный сенсор [4]) триангуляции. Основное внимание уделяется методу активного зондирования.

Приведены оценки метрологических характеристик лазерного сенсора (систематической составляющей погрешности измерений и диапазона измерений) в зависимости от уровня расплава, скорости его вращения, расстояния зоны измерения от центра вращения, координаты тигля.

Рис. 1. Схема измерения уровня расплава в тигле радиуса R , вращающемся с угловой скоростью ω : P – поверхность расплава; S – плоскость падения ($Y = Y_0$) зондирующего луча L ; M – точка измерения уровня



Сформулированы требования к алгоритмам обработки оптических сигналов, которые должны учитывать особенности отражения зондирующего излучения от нестационарной зеркальной поверхности – значительные изменения амплитуды и формы сигналов, вызываемые возможными отклонениями лазерного луча за пределы апертуры [5].

Отмечается ряд особенностей активной триангуляционной системы, накладывающих ограничения на метрологические характеристики и затрудняющих использование ее в промышленных условиях: отсутствие возможности измерения уровня непосредственно в зоне мениска (зоне формирования кристалла), зависимость результатов измерений от изменений формы поверхности расплава, вызываемых вариациями скорости вращения тигля (расплава) и вибрациями, а также ограничение на допустимую скорость вращения тигля.

От перечисленных недостатков свободна бинокулярная оптическая система пассивной триангуляции, позволяющая измерять не только уровень, но и диаметр кристалла [4]. Обсуждаются метрологические характеристики и особенности использования такой системы, анализируются возможные источники погрешностей измерений.

Активное зондирование. Общая схема измерения уровня расплава в тигле радиуса R , вращающемся вокруг оси Z с угловой скоростью ω , показана на рис. 1. Ось вращения проходит через центр тигля. Координатная плоскость XU совпадает с поверхностью расплава при $\omega = 0$. Положение тигля вдоль оси Z может изменяться и задается его координатой $Z = h_r$. Зондирующий луч L лазерного сенсора лежит в плоскости $Y = Y_0$, составляет угол α с осью Z и пересекает плоскость XU в точке $X = 0, Y = Y_0$. Заметим, что размер кристалла в процессе выращивания может изменяться в широких пределах – от единиц до сотен миллиметров. Поэтому измерение уровня расплава лазерным сенсором непосредственно в зоне мениска на всех стадиях роста кристалла требует применения сложных систем сканирования лазерного луча. На практике обычно используют неподвижный сенсор с фиксированной координатой Y_0 . Поскольку диапазон допустимых значений уровня расплава может быть достаточно большим (до десятков миллиметров), то существенно, что для измерений должен использоваться сенсор, удовлетворяющий условию Шеймпфлюта [2]. В этом случае точка пересечения $M(X_1, Y_1, Z_1)$ зондирующего луча с поверхностью расплава (точка измерения уровня расплава) проецируется в плоскость фотоприемного устройства без какой-либо дефокусировки.

Форма свободной поверхности вращающегося расплава описывается выражением

$$Z = \omega^2(X^2 + Y^2 - R^2/2)/2g + h_r, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Используя (1), можно показать, что измеряемая сенсором координата поверхности расплава $Z = Z_1$ задается выражением

$$Z_1 = \frac{g}{\omega^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{\omega^4 \operatorname{tg}^2 \alpha}{g^2} \left(\frac{R^2}{2} - Y_0^2 - \frac{2gh_T}{\omega^2} \right)} \right]. \quad (2)$$

Диапазон измерений по Z при этом зависит от геометрии схемы измерения, координаты тигля и формы поверхности расплава. В частности, при $\omega = 0$ диапазон измерений определяется выражением

$$|\Delta Z| \leq D \sqrt{1 - 4(\Delta/D)^2} / 4 \sin(\alpha), \quad (3)$$

где D – размер апертуры объектива, а Δ – его смещение относительно плоскости $Y = Y_0$. При $\omega \neq 0$ диапазон существенно зависит от скорости вращения расплава. В этом случае отраженный зондирующий луч L_1 отклоняется от своего первоначального направления в соответствии с изменением направления нормали \mathbf{n} к поверхности расплава (см. рис. 1) и при определенном значении ω может выйти за пределы апертуры объектива, при этом измерения становятся невозможными. Зависимость диапазона измерений от скорости вращения расплава в общем случае носит существенно нелинейный характер. На рис. 2 приведены соответствующие координаты отраженного зондирующего луча в плоскости расположения объектива (координаты точки M_1 на рис. 1) при различных скоростях вращения расплава и различных значениях его уровня, рассчитанные с учетом кривизны поверхности расплава и отклонения нормали к поверхности от первоначального направления. Как следует из рис. 2, диапазон измерений и соответствующий диапазон допустимых скоростей вращения расплава определяются местоположением объек-

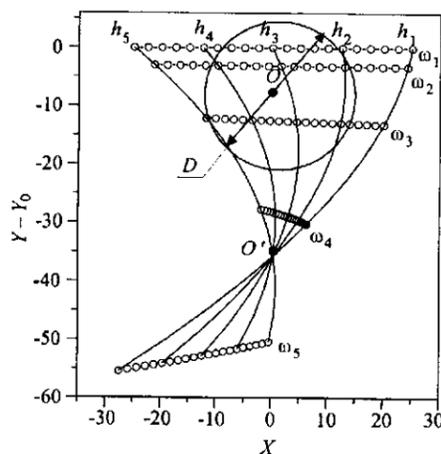
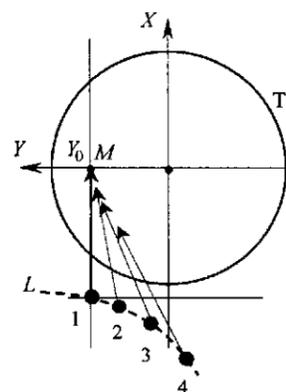


Рис. 2. Координаты зондирующего луча в плоскости объектива при различных скоростях вращения расплава: $\omega_1 = 0$, $\omega_i < \omega_{i+1}$ и различных значениях уровня расплава $h_i < h_{i+1}$ ($i = 1, \dots, 4$). O – центр объектива с апертурой D

Рис. 3. Схема многолучевого зондирования (вид сверху): 1-4 – источники зондирующих пучков, M – точка зондирования, Γ – тигель



тива (окружность с центром в точке O) и размером его апертуры D . В частности, при перемещении объектива в точку O' , соответствующую области пересечения семейства кривых, обеспечивается существенное расширение диапазона измерений с одновременным уменьшением диапазона допустимых скоростей вращения расплава. Эта особенность связана с фокусирующими свойствами параболической поверхности расплава.

Для увеличения диапазона допустимых угловых скоростей вращения расплава может быть применена схема многолучевого зондирования (рис. 3), в которой используются несколько световых пучков (источники излучения 1, 2, ..., расположенные вдоль траектории L) с различными углами наклона к исходному, пересекающихся его в точке зондирования M [6]. Каждый из этих пучков попадает в апертуру объектива лишь при определенном диапазоне изменения угловой скорости. В алгоритм работы датчика при этом может быть заложена возможность автоматической коммутации источников излучения, основанная на анализе параметров световых сигналов и статистических данных, характеризующих частоты отклонения зондирующих пучков за пределы апертуры объектива. В результате диапазон допустимых угловых скоростей вращения расплава может быть существенно увеличен.

В случае, если система управления перемещением тигля обеспечивает стабилизацию положения уровня расплава по результатам измерения лазерного сенсора ($Z_1 = \text{const}$), то необходимое для этого смещение тигля определяется выражением

$$h_r = Z_1 + \omega^2 (R^2/2 - Y_0^2 - Z_1^2 \text{tg}^2 \alpha) / 2g. \quad (4)$$

Предельно допустимое значение скорости вращения расплава в этом случае при $Z_1 = X_1 = 0$ может быть оценено выражением $\omega < \sqrt{gD/2Z_0Y_0}$, где Z_0 – расстояние от плоскости расплава до центра объектива при $\omega = 0$. Более точную оценку можно получить из условия

$$D > Z \text{tg}(2\gamma) = 2Zr\omega^2 / [g(1 - \omega^4 r^2 / g^2)],$$

где γ – угол наклона нормали к поверхности расплава в точке зондирования, обусловленный искривлением поверхности при вращении расплава; Z – расстояние от объектива до точки зондирования по вертикали. Для многолучевой схемы зондирования предельная скорость вращения расплава при тех же условиях оценивается выражением $\omega_k < \sqrt{gDk/2Z_0Y_0}$, где k – количество зондирующих пучков.

Поскольку для зондирующего луча выполняются соотношения $X_1 = -Z_1 \text{tg} \alpha$, $Y_1 = Y_0$, то из выражения (1) следует, что в точке M при выполне-

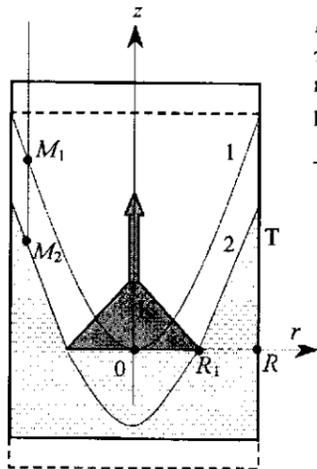


Рис. 4. Схема выращивания конусной части кристалла: Т – тигель, К – кристалл, 1 – положение поверхности расплава до начала выращивания кристалла, 2 – положение поверхности расплава в процессе выращивания конусной части кристалла, M_1 и M_2 – положения точек измерения уровня расплава

нии условия $X_1^2 + Y_1^2 = R^2/2$ измеряемая координата не зависит от скорости вращения расплава $Z_1 = h_T$. Это достигается при двух положениях тигля: $h_T = \pm \sqrt{R^2/2 - Y_0^2} / \text{tg}^2 \alpha$. Следует отметить, что здесь мы не учитываем ограничения на угловую скорость вращения расплава, связанные с изменением направления отраженного светового пучка и его виньетированием апертурой объектива вследствие вариаций кривизны отражающей поверхности

[5]. Заметим также, что при малых угловых скоростях ($\omega \rightarrow 0$) измеряемая Z -координата точки пересечения лазерного луча с поверхностью расплава также определяется только положением тигля $Z_1 = h_T$. В остальных случаях, как следует из выражения (2), Z_1 зависит от многих параметров, поэтому их изменение может приводить к значительным погрешностям в определении уровня расплава, особенно если их значения неизвестны.

Режим стабилизации положения уровня расплава в точке зондирования ($Z_1 = \text{const}$) применяется на стадии выращивания цилиндрической части кристалла постоянного радиуса R_1 . В этом случае стабилизируется также положение зоны кристаллообразования (зоны мениска) относительно нагревателя, при этом соотношение скоростей вытягивания кристалла V_K и перемещения тигля V_T определяется отношением квадратов их радиусов: $V_K / V_T = R^2 / R_1^2$.

На стадии выращивания конусной части кристалла такая стабилизация приводит к изменению Z -координаты зоны мениска Z_K вследствие изменения диаметра кристалла в этой зоне, что может привести к нарушению необходимых условий роста кристалла. Этот эффект устраняется путем стабилизации положения зоны кристаллообразования относительно нагревателя, для чего используются результаты измерения уровня расплава и диаметра кристалла. На рис. 4 показана схема выращивания конусной части кристалла. Начало координат ($Z = 0$) соответствует положению зоны кристаллообразования на этапе затравливания $Z_K = 0$ (свободной поверхности расплава 1). Для стабилизации положения этой зоны используются определенные скорости вытягивания кристалла и перемещения тигля, зависящие от диаметра кристалла и обеспечивающие постоянство Z_K . Можно показать, что смещение тигля в этом случае определяется выражением

$$Z_T = \frac{R_1^3}{3R^2 \text{tg}^2(\theta/2)} - \frac{\omega^2}{2g} R_1^2 \left(1 - \frac{R_1^2}{2R^2} \right), \quad (5)$$

где θ – угол при вершине конуса, а координата поверхности в точке зондирования изменяется по закону

$$Z_1 = Z_1 \left(\sqrt{R^2 + 2R_1^2} \right) \quad (6)$$

($Z_1(R)$ определяется соотношением (2)).

Особенности измерения уровня расплава лазерным сенсором. При использовании лазерного триангуляционного сенсора для измерения уровня расплава необходимо учитывать ряд особенностей.

1. Поскольку отражение зондирующего излучения происходит от нестационарной динамической поверхности, то метрологические характеристики сенсора существенным образом зависят как от статистических характеристик получаемых сигналов, так и от применяемых алгоритмов их цифровой обработки. Нестационарность поверхности расплава, обусловленная вибрациями установки и другими причинами, приводит к неконтролируемым отклонениям зондирующего лазерного луча и увеличению погрешности измерений. Для снижения влияния этого фактора необходимо использовать схемы измерений с компенсацией дефокусировки, удовлетворяющие принципу Шеймпфлюта, а также специальные алгоритмы статистической обработки сигналов, учитывающие значительные изменения амплитуды и формы сигналов, вызываемые возможными отклонениями лазерного луча за пределы апертуры. Кроме того, алгоритмы управления сенсором должны обеспечивать возможность адаптации фотоприемного устройства к вариациям уровня сигнала, субпиксельной локализации светового пятна, отбраковки сигналов в соответствии с определенным критерием (по амплитуде, форме или ширине импульса), а при использовании многолучевой схемы зондирования – возможность автоматической коммутации световых пучков.

2. Неплоскость поверхности расплава, обусловленная вращением тигля, вызывает отклонение зондирующего луча сенсора вплоть до выхода за пределы апертуры воспринимающего объектива, что вызывает ограничение диапазона измерений и допустимой угловой скорости вращения расплава. Кроме того, в этом случае появляется систематическая составляющая в погрешности измерений, обусловленная кривизной поверхности.

3. Невозможность измерений уровня расплава непосредственно в зоне мениска (зоне перехода от жидкой фазы к твердой) вызывает при неизвестной скорости вращения расплава дополнительные погрешности как в определении уровня расплава в этой зоне, так и в определении диаметра кристалла.

Пассивное зондирование. Отмеченные особенности лазерного сенсора накладывают ограничения на метрологические характеристики и затрудняют использование его в промышленных условиях.

На рис. 5 приведен вариант бинокулярной оптической системы, позволяющей исключить перечисленные выше недостатки [4]. Существенно, что бинокулярный сенсор дает возможность измерять не только уровень расплава, но и диаметр кристалла. Система состоит из двух оптических проекционных подсистем, расположенных под углами α и β к оси установки и формирующих изображения зоны мениска в плоскостях многоэлементных фотоприемных устройств (видеосистем). Радиус кристалла и уровень расплава рассчитываются по измеряемым видеосистемами координатам контура кристалла

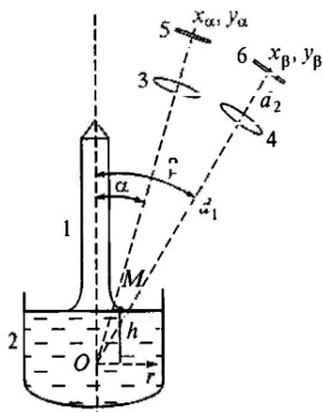


Рис. 5. Схема одновременного измерения уровня расплава и диаметра кристалла бинокулярным сенсором: 1 – кристалл, 2 – тигель с расплавом, 3, 4 – оптические проекционные подсистемы, 5, 6 – фотоприемные устройства

$(x_{\alpha}, y_{\alpha}), (x_{\beta}, y_{\beta})$. Заметим, что алгоритмы обработки изображений, формируемых видеосистемами, должны обеспечивать независимость результатов измерений от возможных смещений (биений) оси кристалла, возникающих при вращении тигля и кристалла и раскачивании кристалла и приводящих к соответствующим смещениям изображений мениска. Это достигается, в част-

ности, при оценке положения кристалла и его диаметра путем аппроксимации точек контура окружностью.

Метрологические характеристики сенсора определяются геометрией схемы измерений. Максимальная чувствительность измерений к изменению диаметра кристалла достигается при $\alpha = 0$, диапазон измерений диаметра при этом минимален. В свою очередь, максимальной чувствительности измерений к изменению уровня расплава и минимальному диапазону измерений уровня соответствует $\beta = \pi/2$. На практике значения углов наклона оптических подсистем должны выбираться с учетом конструктивных особенностей ростовой установки и требуемых метрологических характеристик сенсора (диапазона и погрешности измерений).

Заметим, что бинокулярная система измерений, как и любая оптическая проекционная система, формирующая изображение зоны мениска, вообще говоря, не обладает инвариантностью к изменениям угла зрения и формы мениска, что может служить источником погрешностей измерений. Действительно, изображение мениска в виде узкой яркой полоски вокруг кристалла формируется в результате отражения поверхностью мениска излучения нагревателя, окружающего тигель. Характеристики изображения определяются излучением, попадающим в апертуру объектива, поэтому зависят от формы мениска и взаимного расположения мениска и оптической системы. Вследствие этого оптическими подсистемами сенсора измеряются, строго говоря, координаты не одной и той же точки M мениска, а разных точек M_{α} и M_{β} , зависящих как от углов α и β , так и от диаметра кристалла и формы мениска, определяемой геометрией ростовой установки и текущей стадией роста кристалла. Исследования, проводившиеся при испытаниях системы машинного зрения [7], свидетельствуют о том, что изменения координат точки M при изменении угла зрения оптической системы оказываются незначительными по сравнению с шириной мениска, что позволяет надеяться на получение приемлемых метрологических характеристик бинокулярного сенсора. Более точные оценки погрешностей измерений, обусловленных рассмотренным эффектом, могут быть получены при проведении специальных исследований зависимости формы мениска от вариаций параметров технологического процесса выращивания кристаллов и геометрических параметров ростовой установки, влияющих на формирование изображения мениска.

Особенности использования бинокулярного сенсора. Метод пассивного зондирования имеет ряд преимуществ перед лазерной триангуляцией, но ему присущи также и определенные недостатки.

Из преимуществ отметим: возможность измерения уровня расплава непосредственно в зоне мениска, большой диапазон измерений, отсутствие ограничений на допустимую скорость вращения расплава, а также возможность одновременного измерения не только уровня расплава, но и диаметра кристалла.

К недостаткам следует отнести: невозможность измерения уровня расплава на начальной стадии (до начала роста кристалла при отсутствии изображения мениска); неинвариантность оптической системы к изменениям угла зрения и формы мениска, являющуюся потенциальным источником погрешностей измерений; особые требования к конструкции ростовой установки, которая должна позволять устанавливать оптические подсистемы под заданными углами для обеспечения требуемых метрологических характеристик и в то же время исключать возможность виньетирования световых пучков стенками тигля при его подъеме в процессе выращивания кристалла и выработке расплава.

Результаты. При использовании лазерного сенсора точность определения координаты поверхности расплава в точке зондирования может быть очень высокой и определяется метрологическими характеристиками сенсора. Уровень расплава непосредственно в зоне мениска может быть определен по показаниям сенсора в случае, если известен ряд дополнительных параметров: скорость вращения расплава, координата тигля, диаметр кристалла и т. д. Знание этих параметров позволяет исключить систематическую составляющую погрешности измерения сенсора. Поскольку на практике далеко не все параметры могут быть известны или измерены с необходимой точностью, неустранимая систематическая составляющая погрешности измерений может быть значительной. В частности, одним из основных параметров, влияющих на результаты измерений сенсора, является угловая скорость вращения расплава, которая, как правило, неизвестна и может меняться в широких пределах. Особенно это относится к переходным режимам, когда после изменения скорости вращения тигля скорость вращения расплава еще не стабилизировалась. На приведенных далее рисунках представлены некоторые результаты расчетов, позволяющие оценить уровень возможной систематической погрешности измерений (при $\alpha = 20^\circ$, $R = 300$ мм, $Y_0 = 150$ мм).

На рис. 6 приведены зависимости $Z_1 - h_r$ от угловой скорости вращения расплава $N = 30\omega/\pi$ (об./мин) для различных значений h_r . Здесь же показана кривая максимального прогиба поверхности расплава $h_0 = \omega^2 R^2 / 4g$ относительно его плоскости при $\omega = 0$. Из графиков видно, что изменение Z -координаты точки зондирования при изменении ω может быть очень значительным, особенно при больших значениях ω , независимо от значения координаты тигля. С другой стороны, при фиксированном значении ω изменение координаты тигля также может приводить к заметным изменениям координаты Z_1 точки зондирования, что хорошо видно на увеличенном фрагменте графиков. С ростом ω увеличивается прогиб поверхности расплава, увеличивается также разность Z -координат точки зондирования и зоны кристаллообразования. Это обстоятельство является одной из причин увеличения погрешности измерений системы контроля геометрии кристалла, поскольку значение уровня в зоне мениска, анализируемой этой системой, отличается от измеренного сенсором значения.

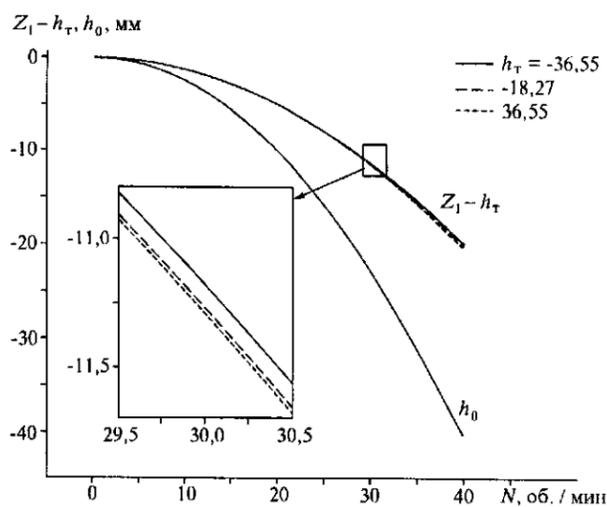


Рис. 6. Кривые зависимостей разности координат точки зондирования и тигля $Z_1 - h_T$ и максимального прогиба поверхности расплава h_0 от угловой скорости вращения расплава N для различных значений координаты тигля h_T

На рис. 7 показаны результаты расчетов значений координаты тигля в зависимости от координаты точки зондирования Z_1 для различных значений скорости вращения расплава в случае, когда при выращивании кристалла действует система стабилизации уровня расплава, обеспечивающая постоянство Z_1 . В первом приближении это линейные зависимости, смещение которых существенно зависит от ω . Однако при больших значениях ω , как следует из рис. 8, а также при других значениях параметров R , Y_0 и α эти зависимости могут быть существенно нелинейными, что необходимо учитывать

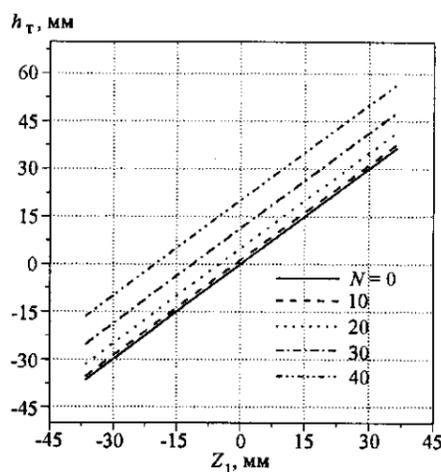


Рис. 7. Кривые зависимостей координаты тигля h_T от координаты точки зондирования Z_1 для различных значений скорости вращения расплава N при стабилизации Z_1

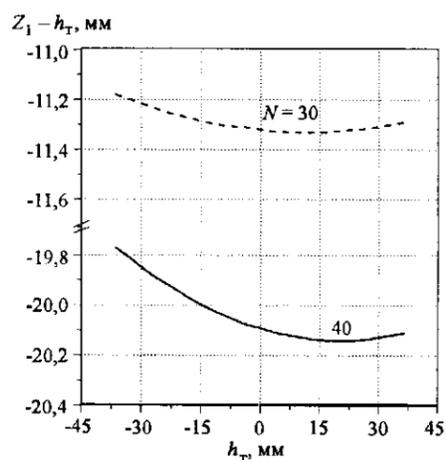


Рис. 8. Кривые зависимостей разности координат точки зондирования и тигля $Z_1 - h_T$ от координаты тигля для различных значений скорости вращения расплава N при стабилизации Z_1

при разработке системы регулирования уровня расплава и выборе технологических режимов работы ростовой установки.

Результаты, иллюстрирующие зависимость величины перемещения тигля от радиуса кристалла при выращивании его конусной части в режиме стабилизации положения зоны кристаллообразования, представлены на рис. 9. Эти зависимости существенно нелинейны и при определенных параметрах могут изменять знак, что соответствует изменению направления перемещения тигля. Изменения Z -координаты точки зондирования (показаний сенсора), необходимые для обеспечения рассмотренного режима стабилизации, приведены на рис. 10. По окончании роста конуса показания сенсора перестают изменяться и остаются постоянными во время выращивания цилиндрической части кристалла заданного диаметра.

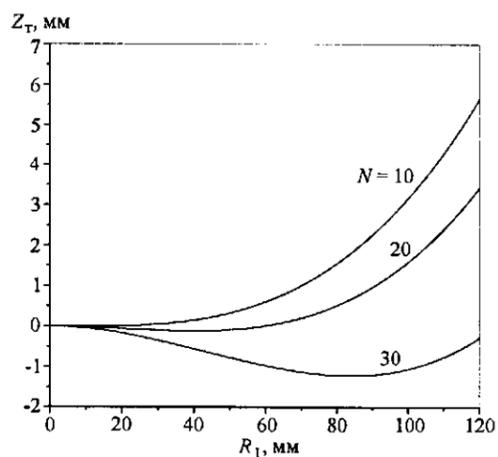


Рис. 9. Кривые зависимостей смещения тигля Z_T от радиуса кристалла R_1 при выращивании конуса в режиме стабилизации положения зоны кристаллообразования ($\theta = \pi/2$)

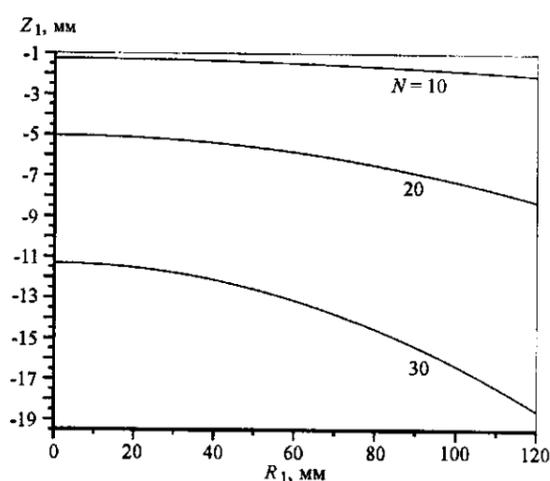


Рис. 10. Кривые изменения координаты точки зондирования Z_1 при выращивании конуса в зависимости от радиуса кристалла R_1 в режиме стабилизации положения зоны кристаллообразования ($\theta = \pi/2$)

Заключение. Оптическая триангуляция является одним из основных методов измерения уровня расплава при выращивании кристаллов большого диаметра методом Чохральского. Для этих целей могут быть использованы как активные измерительные системы, основанные на лазерном зондировании, так и пассивные, использующие естественное некогерентное излучение из анализируемой области.

Лазерная триангуляция обеспечивает высокую точность определения координаты поверхности в точке зондирования, но в то же время не позволяет измерять уровень расплава в зоне мениска на всех стадиях роста кристалла и ограничивает допустимую скорость вращения расплава.

Увеличение допустимой скорости вращения расплава и расширение диапазона измерений обеспечивается при использовании схем многолучевого зондирования. Для оптимизации таких схем необходимо проведение точных расчетов, учитывающих геометрию зондирующих пучков и кривизну поверхности вращающегося расплава.

При использовании лазерного сенсора могут возникать значительные систематические погрешности измерений, особенно при больших угловых скоростях вращения расплава. Для обеспечения высоких метрологических характеристик алгоритмы работы сенсора должны учитывать особенности отражения зондирующих световых пучков от нестационарной зеркальной поверхности.

Более предпочтительным в сравнении с лазерным сенсором представляется сенсор с бинокулярной оптической системой, поскольку он не имеет указанных недостатков и позволяет измерять не только уровень, но и диаметр кристалла. Вместе с тем такой сенсор не позволяет измерять уровень свободной поверхности расплава до начала выращивания кристалла, а его оптическая система не обладает инвариантностью к изменениям угла зрения и формы мениска, что является потенциальным источником погрешностей измерений. Кроме того, использование бинокулярного сенсора может дать преимущество только в случае, если конструктивные особенности ростовой

установки позволяют выбирать параметры сенсора, обеспечивающие требуемые метрологические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4. **Mikhlyayev S. V.** Optical systems for melt level measurement in the process of crystal growth // Proc. SPIE. 2002. **4900**. P. 586.
5. **Михляев С. В.** Триангуляционное зондирование нестационарной поверхности // Автометрия. 2001. № 1. С. 67.
6. **Mikhlyayev S. V., Nezhevenko E. S.** Metrological problems of melting level and crystal geometry measurement during crystal growing // Proc. SPIE. 2002. **4900**. P. 572.
7. **Mikhlyayev S. V., Nezhevenko E. S.** A computer vision system to control the process of crystal growth // Pattern Recogn. and Image Analysis. 1999. **9**, N 1. P. 156.

*Институт автоматизации и электротехники СО РАН,
E-mail: mikhlyayev@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
5 мая 2003 г.*