

УДК 621.315.592

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТЕПЛООВОГО УЗЛА И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ СЛИТКОВ ГЕРМАНИЯ ДИАМЕТРОМ 100 ММ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО**

**А. П. Оксанич, В. В. Малеваний**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: [oksanich@kdu.edu.ua](mailto:oksanich@kdu.edu.ua)

Исследовалось тепловое поле и условия тепломассопереноса в установке выращивания слитков германия методом Чохральского для расчета оптимальных параметров тепловых экранов. Предложен подход, заключающийся в установлении закономерностей влияния геометрии теплового экрана на распределении температур в рабочей зоне ростовой установки и в выращиваемом слитке. Показано, что применение весового метода при автоматизированном контроле и поддержании диаметра позволяет выращивать слитки германия диаметром 100 мм и плотностью дислокаций  $< 10^3 \text{ см}^{-2}$ .

**Ключевые слова:** тепловой узел, весовой метод, градиент температуры.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ТЕПЛООВОГО ВУЗЛА І РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ ЗЛИТКІВ ГЕРМАНІЯ ДІАМЕТРОМ 100 ММ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО**

**А. П. Оксанич, В. В. Мальований**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: [oksanich@kdu.edu.ua](mailto:oksanich@kdu.edu.ua)

Досліджувалося теплове поле і умови тепломасопереносу в установці вирощування злитків германію методом Чохральського для розрахунку оптимальних параметрів теплових екранів запропонований підхід, що полягає у встановленні закономірностей впливу геометрії теплового екрану на розподілі температур у робочій зоні ростової установки і в вирощували злитку. Показано, що застосування вагового методу при автоматизованому контролі і підтримці діаметру дозволяє вирощувати злитки германію діаметром 100мм і щільністю дислокацій  $< 10^3 \text{ см}^{-2}$ .

**Ключові слова:** тепловий вузол, ваговий метод, градієнт температури.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Современные темпы развития оптоэлектроники с одной стороны, связаны с успехами в области полупроводниковой технологии, с другой обуславливают все более жесткие требования к качеству производимых монокристаллов германия. Кроме того эти требования ужесточились после того, как германий стал широко применяться в фотоэнергетике как подложечный материал при создании многокаскадных гетероструктур в изготовлении фотоэлектрических преобразователей.

Однако выращивание структурносовершенных монокристаллов германия большого диаметра (свыше 100 мм) сопряжено со значительными материальными затратами. В выращенных монокристаллах германия наблюдается образование и размножение дислокаций различного типа. Иногда они группируются в скопления, линии скольжения, сильно ухудшающие структуру слитка. Для многих областей применения монокристаллов германия наличие дислокаций, особенно их скопление нежелательно. Исследованиями [1] установлена прямая связь между величинами температурных градиентов температурными напряжениями и количеством дислокаций.

Термические напряжения, возникающие в процессе охлаждения слитка, частично снимаются при появлении дислокаций. В свою очередь дислокации вызывают напряжения в выращенном кристалле после его охлаждения. Термические напряжения можно уменьшить подбором параметров теплового узла и условий выращивания, обеспечивающими уменьшение градиентов температуры в слитках в

процессе выращивания и охлаждения. Исследования показывают, что особенности экранировки существенно влияют на характер роста (дислокационный или бездислокационный) и структуру выращиваемого монокристалла [2, 3].

Поскольку физические эксперименты на серийных ростовых установках затруднены, а разработка и изготовление экспериментальной установки требует проведения предварительных исследований, то математическое моделирование, позволяющее с помощью установленных критериальных закономерностей оптимизировать выбор конструктивных параметров ростового оборудования и технологических параметров процесса выращивания слитков германия, является весьма актуальной задачей.

Цель работы – построить математическую модель, аналитически связывающую геометрические параметры теплового узла с уравнением тепловых потоков излучения, циркулирующих методом элементами теплового узла.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Указанный выше подход позволяет решать основную задачу – создать оптимальную конструкцию ростовой установки для производства слитков германия диаметром 100 мм с уровнем плотности дислокаций  $< 10^3 \text{ см}^{-2}$ .

Тепловые узлы существующих в настоящее время установок по выращиванию слитков германия по методу Чохральского включают тепловые экраны для обеспечения оптимального теплового режима растущего слитка, в зоне примыкающего к фронту

кристаллизации. Для решения задачи выбора формы размеров и расположения экранов используют метод вычислительных экспериментов [4, 5] на основе локальных тепловых моделей строиться численное решение задачи тепломассопереноса. При этом задается конфигурация и геометрические параметры теплового узла и с помощью программного пакета строиться сетка конечных элементов. Далее в программу вводятся граничные условия и, получив решение в числовом и графическом виде, устанавливают эмпирическую связь между размерами и расположением экранов, температурными полями и градиентами. Чтобы установить такую связь приходится многократно перестраивать конфигурацию теплового узла, заново вводить геометрические параметры, строить сетку конечных элементов.

Для расчета оптимальных параметров теплового узла предлагается другой подход, заключающийся в установлении закономерностей влияния геометрии теплового экрана на распределение температур в рабочей зоне ростовой установки и в выращиваемом слитке.

Для установления таких закономерностей требуются найти аналитические зависимости между геометрическими параметрами теплового экрана и параметрами тепловых потоков в тепловом узле.

*Математическая модель геометрии теплового узла.* Математическая модель геометрии теплового узла связывает координаты относительного взаимного расположения поверхностей слитка, экрана, тигля и расплава с угловыми коэффициентами, определяющими потоки теплового излучения и отражения слитка и других упомянутых элементов теплового узла.

Из теории теплопередачи известно, что элементарный угловой коэффициент, определяющий долю теплового потока от элементарной площадки  $dF_1$  к элементарной площадке  $dF_2$  равен [6]:

$$j dF_1 - dF_2 = \frac{\cos y_1 \cos y_2}{pr^2} dF_2, \quad (1)$$

где  $y_i, y_j$  – углы между нормальными к элементарным площадкам  $dF_i$  и  $dF_j$  и линией, соединяющей центры площадок,  $r$  – расстояние между центрами площадок.

На основании (1), переходя к конечным величинам, запишем локальный угловой коэффициент, определяющий долю теплового потока, идущего от элементарной площадки  $DF_1$  к поверхности с площадью  $F_2$ :

$$j \Delta F_1 - F_2 = \sum_{j=1}^{L_2} \frac{\cos y_1 \cos y_j}{pr^2} \Delta F_j, \quad j = \overline{1, L_2}, \quad (2)$$

где  $L_2$  – число элементарных площадок на поверхности  $F_2$ .

Для рассматриваемого случая теплового взаимодействия цилиндрического слитка и цилиндрического экрана имеем элементарную цилиндрическую площадку на поверхности слитка и элементарную цилиндрическую площадку на внутренней поверхности экрана. Примем высоту  $h$  элементарных площадок одинаковой.

Выразим величину локального углового коэффициента между элементарной площадкой слитка и экраном, опираясь на геометрические соображения. На рис. 1 схематически показан разрез фрагмента теплового узла, включающего слиток и экран. Осевая координата  $i$ -той элементарной площадки слитка обозначена  $z_{ci}$ . Нулевым уровнем координаты  $z_c$  является поверхность расплава. Осевая координата  $j$ -той элементарной площадки экрана обозначена  $z_{cj}$ . Нулевым уровнем этой координаты является нижняя кромка экрана, приподнятая над расплавом на высоту  $H_э$ . Таким образом, в системе отсчета, привязанной к слитку, можно учесть вместе с координатой  $z_{cj}$  высоту расположения экрана  $H_э$ .

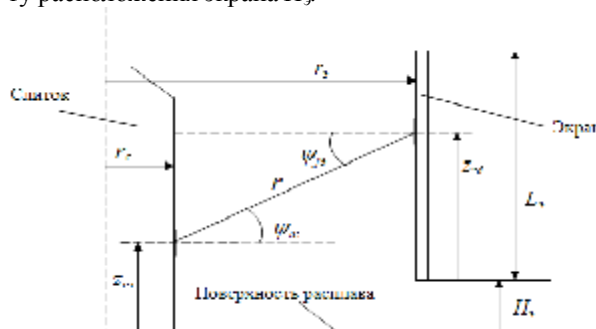


Рисунок 1 – Геометрические параметры поверхностей:  $z_{ci}$  – дискретная осевая координата слитка;  $z_{cj}$  – дискретная осевая координата экрана;  $H_э$  – высота расположения экрана над расплавом;  $L_э$  – длина экрана

Анализируя рис. 1, можно отметить, что  $y_i = y_j$ , откуда  $\cos y_i = \cos y_j$ , а кратчайшее расстояние между поверхностью слитка и поверхностью экрана  $R = r_s - r_c$ . Следовательно, длина луча, соединяющего элементарные площадки слитка и экрана, может быть рассчитана как

$$s_{ij} = \sqrt{(r_s - r_c)^2 + (z_{cj} + H_э - z_{ci})^2} \quad (3)$$

Тогда косинусы углов падения-отражения луча можно выразить через величины  $r_c, r_s, H_э$ :

$$\cos y_i = \cos y_j = \frac{r_s - r_c}{\sqrt{(r_s - r_c)^2 + (z_{cj} + H_э - z_{ci})^2}}. \quad (4)$$

Отсюда

$$j \Delta F_i - F_э = \frac{\Delta F_j L_э}{p} \sum_{j=1}^{L_э} \frac{(r_s - r_c)^2}{((r_s - r_c)^2 + (z_{cj} + H_э - z_{ci})^2) \sqrt{(r_s - r_c)^2 + (z_{cj} + H_э - z_{ci})^2}}, \quad j = \overline{1, L_э} \quad (5)$$

Учитывая, что площадь элементарной поверхности экрана равна  $DF_э = 2pr_э h$ , запишем:

$$j \Delta F_i - F_э = 2r_э h \sum_{j=1}^{L_э} \frac{(r_s - r_c)^2}{[(r_s - r_c)^2 + (z_{cj} + H_э - z_{ci})^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad j = \overline{1, L_э} \quad (6)$$

Используя аналогичные рассуждения, запишем выражение для локального углового коэффициента между элементарной площадкой экрана и поверхностью слитка:

$$j_{\Delta F_j-F_c} = 2r_c h \sum_{i=1}^{L_c} \frac{(r_s - r_c)^2}{\left[ (r_s - r_c)^2 + (z_{sj} + H - z_{ci})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, i = \overline{1, L_c}, \quad (7)$$

где  $L_c$  – количество элементарных площадок на поверхности слитка.

Для пары поверхностей «слиток–тигель» можно записать аналогичные выражения:

$$j_{\Delta F_i-F_T} = 2r_T h \sum_{j=1}^{L_T} \frac{(r_T - r_c)^2}{\left[ (r_s - r_c)^2 + (z_{sj} + H - z_{ci})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, j = \overline{1, L_T} \quad (8)$$

$$j_{\Delta F_{jT}-F_c} = 2r_c h \sum_{i=1}^{L_c} \frac{(r_T - r_c)^2}{\left[ (r_s - r_c)^2 + (z_{sj} + H - z_{ci})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, i = \overline{1, L_c} \quad (9)$$

Однако здесь необходимо учесть, что экран в нижних положениях частично затеняет излучение тигля, и при вычислении угловых коэффициентов следует проверять условия:

1) угол падения луча из точки  $z_{jT}$  должен быть меньше, чем угол падения луча из точки  $z_{jS}=H_s$ , если  $z_{jT} > H_s$ .

2) Угол падения луча из точки  $z_{jT}$  должен быть больше, чем угол падения луча из точки  $z_{jS}=H_s$ , если  $z_{jT} < H_s$ .

Обозначив предикат условия прохождения луча от точки на поверхности тигля к точке на поверхности слитка  $P_{tc}$ , запишем условия (1) и (2) в виде:

$$P_{tc} = \left( \arccos \frac{r_s - r_c}{\sqrt{(r_s - r_c)^2 + z_{jT}^2}} < \arccos \frac{r_s - r_c}{\sqrt{(r_s - r_c)^2 + H_s^2}} \right) \cap (z_{jT} > H_s) \cup \left( \arccos \frac{r_s - r_c}{\sqrt{(r_s - r_c)^2 + z_{jT}^2}} > \arccos \frac{r_s - r_c}{\sqrt{(r_s - r_c)^2 + H_s^2}} \right) \cap (z_{jT} < H_s) \quad (10)$$

Рассмотрим пару поверхностей «слиток–расплав». Рисунок 2 поясняет связь между углами  $U_{ic}$ ,  $U_{\phi j}$  и координатами рабочих точек на поверхностях.

Выражения для косинусов данных углов имеют следующий вид:

$$\text{Cos} U_{ci} = \frac{r_{\phi j} - r_c}{\sqrt{(r_{\phi j} - r_c)^2 + z_{ci}^2}} \quad (11)$$

$$\text{Cos} U_{\phi j} = \frac{z_i}{\sqrt{(r_{\phi j} - r_c)^2 + z_{ci}^2}} \quad (12)$$

Тогда выражения для локальных угловых коэффициентов можно записать следующим образом:

От элементарной поверхности слитка к поверхности расплава:

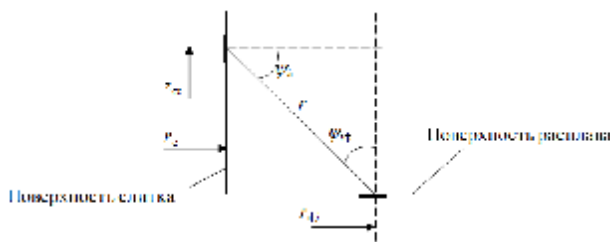


Рисунок 2 – Геометрические параметры пары поверхностей «слиток–расплав»

$$j_{\Delta F_i-F_{\phi}} = 2d \sum_{j=1}^{L_{\phi}} \frac{\Delta F_{\phi j} z_i (r_{\phi j} - r_c)}{z_i^2 + (r_{\phi j} - r_c)^2}, j = \overline{1, L_{\phi}}, \quad (13)$$

От элементарной поверхности расплава к поверхности слитка:

$$j_{\Delta F_{\phi j}-F_c} = 2r_c h \sum_{j=1}^{L_c} \frac{z_{ci} (r_{\phi j} - r_c)}{z_{ci}^2 + (r_{\phi j} - r_c)^2}, j = \overline{1, L_c} \quad (14)$$

где  $DF_{\phi j} = 2pr_{\phi j}d$  – площадь элементарной кольцевой площадки на поверхности расплава,  $d$  – принятая ширина площадки.

Здесь также необходимо учесть частичное затенение излучения расплава экраном и при вычислении угловых коэффициентов следует проверять условие: угол падения луча из точки  $z_{\phi j}$  должен быть больше, чем угол падения луча из точки  $z_s=H_s$ , т.е.

$$P_{\phi c} = \arctg \frac{z_{ic}}{r_{\phi j} - r_c} > \arctg \frac{z_{ic} - H_s}{r_s - r_c}, \quad (15)$$

где  $P_{\phi c}$  – предикат условия прохождения луча от точки на поверхности расплава к точке на поверхности слитка.

Выражения (6)–(10) и (13)–(15) составляют математическую модель теплового узла, которая аналитически связывает координаты расчетных точек теплового узла с угловыми коэффициентами.

Покажем связь между угловыми коэффициентами и тепловыми потоками. Полный тепловой поток излучения между элементарной поверхностью слитка с площадью  $DF_i$  и температурой  $T_i$  на поверхность экрана:

$$q_{i\sigma} = \sigma_0 e_{\text{пз}} \left( \Delta F_c T_i^4 \sum_{j=1}^{L_s} j_{ij}^{\sigma} - \Delta F_s \sum_{j=1}^{L_s} j_{ji}^{\sigma} T_j^4 \right), \quad (16)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $e_{\text{пз}} = \frac{1}{e_c} + \frac{1}{e_s} - 1$  – приведённая (с учетом переотражений) степень черноты слитка и экрана,  $j_{ij}^{\sigma}$  – элементарный угловой коэффициент между  $i$ -й элементарной поверхностью слитка и  $j$ -й элементарной поверхностью экрана,  $j_{ji}^{\sigma}$  – элементарный угловой коэффициент между  $j$ -й элементарной поверхностью экрана и  $i$ -й элементарной поверхностью слитка,  $T_j$  – температура  $j$ -й элементарной поверхности экрана.

Тогда с учетом выражений (4)–(7) полный тепловой поток  $q_{i\sigma}$  запишем в виде:

$$q_{i\sigma} = 2hs_0 e_{\text{пз}} \left( r_c T_i^4 \sum_{j=1}^{L_s} \frac{(r_s - r_c)^2}{\left[ (r_s - r_c)^2 + (z_{sj} + H - z_{ci})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - r_s \sum_{j=1}^{L_s} \frac{(r_s - r_c)^2 T_j^4}{\left[ (r_s - r_c)^2 + (z_{sj} + H - z_{ci})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (17)$$

Аналогично можно записать и уравнения полных тепловых потоков между парами «слиток–тигель» и «слиток–расплав».

Для проверки адекватности полученной модели геометрии теплового узла был проведен вычислитель-

ний експеримент, в якому визначалось осеве розподілення температури на поверхні слитка. Значення основних геометричних параметрів були вибрані наступні: довжина циліндричної частини слитка – 180 мм; довжина екрана – 120 мм, радіус слитка – 25 мм, радіус екрана – 50 мм, радіус тигля – 75 мм, висота розташування екрана над флюсом – 50 мм.

В якості граничних умов використовувались априорно задане розподілення температур на поверхні флюса, заданна температура внутрішньої відкритої поверхні тигля і розподілення температур на поверхні екрана. Температура на поверхні екрана була виміряна за допомогою термопар і зафіксована в вигляді таблиці експериментальних даних. Для кожної термопары в графітовому екрані висверлювалось отвір. Схема розташування термопар вздовж внутрішньої стінки екрана показана на рис. 3. В табл. 1 показані усередненні значення температур, виміряні в процесі експерименту.

Таблиця 1 – Розподілення температур на поверхні екрана

|       |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| № Тп  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
| T, °C | 681 | 656 | 628 | 599 | 560 | 515 | 472 |
| № Тп  | 8   | 9   | 10  | 11  | –   | –   | –   |
| T, °C | 426 | 378 | 335 | 285 | –   | –   | –   |

Вивчення проводились методом мінімізації невязки в рівнянні балансу теплових потоків на елементарній поверхні слитка  $DFi$ . Учитувалась тепловий потік конвекції. На рис. 4 показаний графік розподілення температури на циліндричній поверхні слитка, отриманий розрахунком на пропонуваній моделі, а також графік розподілення температури на внутрішній поверхні екрана. Результати розрахунку адекватні результатам, отриманим іншими авторами на чисельних локальних теплових моделях.

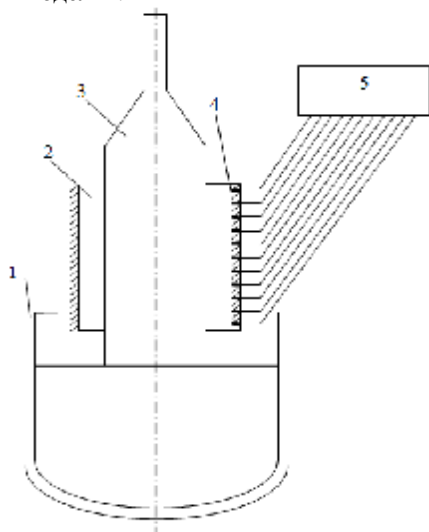


Рисунок 3 – Схема розташування термопар на внутрішній поверхні теплового екрана: 1 – тигель, 2 – екран, 3 – слиток, 4 – термопары Тп1...Тп11, 5 – блок вимірювання температури

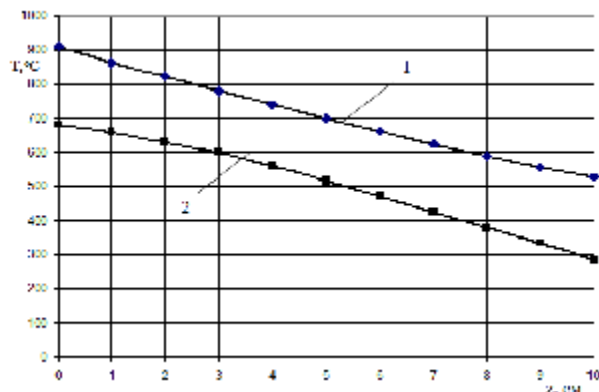


Рисунок 4 – Результати розрахунку температури на боковій поверхні слитка (1) і виміряні значення температури вздовж стінки екрана, приподнятого на 2 см відносно расплава (2)

Розробка експериментальної установки для вирощування слитків германію. На рис. 5 представлена структурна схема розробленої нами експериментальної установки «Германій-100» для вирощування монокристалів германію методом Чохральського з автоматизованою системою контролю і підтримки діаметра вирощуваного слитка.

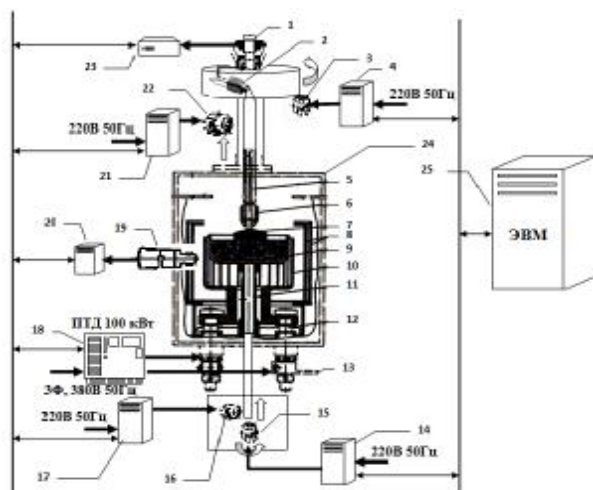


Рисунок 5 – Структурна схема установки «Германій-100»: 1 – вращающееся кабельное соединение; 2 – вращающаяся «корзина» с датчиком веса; 3 – двигатель вращения слитка; 4 – инвертор двигателя вращения слитка; 5 – шток; 6 – графитовый патрон затравкодержателя; 7 – слиток; 8 – графитовые экраны; 9 – графитовый тигель с расплавом; 10 – разрезной графитовый нагреватель; 11 – графитовая подставка тигля; 12 – водоохлаждаемый токоотвод; 13 – токоподводы; 14 – инвертор двигателя вращения тигля; 15 – двигатель вращения тигля; 16 – двигатель перемещения тигля; 17 – инвертор двигателя перемещения тигля; 18 – преобразователь тиристорно-диодный нагревателя; 19 – пирометр частичного излучения ПЧД 130; 20 – блок сопряжения пирометра; 21 – инвертор двигателя перемещения слитка; 22 – двигатель перемещения слитка; 23 – блок сопряжения датчика веса; 24 – ростовая камера; 25 – управляющая ЭВМ

Установка состоит из печного агрегата 24, системы управления с ЭВМ 25, и силового блока питания нагревателя 18.

Печной агрегат 24 имеет металлическую камеру с открывающейся передней дверкой. Камера и дверцы охлаждаются водой. В верхней и нижней части камеры имеются отверстия для ввода штока перемещения и вращения слитка 5 и вращения графитовой подставки 11, графитового тигля 9. Нагрев тигля 9 осуществляется разрезными графитовыми нагревателями 10, которые напоят через токовводы 13 от тиристорного преобразователя 18. Снаружи нагревателя по результатам проведенного нами математического моделирования установлены графитовые экраны 8, обеспечивающие заданное распределение (градиент) температуры по объему расплава в тигле, а также по длине и сечению выращиваемого слитка германия 7.

Контроль температуры графитового нагревателя осуществляется через 19 пирометр частичного излучения ПЧД-130, сигнал с которого через блок сопряжения 20 поступает в систему управления установкой 25 с помощью которой обеспечивается поддержание температуры с точностью  $\pm 0,4$  °С.

В установке «Германий-100» для улучшенных структурных характеристик применен метод измерения диаметра растущего слитка германия используя весовой метод [7]. Суть метода [8] заключается в том, что значение диаметра определяется расчетным путем на основе показаний датчика веса, которые представляют собой сумму веса штока и образовавшейся до момента измерения части слитка, приращенная веса слитка за определенное время, веса мениска и сил поверхностного натяжения. В системе управления установки 25 по данным датчика веса, который находится во вращающейся корзине 2, укрепленной на штоке 5 высчитывается диаметр как функция от веса  $D = f(p)$  и проводится корректировка температуры нагревателя  $T_n$  и скорости подъема слитка  $V_s$ .

Электрическая связь с блоком сопряжения датчика веса 23 осуществляется с помощью вращающегося кабеля соединения 1.

#### ВЫВОДЫ.

1. Разработана математическая модель, связывающая геометрические параметры тепловых экранов ростовой установки с угловыми коэффициентами тепловых потоков излучения на поверхности экранов, что позволило оптимизировать разработку теплового узла по критерию минимизации температурных градиентов в выращиваемом слитке германия.

2. Важным результатом исследований является тот факт, что равномерное распределение температуры для заданного, регулируемого диаметра слитка

вызывает снижение радиального температурного градиента и, как следствие, температурных напряжений.

3. Поскольку радикальный градиент температуры в основном зависит от тепловых потерь с поверхности кристалла, то его можно изменить, рассчитав и установив дополнительные тепловые экраны.

4. Разработана конструкция экспериментальной установки «Германий-100», позволяющая в автоматическом режиме выращивать монокристаллические слитки германия диаметром 100 мм с плотностью дислокаций  $< 10^3$  см<sup>-2</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каплунов И.А., Колесников А.И., Долнатов А.Б., Ткач О.И. Механические напряжения и оптические аномалии в кристаллах германия и парателлурита // Весник ТьГУ. Серия «Физика». – 2004. – № 4(6). – С. 72–80.
2. Crowley A.A., Stern E.I. and Hurlle D.O. I. Modelling of the growth of GaAs by LEC Technique. 1. Thermal distribution in the crystal // J. Cryst. Growth. – 1991. – Vol. 108, № 2. – PP. 627–636.
3. Dornberger E., Tomzig E., Seidl A., Schmitt S., Leister H.-J., Schmitt Ch., Muller G. Thermal simulation of the Czochralski silicon growth process by three different models and comparison with experimental results // J. Crystal Growth. – 1997. – Vol. 180. – PP. 461–467.
4. Crowley A.B., Strern E.J. Modelling of the growth of GaAs by the lec technique I. // Journal of Crystal Growth. – 1989. – Vol. 97. – PP. 697–708.
5. Meduoye G.O., Evans K.E., Bacon D.J. Moodeling of the growth of GaAs by the lec technique II. // Journal of Crystal Growth. – 1989. – Vol. 97. – PP. 709–719.
6. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 347 с.
7. Tom H. Johansen, the weight gain in Czochralski crystal growth // Journal of Crystal Growth. – 1992. – Vol. 118. – PP. 353–359.
8. Оксанич А.П., Притчин С.Э., Мальованый В.В. Разработка математической модели и устройства автоматического контроля и поддержания диаметра слитков германия выращиваемых по методу Чохральского // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Вип. 159. – С.73–79.

#### MATHEMATICAL MODELLING OF GEOMETRY OF A HEAT UNIT AND DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL UNIT FOR GROWING OF GERMANIUM INGOTS OF DIAMETER OF 100 MM BY THE CZOCHRALSKI METHOD

A. Oksanych, V. Malevanaya

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: [oksanich@kdu.edu.ua](mailto:oksanich@kdu.edu.ua)

The thermal field, heat and mass transfer conditions are investigated for the installation of growing germanium ingots by the Czochralski method to calculate the optimal parameters of heat shields. The approach for establishing the influence of the heat shield geometry on the temperature distribution within the work area of the growth installation and the ingot grown is offered. It is shown that the use of gravimetric method for automated control and maintenance of the diameter conduces to growth of germanium ingots of 100 mm diameter and dislocation density less than  $10^3 \text{ sm}^{-2}$ .

**Key words:** heat unit, gravimetric method, temperature gradient.

#### REFERENCES

1. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Dolnatov A.B., Tkach O.I. Mechanical stress and optical anomalies in germanium crystals paratellurite. // *Bulletin of the TSU. Series "Physics"*. – 2004. – № 4 (6). – PP. 72–80. [in Russian]
2. Crowley A.A., Stern E.I. and Hurle D.O. I. Modelling of the growth of GaAs by LEC Technique. 1. Thermal distribution in the crystal // *J. Cryst. Growth*. –1991. – Vol. 108, № 2. – PP. 627–636.
3. Dornberger E., Tomzig E., Seidl A., Schmitt S., Leister H.-J., Schmitt Ch., Muller G. Thermal simulation of the Czochralski silicon growth process by three different models and comparison with experimental results // *J. Crystal Growth*. – 1997. – Vol. 180. – PP. 461–467.
4. Crowley A.B., Stern E.J. Modelling of the growth of GaAs by the lec technique I. // *Journal of Crystal Growth*. – 1989. – Vol. 97. – PP. 697–708.
5. Meduoye G.O., Evans K.E., Bacon D.J. Modelling of the growth of GaAs by the lec technique II. // *Journal of Crystal Growth*. – 1989. – Vol. 97. – PP. 709–719.
6. Galin N. M. Kirillov P.L. *Heat and Mass Transfer*. – Moscow: Energoatomizdat, 1987. – 347 p. [in Russian]
7. Tom H. Johansen, the weight gain in Czochralski crystal growth // *Journal of Crystal Growth*. – 1992. – Vol. 118. – PP. 353–359.
8. Oksanych A.P., Pritchkin S.E., Malovany V.V. Development of mathematical model and automatic control and diameter maintaining unit for the germanium ingots grown by the Czochralski method // *Automated control systems and automation devices*. – 2012. – Iss. 159. – PP. 73–79. [in Russian]

Стаття надійшла 28.12.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Притчиним С.Е.