

4. Zhizhuo W. Principles of photogrammetry. Beijing, China : Publishing House of Surveying and Mapping, 1990.

5. Furukawa Y., Ponce J. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis // IEEE Trans. on Pattern Analysis

and Machine Intelligence. 2009. Vol. 32. № 8. P. 1362–1376.

6. Wilson R. G. Tsai camera calibration software [Electronic resource] // URL: <http://www.cs.cmu.edu/~rgw/TsaiCode.html> (date of visit: 12.12.2010).

V. O. Rutkovskiy, M. A. Rutkovskaya

### METHOD OF 3D DIGITALIZATION OF TECHNICAL OBJECTS BASED ON ARTIFICIAL TEXTURES

*It is represented new method of passive refractive optical 3D scanning which is based on preliminary preprocessing of measured objects by creation on its surfaces of artificial textures and post processing on a different level of details.*

*Keywords: 3D-scanner, close range photogrammetry, passive optical measurement, texture, calibration.*

© Рутковский В. О., Рутковская М. А., 2010

УДК 004.7

С. П. Саханский, М. Е. Якобсон

### МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВЫТЯГИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

*Предложена математическая модель формирования скорости вытягивания на установке выращивания монокристаллов кремния по способу Чохральского, которая позволяет автоматизировать процесс ввода программного задания скорости в микропроцессорную систему управления.*

*Ключевые слова: скорость вытягивания, монокристалл кремния, осевой градиент.*

Управление скоростью вытягивания кристаллов полупроводниковых материалов, выращиваемых из расплава по способу Чохральского, заключается в следующем: во вращающемся вокруг своей оси с угловой скоростью  $W_T$  тигле с внутренним диаметром  $D$  находится жидкий расплавленный металл (рис. 1); кристалл диаметром  $d$  вытягивается из расплава со скоростью вытягивания  $V_3$  и угловой скоростью вращения  $W_3$ ; процесс проводится в камере, наполненной инертным газом аргоном. Общий вид микропроцессорной установки вытягивания кристаллов кремния приведен на рис. 2.

Температура расплава формируется за счет управления мощностью нагревателя на основе показаний датчика температуры  $T_3$  боковой поверхности нагревателя. Управление скоростью вытягивания кристаллов кремния по программе позволяет сформировать плоский фронт кристаллизации при выращивании прямого конуса, цилиндрической части и обратного конуса кристалла, что необходимо для многих марок кристалла и обеспечивает минимум дислокаций, т. е. нарушений монокристаллической структуры в выращенном монокристалле. Отклонение от цилиндрической формы по длине кристалла повышает вероятность образования дислокаций в местах перегиба формы, за счет повышенных механических напряжений в них, возникающих в процессе охлаждения кристалла.

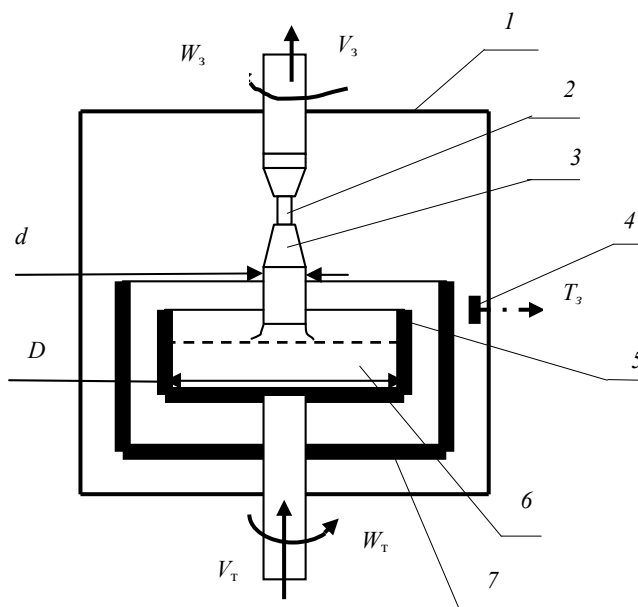


Рис. 1. Схема выращивания кристаллов кремния: 1 – камера; 2 – затравка; 3 – кристалл; 4 – датчик температуры; 5 – тигель; 6 – расплав металла; 7 – нагреватель

По данным многих исследователей [1–4], обеспечение условий получения плоского фронта кристаллизации при выращивании кристаллов кремния и германия (с необходимой величиной осевого градиен-

та температур в выращиваемом кристалле) позволяет получать кристаллы с совершенной структурой (минимумом дислокаций).

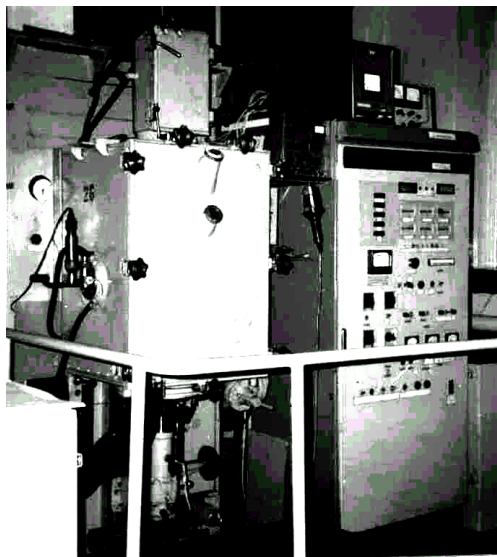


Рис. 2. Общий вид микропроцессорной установки вытягивания кристаллов кремния

Превышение скорости вытягивания кристалла кремния некоторой пороговой величины приводит к прогибу фронта кристалла вверх и отрыву фронта кристаллизации кристалла от расплава, т. е. к срыву процесса монокристаллического роста. Уменьшение скорости ниже другой пороговой величины приводит к опусканию фронта кристаллизации кристалла вниз и касанию твердой фазы фронта кристаллизации дна тигля, что ведет к поломке технологической оснастки и аварийной остановке процесса. Поэтому в практике выращивания монокристаллов кремния актуальной является проблема разработки математического аппарата для задания скорости вытягивания кристалла, исходя из условия плоского фронта кристаллизации. Для получения монокристаллов кремния высокого качества необходимо обеспечить форму фронта кристаллизации, близкую к плоской на участках выращивания прямого конуса, цилиндрической части и обратного конуса кристалла, что дает возможность получить одновременный устойчивый монокристаллический рост. Ниже приведены математические выражения для формирования закона изменения скорости вытягивания  $V_3(x)$ , которые позволяют автоматизировать процесс ввода этого параметра в систему управления установкой. Модель управления скоростью вытягивания (рис. 3) монокристалла кремния можно представить в виде выражения

$$V(x) = F(Z, Y, \lambda, L(x), x),$$

где  $\lambda$  – величина среднего перегрева расплава;  $x$  – координата перемещения вдоль оси кристалла;  $L(x)$  – линейный осевой градиент в твердом кристалле;  $Z$  – вектор задания геометрии выращиваемого кристалла;  $Y$  – вектор задания теплофизических параметров материала.

Математическую зависимость величины среднего перегрева расплава  $\lambda$  относительно температуры кристаллизации материала [3; 4] можно представить в виде следующего выражения:

$$\lambda = C_t \cdot \frac{(L - C_V \cdot V_3)}{d} \quad (1)$$

где  $C_V = \rho_{ж} \cdot \frac{E}{\lambda_{ТВ}}$ ;  $C_t = 4 \cdot \frac{\sigma \cdot \lambda_{ТВ}}{\rho_{ж} \cdot \lambda_{ж} \cdot g}$ ;  $\lambda = (T - T_k)$ ;

$V_3$  – скорость вытягивания кристалла;  $T_k$  – температура кристаллизации материала;  $T$  – температура расплава в зоне фронта кристаллизации;  $L$  – линейный осевой градиент в твердом кристалле;  $E$  – удельная теплота плавления материала;  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности расплава;  $\lambda_{ТВ}$  – коэффициент теплопроводности кристалла;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$  – диаметр кристалла;  $\sigma$  – поверхностное натяжение расплава.

В общем случае средний перегрев  $\lambda$  есть функция осевого градиента в кристалле  $L$  и скорости вытягивания кристалла  $V_3$ . Процесс управления основными параметрами выращивания кристалла показан на рис. 4.

Используя линейную аппроксимацию параметров на узловых участках выращивания кристалла, получены выражения для определения задания скорости вытягивания  $V_3(x)$  на конусной, цилиндрической части кристалла и при формировании обратного конуса соответственно:

$$V_3(x) = V_0 - \frac{x \cdot [V_0 - V_1]}{x_1} \quad (2)$$

$$V_3(x) = V_1 - \frac{(x - x_1) \cdot [V_1 - V_2]}{(x_2 - x_1)} \quad (3)$$

$$V_3(x) = V_2 + \frac{(x - x_2) \cdot [V_3 - V_2]}{(x_3 - x_2)} \quad (4)$$

где  $V_0$  – начальная скорость вытягивания кристалла;  $V_1$  – скорость вытягивания кристалла при завершении формирования обратного конуса;  $V_2$  – скорость вытягивания кристалла при завершении формирования цилиндра;  $V_3$  – скорость вытягивания кристалла при завершении формирования обратного конуса;  $x_1$  – координата завершения формирования прямого конуса кристалла;  $x_2$  – координата завершения формирования цилиндрической части кристалла;  $x_3$  – координата завершения формирования обратного конуса кристалла;  $x$  – координата перемещения вдоль оси кристалла.

Для автоматического определения значений координат скорости вытягивания в узловых точках ( $V_0, V_1, V_2, V_3$ ) преобразуем выражение (1) к виду выражения (5), введя технологические поправочные коэффициенты  $\beta_i$ :

$$V_3(d) = \left[ L - \frac{\lambda \cdot d_3}{C_t} \right] \cdot \frac{\beta_t}{C_V} \quad (5)$$

где  $V_3(d)$  – скорость вытягивания кристалла;  $d_3$  – заданное диаметра кристалла на прямом конусе, цилиндрической части и обратном конусе;  $\beta_t$  – технологический коэффициент снижения скорости (0,9...0,7).

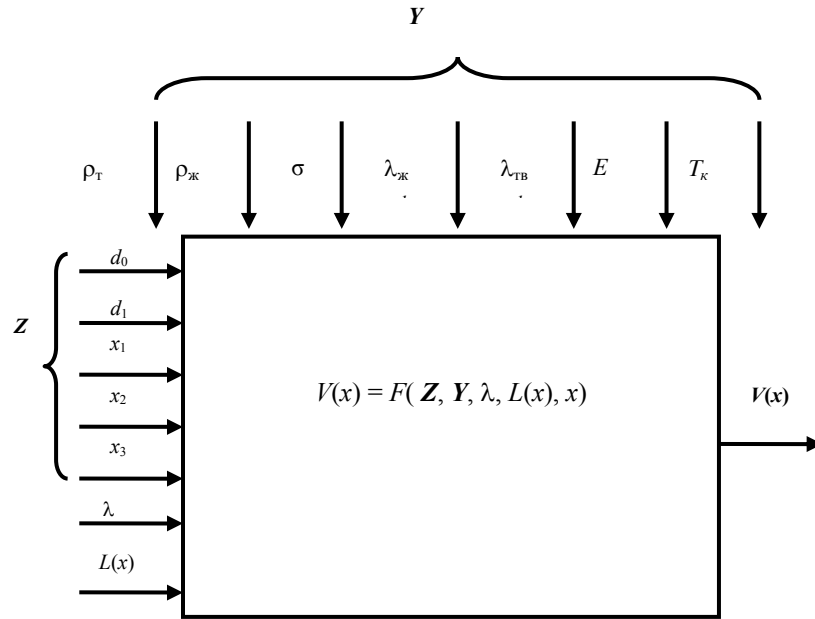


Рис. 3. Модель управления скоростью вытягивания монокристалла кремния

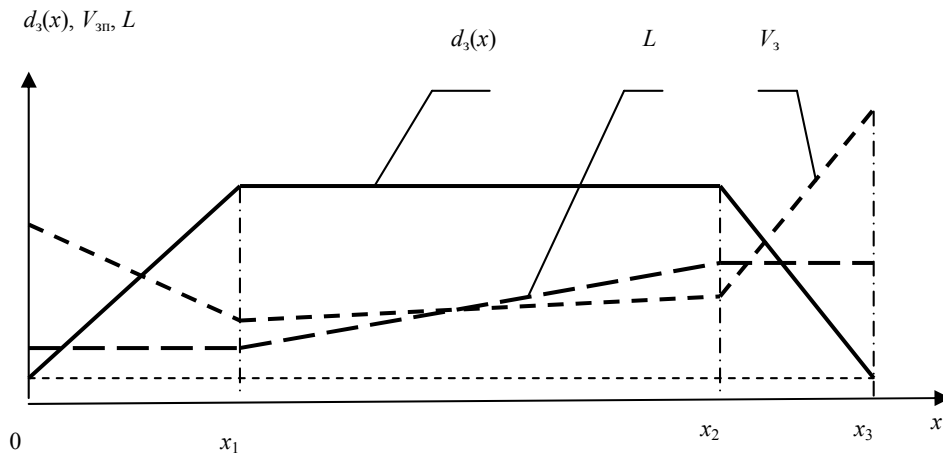


Рис. 4. Задание параметров процесса выращивания кристаллов:  
 $d_3(x)$  – задание диаметра;  $V_3$  – задание скорости вытягивания;  $L$  – задание осевого градиента;  
 $x$  – перемещение вдоль оси кристалла

Из (5) для узловых точек скорости вытягивания получим выражения:

$$V_0 = \left[ L_0 - \frac{\lambda \cdot d_0}{C_t} \right] \cdot \frac{\beta_0}{C_v}; \quad (6)$$

$$V_1 = \left[ L_0 - \frac{\lambda \cdot d_1}{C_t} \right] \cdot \frac{\beta_1}{C_v}; \quad (7)$$

$$V_2 = \left[ L_1 - \frac{\lambda \cdot d_1}{C_t} \right] \cdot \frac{\beta_2}{C_v}; \quad (8)$$

$$V_3 = \left[ L_1 - \frac{\lambda \cdot d_0}{C_t} \right] \cdot \frac{\beta_3}{C_v}; \quad (9)$$

где  $L_0$  – осевой градиент в начале цилиндрической части кристалла;  $L_1$  – осевой градиент в конце цилиндрической части кристалла;  $V_0, V_1, V_2, V_3$  – узловые точки скорости вытягивания;  $d_0$  – диаметр вытягиваемой шейки кристалла;  $d_1$  – диаметр цилиндрической части кристалла.

Технологические поправочные коэффициенты  $\beta_i$  введены для корректировки скорости вытягивания, исходя из технологических требований (например, равномерности легирования кристалла по его длине, при допущении некоторой величины прогиба фронта кристаллизации). Осевой градиент в выращиваемом кристалле кремния можно рассчитать на основе непрерывного измерения температуры пирометром в области выращивания на боковой поверхности кри-

сталла (на расстоянии 8...10 мм от расплава) в процессе роста, при этом пирометр устанавливается на смотровое окно камеры установки вытягивания. Другим способом определения осевого градиента в выращиваемом кристалле является метод непрерывного измерения температуры термодарами (введенными в камеру установки), вблизи боковой поверхности выращиваемого кристалла. Применяя микропроцессорные системы управления выращиванием кристаллов кремния, вычисление осевого градиента можно автоматизировать. На основе выражений (1)–(9), с подстановкой в них физических постоянных полупроводникового материала кремния [5], на рис. 5 и 6 при-

веден пример моделирования задания диаметра кристалла кремния и его скорости вытягивания на всех участках.

Моделирование скоростей вытягивания кристаллов кремния и германия [4] показало, что рабочий диапазон скорости вытягивания германия (0,2...1 мм/мин) и кремния (2...10 мм/мин) отличается на порядок, что согласуется с теплофизическими параметрами данных материалов. Основной трудностью для применения данной модели при выращивании монокристаллов кремния является практическое измерение и вычисление осевых градиентов при выращивании новых марок кристаллов.

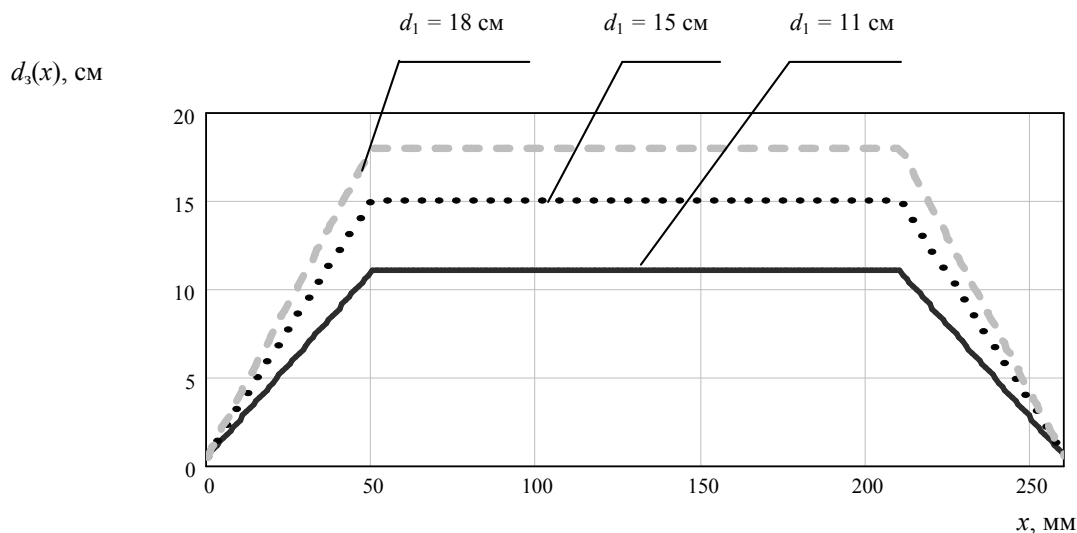


Рис. 5. Задание диаметра кристалла кремния: при  $x_1 = 50$  мм;  $x_2 = 210$  мм;  $x_3 = 260$  мм;  $d_0 = 0,5$  см

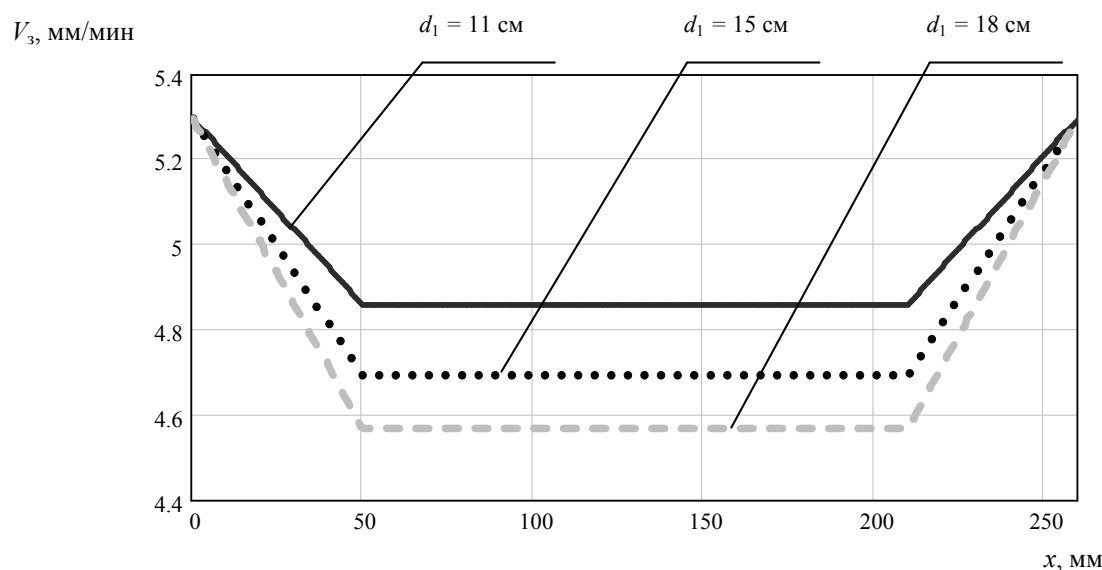


Рис. 6. Задание скорости вытягивания кристалла кремния: при  $\lambda = 0,2$  °C;  $L_0 = 15$  °C/см;  $L_1 = 15$  °C/см;  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0,8$ ;  $d_0 = 0,5$  см;  $x_1 = 50$  мм;  $x_2 = 210$  мм;  $x_3 = 260$  мм;  $d_0 = 0,5$  см

Итак, предложена математическая модель формирования скорости вытягивания монокристаллов кремния, выращиваемых по способу Чохральского. Это позволяет автоматизировать процесс ввода параметра скорости в систему управления и сокращает цикл производства готовой продукции требуемого качества, обеспечивая при выращивании кристалла форму фронта кристаллизации, близкую к плоской.

#### Библиографические ссылки

1. Лоусон У. Д., Нильсен С., Херл Д. Т. Процессы роста и выращивание монокристаллов : пер. с англ. / под ред. Н. Н. Шефталя. М. : Изд-во иностр. лит., 1963.

2. Kumaragurubaran S., Subramanian C. Growth of paratellurite crystals: effect of axial temperature gradient on the quality of the crystals // Crystal Growth. 2000. Vol. 211. P. 276–280.

3. Саханский С. П. Управление скоростью вытягивания на установке выращивания монокристаллов германия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 4. С. 7–11.

4. Саханский С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.

5. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мелихова. М. : Энергоатомиздат, 1991.

S. P. Sakhanskiy, M. E. Yakobson

### PULLING RATE ASSIGNMENT OF SILICONIUM SINGLE CRYSTALS GROWING

*Mathematical expression was offered to form pulling set on silicon monocrystal growing system by Czochralski which allows to automate the process of introduction of programmed set of speed in microprocessor control system.*

*Keywords: speed pulling, silicon single crystal, axial gradient.*

© Саханский С. П., Якобсон М. Е., 2010

УДК 621.317.7.023

А. А. Шауэрман, М. С. Жариков, А. В. Борисов

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

*Описано применение логарифмического усилителя для построения измерителя комплексного коэффициента отражения (ККО) оконечных устройств диапазона СВЧ. Рассмотрены методы измерения ККО датчиком, параметры которого уточняются в процессе калибровки. Проанализированы источники неопределенности измерений.*

*Ключевые слова: комплексный коэффициент отражения, СВЧ-измерение, логарифмический усилитель, датчик.*

Интенсивное развитие систем радиосвязи, в частности спутниковой связи, расширение частотного диапазона, ставит проблему создания точных радиоизмерительных приборов. В настоящее время отечественной промышленностью выпускается явно недостаточное количество таких приборов. Особенно это касается СВЧ-диапазона, который используется в спутниковой связи. От точности согласования антенно-фидерных устройств в диапазоне рабочих частот существенно зависит эффективность передачи информации по каналам связи.

Основным параметром, характеризующим степень согласования высокочастотного тракта, является комплексный коэффициент отражения – комплексная величина, равная отношению амплитуд отраженной и падающей волны. На сегодняшний день для измере-

ния ККО существуют различные приборы, обладающие высокой точностью и широким диапазоном, но стоимость таких приборов не позволяет применять их массово. Другой класс недорогих приборов способен измерять только модуль коэффициента отражения, что не всегда достаточно. Поэтому актуальной задачей является разработка прибора для измерения комплексного коэффициента отражения, с низкой стоимостью.

В самом простейшем случае ККО можно определить с помощью измерителя комплексных отношений, на один вход которого подается отраженная волна, а на второй – сигнал с генератора. Падающая и отраженная волны могут быть выделены с помощью направленных ответвителей. В этом случае ККО определяется по формуле