

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРА МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ  
В ПРОЦЕССЕ ЕГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗ РАСПЛАВА**

**В. И. Козик, Е. С. Нежевенко**

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*

*E-mail: kozik@iae.nsk.su*

*nejevenko@iae.nsk.su*

Исследуется проблема контроля диаметров кристаллов при их выращивании по методу Чохральского. Анализируется изображение зоны мениска, в которой происходит кристаллизация. Определяются информативные параметры для нахождения диаметров кристаллов. Описывается алгоритм вычисления диаметра мениска, применяемого для регулирования процесса роста кристалла. Приводятся результаты работы датчика, использующего предложенный алгоритм, при выращивании реальных кристаллов.

**Введение.** Выращивание кристаллов кремния, которые пока остаются одним из основных материалов, используемых в микроэлектронике, относится к числу важнейших задач, эффективное решение которых влияет на развитие радиоэлектронной промышленности. Ростовые установки, предназначенные для выращивания кристаллов кремния по методу Чохральского, являются сложными техническими объектами, от качества управления которыми зависит качество их продукции. Вполне естественна тенденция создания установок для выращивания кристаллов большого диаметра, поскольку при этом повышается как их производительность, так и выход годных микросхем, но вместе с тем увеличиваются размеры ростовых установок и усложняются проблемы управления ими. Ведущие фирмы-производители кремния интенсивно развивают технологию выращивания кристаллов больших диаметров (>200 мм). В этом случае применяемое ранее ручное управление ростовыми установками становится неприемлемым, возникает потребность их автоматизации.

При автоматизации таких сложных процессов, как выращивание кристаллов, необходимо использование обратной связи, что, в свою очередь, требует наличия в контуре управления датчиков, информирующих о параметрах роста кристалла, и прежде всего о геометрических параметрах зоны кристаллизации, внешняя поверхность которой называется мениском. Отметим, что ошибочный сигнал обратной связи и неправильное управление процессом роста могут привести к необратимым последствиям – кристалл будет испорчен. Когда выращиваемые кристаллы имели сравнительно небольшой диаметр (до 150 мм), для измерения диаметра зоны кристаллизации использо-

вался линейный фотодетектор, расположенный на линии, оптически сопряженной с диаметром кристалла. Такая система используется в ростовых установках «Редмет-15», «Редмет-30», широко применяемых до настоящего времени в нашей стране. С увеличением диаметра кристалла линейный детектор практически становится непригодным, поскольку, во-первых, тело кристалла маскирует крайние точки диаметра, а, во-вторых, погрешность показаний линейного детектора существенно возрастает при колебаниях кристалла. В этом случае необходим двумерный датчик. В известной ростовой установке фирмы «Kayex» (США) для измерения диаметра зоны кристаллизации используется видеосистема [1]. Однако в ней применен интерактивный режим: оператор в течение плавки несколько раз с помощью микроскопа измеряет диаметр кристалла и калибрует датчик.

Цель данной работы – создать полностью автоматическую систему измерения диаметра зоны кристаллизации, в которой датчик калибруется 1 раз на конкретной ростовой установке.

Основные положения работы кратко изложены в [2]. В предлагаемой работе дается описание системы, используемых методов измерений и обработки данных, анализируются метрологические проблемы, приводятся результаты испытаний системы на тестовых объектах и на реальной ростовой установке. Отметим, что здесь не делается упор на конкретный вариант технической реализации системы. В принципе неважно, с помощью каких технических средств получено изображение зоны мениска. Основные требования к ним: отсутствие нелинейных искажений и достаточная разрешающая способность. Поэтому особое внимание уделяется процессу калибровки, обеспечивающему необходимые метрологические характеристики, и алгоритму обработки изображения зоны мениска в процессе роста. Алгоритм разработан на основе данных, полученных при испытаниях системы измерения диаметра кристалла на рабочей ростовой установке, проведенных в течение нескольких лет.

**Объект измерения.** Следует отметить, что «измерение диаметра кристалла» – условное название. В действительности нужно не измерять диаметр, а обеспечить такую регулировку процесса выращивания, которая позволит получить требуемый диаметр затвердевшего кристалла. Для этого необходимо определить тенденцию изменения диаметра, что возможно, если измерение проводить в зоне его кристаллизации, поскольку геометрия роста кристалла зависит от процессов, происходящих в данной зоне (зоне мениска) [3]. Рассмотрим возможность реализации процедуры определения тенденции роста кристалла по изображению зоны кристаллизации. Схема ростовой установки, обеспечивающей выращивание кристалла по методу Чохральского, с датчиком измерения диаметра (далее датчик диаметра) представлена на рис. 1.

Телевизионная камера направлена на зону мениска, диаметр которой изменяется от нескольких миллиметров до максимального диаметра кристалла (сотни миллиметров). На телевизионном изображении мениск выглядит как узкая полоска, опоясывающая кристалл и имеющая повышенную яркость по сравнению с яркостью свечения расплава и кристалла (рис. 2). В соответствии с [4] природа повышенной яркости обусловлена отражением в сторону наблюдателя излучения тел (тигля, стенок установки), имеющих повышенную температуру и излучательную способность по сравнению с расплавом, и концентрацией светового потока за счет кривизны мениска.

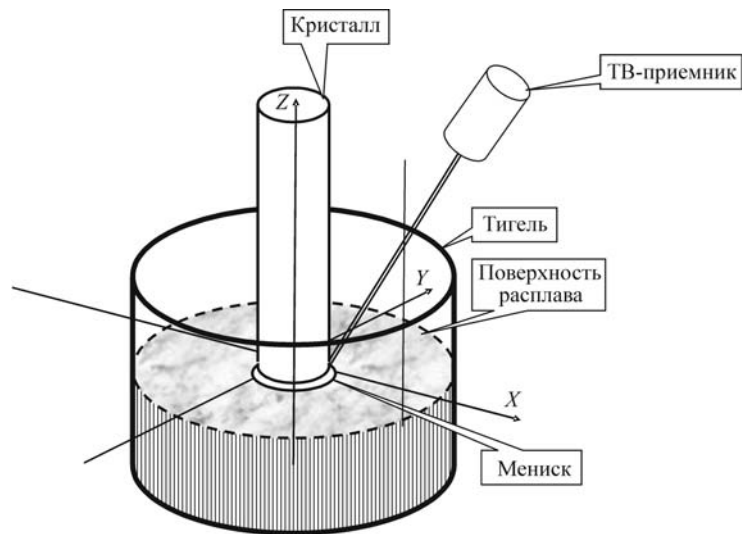


Рис. 1. Схема ростовой установки с датчиком диаметра

Рассмотрим возможность определения профиля мениска (а по нему – диаметра кристалла), исходя из структуры его телевизионного изображения. Когда выращивается кристалл большого диаметра – порядка десяти капиллярных постоянных  $a$  (для кремния  $a = 7,6$  мм) [5], функция сечения мениска плоскостью, проходящей через ось кристалла, для метода Чохральского описывается дифференциальным нелинейным уравнением второго порядка

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

где ось  $Z$  параллельна оси кристалла.

Точное решение этого уравнения невозможно, приближенное решение для трех вариантов процесса роста представлено на рис. 3. Как утверждается в [4], решение уравнения (1) хорошо аппроксимируется сегментом окружности. Этот сегмент, как видно из рисунка, либо сопрягается с кристаллом и поверхностью в случае нормального роста, либо «вдавливается» в кристалл, либо «выдавливается» из кристалла. Телевизионное изображение мениска представляет собой функцию яркости от геометрических координат (рис. 4). Графики сечений этой функции плоскостью, проходящей через ось  $Z$ , для трех стадий роста кристалла показаны на рис. 5. Направление сканирования сечения – от стенки тигля к оси кристалла.

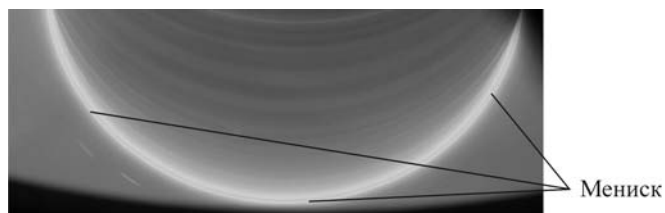


Рис. 2. Фотография зоны мениска

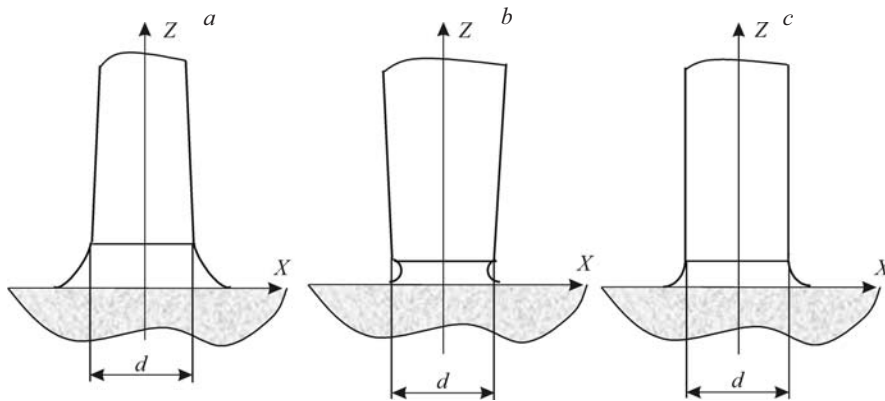


Рис. 3. Сечения зоны мениска в процессе роста кристалла: разрачивание кристалла (a), сужение (b) и нормальный рост (c)

Вид этого изображения можно объяснить следующим образом. Известно, что сферическая поверхность фокусирует плоскую волну в центре сферы. Наиболее высокую температуру имеют стенки тигля, причем характер их излучения подчиняется закону Ламберта. Поэтому максимальное значение функции на рис. 5 соответствует лучам, группирующимся вокруг линии, которая направлена от объектива телевизионного датчика к мениску. Биссектриса угла, образованного данной линией и нормалью к стенке тигля от точки ее пересечения с мениском, является нормалью к касательной к сечению мениска, проходящей через эту точку, как показано на рис. 6.

Сложнее объяснить различную крутизну участков слева и справа от максимального значения интенсивности. Как видно из рис. 4, 5, участок, обращенный к стенке тигля, значительно круче, чем обращенный к оси кристалла. Для объяснения этого факта необходимо знать не только распределение температуры внутри установки, но и расположение тепловых экранов, не показанных на рис. 1.

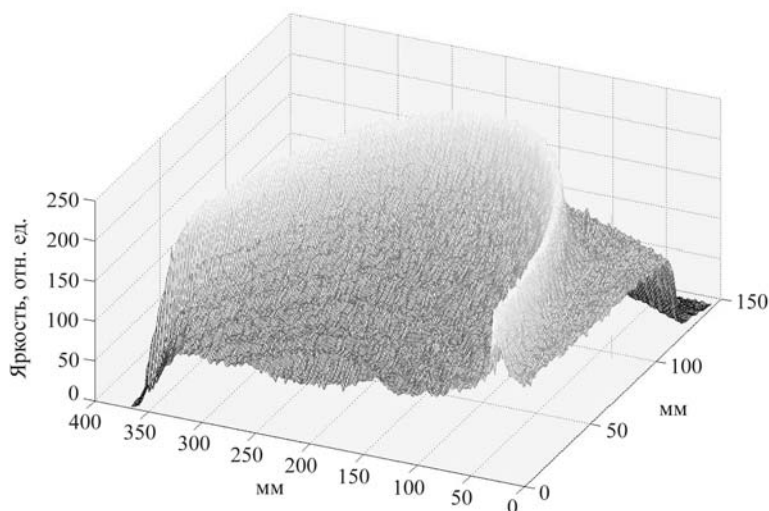


Рис. 4. Аксонометрическая проекция изображения, представленного на рис. 2

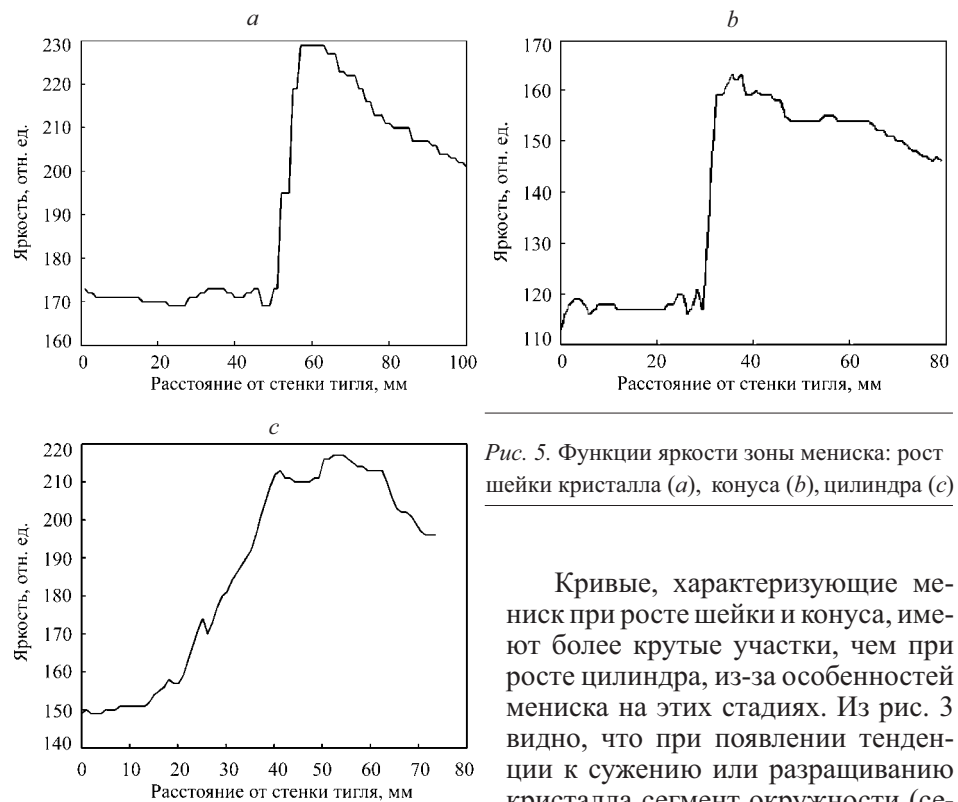


Рис. 5. Функции яркости зоны мениска: рост шейки кристалла (а), конуса (b), цилиндра (с)

Кривые, характеризующие мениск при росте шейки и конуса, имеют более крутые участки, чем при росте цилиндра, из-за особенностей мениска на этих стадиях. Из рис. 3 видно, что при появлении тенденции к сужению или разрачиванию кристалла сегмент окружности (сечение мениска) смещается, даже

если диаметр кристалла  $d$  еще не изменился. Соответственно смещается и сечение функции яркости мениска, из чего следует возможность регулировки диаметра не по отклонению от заданного, а по производной этого отклонения по времени (напомним, что максимум функции находится в центре окружности, сегментом которой является сечение мениска).

В то же время аналитически определить зависимость смещения мениска от скорости изменения диаметра кристалла чрезвычайно трудно, поэтому будем строить алгоритм обработки на основе экспериментальных данных. Из приведенных рисунков, а также из других экспериментальных данных, не представленных в предлагаемой работе, можно сделать вывод, что наиболее устойчивыми участками функций сечения являются крутые участки, обращенные к стенке тигля. Положения этих участков определяются максимумами производных от функций яркости мениска (рис. 7).

**Калибровка датчика.** Как уже отмечалось, требования к отклонению диаметра выращенного кристалла от заданного таковы, что погрешность датчика должна быть на уровне десятых долей процента. Погрешности па-

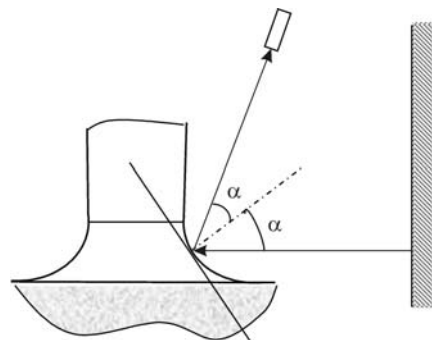


Рис. 6. Лучи, характеризующие зону максимального свечения мениска

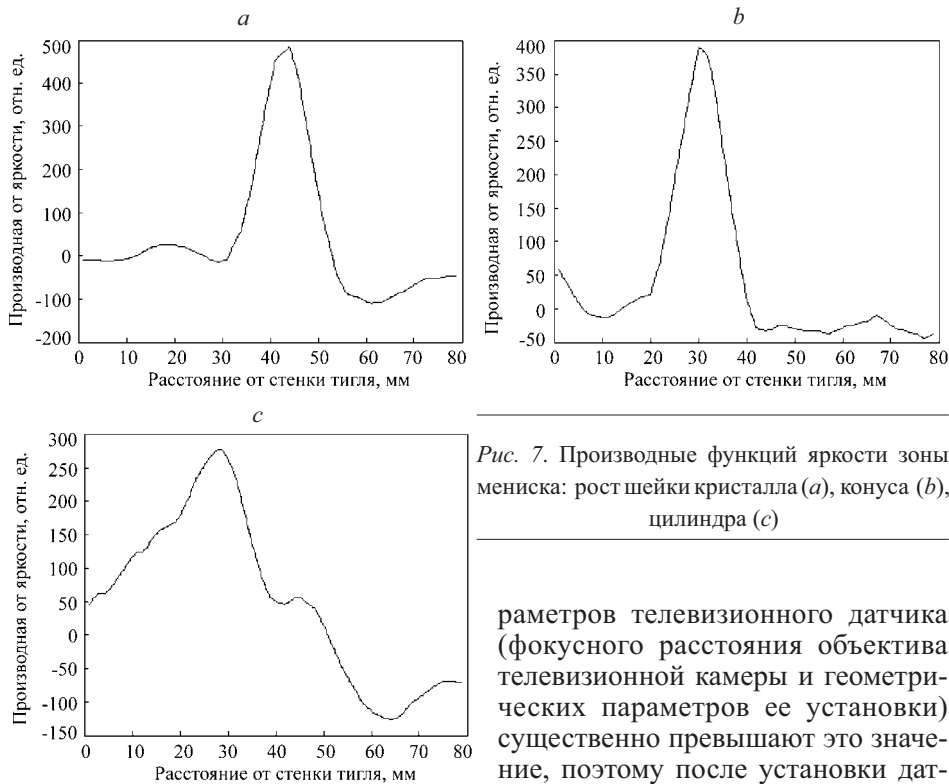


Рис. 7. Производные функций яркости зоны мениска: рост шейки кристалла (а), конуса (b), цилиндра (с)

раметров телевизионного датчика (фокусного расстояния объектива телевизионной камеры и геометрических параметров ее установки) существенно превышают это значение, поэтому после установки датчика необходимо произвести его калибровку. Суть ее заключается в

том, что в плоскость наблюдения, в которой при плавке находится мениск, помещается изображение с известными геометрическими параметрами (эталон). Его телевизионное изображение обрабатывается так, чтобы параметры телевизионного датчика автоматически вводились в алгоритм обработки.

В качестве эталона выбран прямоугольник с перекрестиями (рис. 8, а). Поскольку ось камеры неперпендикулярна плоскости наблюдения, его телевизионное изображение представляет собой трапецию, показанную в системе координат ПЗС-матрицы на рис. 8, б. Обозначим координаты в плоскости изображения через  $X, Y$ , а в плоскости фотоматрицы через  $x, y$ . Пусть координаты пересечения левой и правой стороны эталона с осями абсцисс будут  $X_2, X_1$  и  $x_2, x_1$ , а верхней и нижней стороны с осями ординат  $-Y_2, Y_1$  и  $y_2, y_1$  в плоскостях изображения и фотоматрицы соответственно. В идеальном случае (когда центр эталона совпадает с центром матрицы и ориентирован по координатным осям), положив  $X_2 = -X_1$  и  $Y_2 = -Y_1$ , преобразование по оси абсцисс из плоскости фотоматрицы в плоскость изображения можно представить в виде

$$X = \frac{xX_1}{x_1 + y \operatorname{tg} \alpha}, \quad (2)$$

а по оси ординат – в виде

$$Y = \frac{yY_1(y_2 - y_1)}{2y_1y_2 - y(y_1 + y_2)}, \quad (3)$$

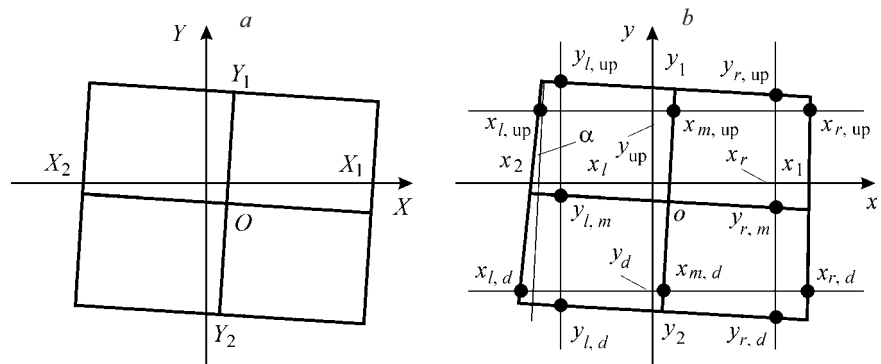


Рис. 8. Эталон для калибровки датчика диаметра: вид в плоскости изображения (а) и в плоскости фотоматрицы (б)

где  $\alpha$  – угол наклона боковых граней трапеции в плоскости фотоматрицы.

Однако с учетом того, что эталон помещается в зоне, труднодоступной для его ориентации (внутри ростовой установки), алгоритм обработки должен быть таким, чтобы отклонения положения эталона не влияли на точность калибровки. Нет необходимости в точном позиционировании эталона, так как в плоскости фотоматрицы определяются координаты точек пересечения двух горизонтальных и двух вертикальных линий с линиями эталона:  $(x_{l, \text{up}}, y_{\text{up}}; x_{m, \text{up}}, y_{\text{up}}; x_{r, \text{up}}, y_{\text{up}})$ ,  $(x_{l, d}, y_d; x_{m, d}, y_d; x_{r, d}, y_d)$ ,  $(x_{l, y_{l, \text{up}}}; x_{l, y_{l, m}}; x_{l, y_{l, d}})$ ,  $(x_{r, y_{r, \text{up}}}; x_{r, y_{r, m}}; x_{r, y_{r, d}})$  (см. рис. 8, б). Толщина линий эталона выбирается такой, чтобы в плоскости фотоматрицы иметь размер порядка элемента матрицы, а координаты пересечения секущей с линиями эталона находятся по минимуму сигнала. Это позволяет проводить квадратичную интерполяцию по трем точкам в окрестности полученного минимума с целью повышения точности определения его координат.

По координатам точек  $(x_{m, \text{up}}, y_{\text{up}}; x_{m, d}, y_d; x_{l, y_{l, m}}; x_{r, y_{r, m}})$  вычисляется смещение центра эталона относительно центра матрицы, а по координатам пересечения вертикальных линий с горизонтальными линиями эталона  $(x_{l, y_{l, \text{up}}}; x_{l, y_{l, m}}; x_{l, y_{l, d}}; x_{r, y_{r, \text{up}}}; x_{r, y_{r, m}}; x_{r, y_{r, d}})$  определяется его наклон. Затем влияние наклона и сдвига эталона компенсируется и вычисляются приведенные координаты  $y_1$  и  $y_2$ .

Аналогично по координатам пересечения горизонтальных секущих с вертикальными линиями эталона  $(x_{l, \text{up}}, y_{\text{up}}; x_{m, \text{up}}, y_{\text{up}}; x_{r, \text{up}}, y_{\text{up}}; x_{l, d}, y_d; x_{m, d}, y_d; x_{r, d}, y_d)$  находятся угол наклона боковых граней трапеции в плоскости фотоматрицы  $\alpha$  и приведенные координаты  $x_1$  и  $x_2$ .

**Алгоритм обработки изображения.** Рассмотрим теперь телевизионное изображение зоны мениска (рис. 9). Если бы с помощью одной камеры можно было всегда видеть точки мениска  $A, B$  (рис. 9, а), этого оказалось бы достаточно для нахождения диаметра. Однако расчет показывает, что крайние точки зоны мениска, лежащие на диаметре, будут маскироваться телом кристалла при достижении его цилиндрической частью высоты

$$L_{\text{кр}} \geq H_{\text{к}} \left( 1 - \frac{B^2 + \sqrt{R_{\text{м}}^2 R_{\text{кр}}^2 + B^2 (R_{\text{кр}}^2 - R_{\text{м}}^2)}}{\sqrt{B^2 + R_{\text{м}}^2}} \right),$$

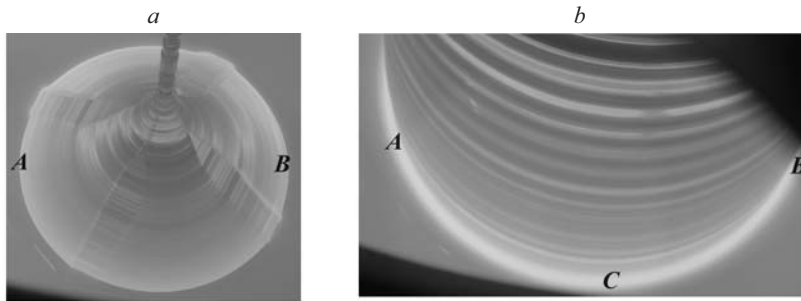


Рис. 9. Фотографии зон мениска на различных стадиях роста кристалла: конус (а), цилиндр (b)

где  $B$  – расстояние от оси кристалла до телевизионной камеры;  $H_k$  – высота установки телевизионной камеры над расплавом;  $R_{кр}$  – радиус кристалла;  $R_m$  – радиус мениска. В этом случае для определения мениска необходимо использовать точки, лежащие не на диаметре, а на хорде мениска, как показано на рис. 9, b. Учитывая, что положение центра кристалла неизвестно, поскольку в процессе роста он прецессирует (совершает колебательные движения), необходимо измерять координаты минимум трех точек мениска:  $A, B, C$ .

Отметим дополнительные факторы, которые следует учитывать при разработке алгоритма вычисления диаметра мениска.

1. Допустимая погрешность измерения диаметра составляет десятые и даже сотые доли процента. Телевизионные камеры с разрешением, обеспечивающим такую погрешность, чрезвычайно дороги, целесообразнее гарантировать требуемый уровень погрешности путем использования субпиксельной обработки.

2. В процессе роста на кристалле образуются кольца, отражения от которых в датчике могут обрабатываться как отражения от мениска; в итоге вместо диаметра мениска измеряется диаметр одного из этих колец.

3. По мере роста кристалла из-за перемещения тигля изменяются условия освещения мениска, в результате чего изменяется и контраст его телевизионного изображения.

Исходя из изложенного был принят следующий алгоритм определения диаметра мениска. Пусть изображение зоны мениска описывается функцией  $F(X, Y)$ . В память процессора это изображение записывается как массив данных  $f_{k,l}$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $1 \leq l \leq L$ , где  $K \times L$  – размер фотоматрицы. Обозначим массив как  $f(x, y)$ , строку –  $f_y(x)$ , а столбец –  $f_x(y)$ .

Поскольку в процессе роста кристалл может прецессировать, в зависимости от стадии его роста начальные этапы алгоритма обработки изображения поля наблюдения несколько видоизменяются.

Когда размер диаметра мениска заведомо больше величины смещения его центра в поле наблюдения, т. е. центральный столбец матрицы пересекает зону мениска, обработка начинается с данного столбца. Вычисляется производная  $f'_{x_m}(y) = \partial f_{x_m}(y) / \partial y$  вдоль столбца (для массива данных эта производная вычисляется как конечная разность, при этом, чтобы учесть третий фактор, влияющий на алгоритм, – уменьшение контраста в процессе роста, при вычислении производной используется интегродифференцирующий фильтр). Определяются координаты ее максимума  $(x_m, y_d) = \arg \max_y f'_{x_m}(y)$ .

Поскольку максимум производной может соответствовать отражению от од-



ного из колец кристалла, после нахождения  $(x_m, y_d)$  к  $y_d$  добавляется отрицательное приращение  $y_\delta = y_d - \delta$ , где  $\delta$  – величина, большая расстояния между возможными яркими отражениями от колец тела кристалла и мениском. Затем к  $y_\delta$  добавляются малые положительные приращения  $\tilde{\delta}$ , после каждого из которых проверяется соотношение  $f'_{x_m}(\tilde{y}_\delta) \geq k_d f'_{x_m}(y_d)$ , где  $\tilde{y}_\delta = y_\delta + n\tilde{\delta}$ ,  $n=1,2,\dots$ ;  $k_d \in [0,1]$  – некоторый наперед заданный коэффициент, определяющий порог производной относительно главного максимума. Если для  $\tilde{y}_\delta$  это условие выполняется, то вычисляется координата локального максимума  $\hat{y}_\delta$  в его окрестности, затем по нескольким точкам проводится аппроксимация кривой в окрестности  $\hat{y}_\delta$  и максимум этой кривой считается точкой мениска. В простейшем случае вместо аппроксимации может проводиться квадратичная интерполяция.

Далее выделяется соседний слева/справа столбец, при этом поиск максимума производной ведется уже в пределах заданного «окна» в окрестности найденной координаты  $\hat{y}_\delta$ . Таким образом последовательно выделяются точки дуги мениска до тех пор, пока выполняется условие  $f'_{x_{l/r}}(y_{l/r}) \geq k_{l/r} f'_{x_m}(y_d)$ , где  $x_{l/r}$  и  $y_{l/r}$  – координаты левой/правой границы мениска;  $k_{l/r} \in [0,1]$  – коэффициент, определяющий порог производной относительно центрального максимума при выборе этих точек. После нахождения точек, используемых при вычислении диаметра мениска, выполняется квадратичная интерполяция, обеспечивающая субпиксельность определения их координат. Поскольку выбранная нижняя точка может быть обусловлена бликом от ряби на поверхности расплава или отражением тела кристалла от зеркала расплава, для исключения таких фрагментов из рассмотрения проверяется расстояние между крайними найденными точками  $x_r - x_l$ . Если это расстояние оказывается меньше заданного предела, в центральном сечении выделяется следующий по  $y$  локальный максимум, и обработка повторяется.

После нахождения координат точек мениска в плоскости фотоматрицы они преобразуются в плоскость изображения мениска в соответствии с (2) и (3), лишь затем производится непосредственно вычисление диаметра мениска. Для этого используются три точки (две крайние и одна средняя). Такой метод позволяет при обработке последовательности кадров не проходить по всей дуге мениска, а проводить поиск требуемых точек только в заданных окнах, привязанных к предыдущим точкам и определяемых допустимой прецессией кристалла. Это значительно сокращает вычислительные затраты при нахождении точек мениска и определении его диаметра, за счет чего при сравнительно низкой производительности используемого процессора появляется возможность проводить усреднение найденного диаметра по серии измерений. Результаты вычислений, превышающие среднее значение более чем на заданную величину, отбраковываются.

На стадиях роста шейки и малого конуса кристалла радиус мениска может быть меньше величины смещения его центра в поле наблюдения. В этом случае необходим поиск мениска по всему изображению. Поскольку при обработке столбцов ведется поиск только одной нижней точки мениска, существует большая вероятность обнаружения ложных максимумов производной яркости (обусловленных, например, бликами от ряби на поверхности расплава), каждый из которых затем необходимо проверять на принадлежность мениску. Поэтому поиск ведется путем последовательной обработки строк матрицы. При этом в левой части строки ведется поиск  $(x_l, y_l) = \arg \max_x f'_y(x)$ , а

в правой –  $(x_r, y_r) = \arg \max_x (-f'_y(x))$  (в данном случае  $y_l = y_r$ ). Размеры левого и правого фрагментов строк выбираются такими, чтобы они захватывали соответственно левую и правую область мениска при наличии допустимой прецессии. Поиск продолжается до тех пор, пока не будут выполнены условия  $\max f'_y(x_l) \geq H$ ,  $\max (-f'_y(x_r)) \geq H$  ( $H$  – порог, задаваемый оператором) и  $\delta_{\min} \leq x_r - x_l \leq \delta_{\max}$  ( $\delta_{\min}$  и  $\delta_{\max}$  – минимальный и максимальный возможные размеры мениска). После этого выделяется столбец  $x_m = (x_r - x_l)/2$  посередине найденных максимумов и определяется координата нижней точки мениска  $(x_m, y_d) = \arg \max_y f'_{x_m}(y)$ . Если все три точки лежат на

дуге допустимого радиуса, по аналогии с предыдущим вариантом осуществляется поиск крайних точек, субпиксельная обработка, преобразование координат в плоскость изображения и вычисление диаметра мениска.

**Экспериментальные результаты.** Метрологические исследования датчика проводились путем измерения диаметров тестовых объектов, представляющих собой кольца (при малых диаметрах – круги), начерченные на лавсановой подложке. Погрешность диаметров тестовых объектов не более 0,01 мм. Геометрия измерения полностью соответствовала параметрам крепления датчика в ростовой установке. Тестовые объекты помещались в плоскость мениска, в процессе эксперимента их центры смещались на величину прецессии кристалла в ростовой установке. Результаты метрологических испытаний датчика диаметра при различных смещениях тестов в поле наблюдения представлены в таблице. Диаметры тестов измерены с помощью микроскопа. В последней колонке приведены максимальные погрешности показаний датчика диаметра.

Следует отметить, что экспериментальные исследования датчика диаметра на тестовых объектах не показательны, поскольку реальный измеряемый объект весьма специфичен и существенно отличается от тестов. Поэтому главным критерием качества работы датчика диаметра является его функционирование непосредственно в процессе плавки, когда он находится в

Диаметр теста, мм	Измеренный диаметр, мм			Максимальное отклонение, мм
	без смещения	смещение по радиусу установки	смещение перпендикулярно радиусу установки	
5,12	5,10 ... 5,14	5,09 ... 5,13	5,08 ... 5,14	-0,04 ... +0,02
10,12	10,09 ... 10,15	10,08 ... 10,15	10,08 ... 10,16	-0,04 ... +0,04
20,13	20,11 ... 20,17	20,08 ... 20,15	20,08 ... 20,17	-0,05 ... +0,04
49,71	49,66 ... 49,76	49,61 ... 49,77	49,65 ... 49,76	-0,10 ... +0,06
99,90	99,87 ... 99,92	99,87 ... 100,01	99,92 ... 100,02	-0,03 ... +0,12
149,37	149,33 ... 149,41	149,35 ... 149,47	149,30 ... 149,40	-0,07 ... +0,10
198,70	198,57 ... 198,61	198,58 ... 198,77	198,67 ... 198,85	-0,13 ... +0,15

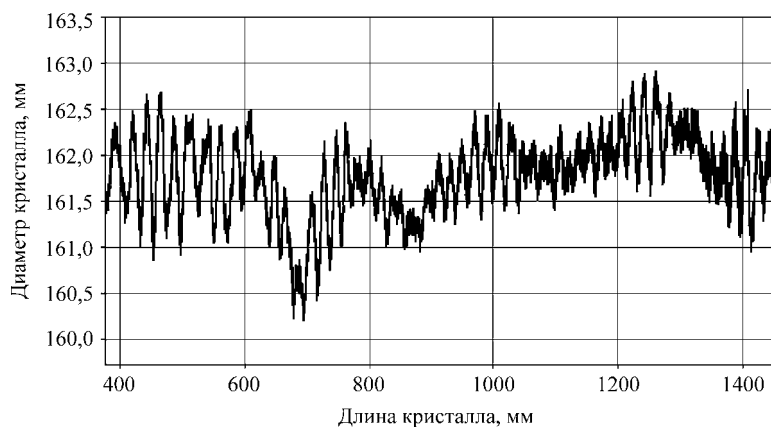


Рис. 10. Профиль выращенного кристалла

цепи обратной связи регулятора диаметра кристалла. Показания датчика диаметра, характеризующие профиль выращенного кристалла, приведены на рис. 10. Чтобы найти диаметр кристалла, необходимо уменьшить эти данные на условную ширину мениска (т. е. длину проекции отрезка, соединяющего зону максимальной концентрации светового потока и зону затвердевания кристалла, на плоскость, перпендикулярную оси кристалла). Очевидно, что изменение диаметра растущего кристалла определяется не только погрешностью работы датчика диаметра, но и качеством регулирования, зависящим, в свою очередь, от возможности управления процессом роста. К тому же, как отмечалось ранее, в случае нестационарного роста кристалла (разрачивания или подрезки) изменение показаний датчика диаметра опережает изменение диаметра кристалла.

Пример измерения диаметра реального кристалла приведен на рис. 11. При правильном центрировании отклонение двух кривых составляет не более 0,2 мм. Видно, что наибольшие отклонения показаний датчика от истинного диаметра наблюдаются на участках быстрого увеличения или уменьшения диаметра.

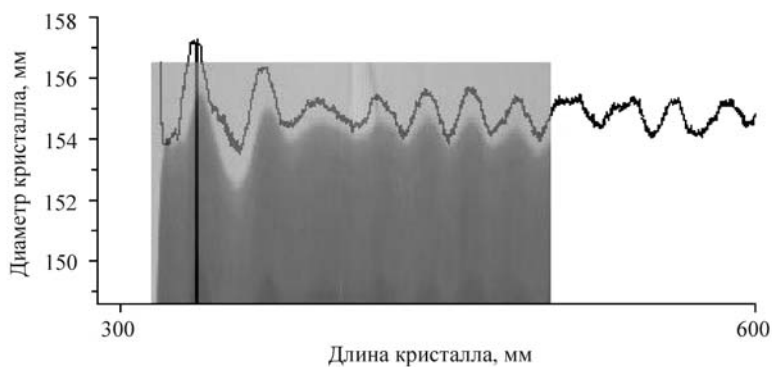


Рис. 11. Показания датчика диаметра, совмещенные с фотографией профиля кристалла

**Заключение.** Предлагаемый в данной работе датчик диаметра обеспечивает измерение мениска кристалла на стадии роста цилиндра с погрешностью не более  $\pm 0,1$  %, что соответствует точности, требуемой для регулировки диаметра кристалла. При этом учитываются многие специфические особенности характера изображения мениска, изменяющиеся в процессе плавки. Алгоритм калибровки датчика позволяет калибровать его непосредственно на ростовой установке с применением простейших средств (рисованные эталоны) без требования высокой точности их ориентирования относительно датчика и ростовой установки.

Разработанный алгоритм может применяться в телевизионных датчиках для измерения диаметра мениска растущего кристалла и дальнейшей регулировки его диаметра. Ввиду использования в алгоритме субпиксельной обработки предъявляются слабые требования к разрешению фотоматрицы, что позволяет достичь высокой точности измерения с помощью не слишком дорогого телевизионного датчика.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **CrystalVision** Diameter Control System // <http://www.kayex.com/crystalvision.asp>
2. **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.
3. **Вигдорович В. Н., Вольпян А. Е., Курдюмов Г. М.** Направленная кристаллизация и физико-химический анализ. М.: Химия, 1976.
4. **Шашков Ю. М.** Выращивание монокристаллов методом вытягивания. М.: Metallurgia, 1982.
5. **Татарченко В. А.** Устойчивый рост кристалла. М.: Наука, 1988.

*Поступила в редакцию 11 декабря 2007 г.*