

А.В. Богомаз ⁽¹⁾, начальник лаборатории, к.т.н.

Т.В. Критская ⁽²⁾, профессор, д.т.н.

С.И. Стрилько ⁽³⁾, ст. научн. сотрудник, к.т.н.

А.В. Карпенко ⁽²⁾, ассистент

РАСЧЕТ РАДИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ МЕТОДОМ ПОГРУЖНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ФОРМООБРАЗОВАТЕЛЯ

⁽¹⁾ Государственное предприятие «Запорожский титано-магний комбинат»,

⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия,

⁽³⁾ Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

Вивчено вплив теплоізолюючих графітових і молібденових екранів на дію теплових потоків у радіальному напрямку на водоохолоджувальну стінку камери ростової установки при вирощуванні великогабаритних кристалів германія методом заглибного обертового формоутворювача. Проведено розрахунок радіальних теплових потоків, що враховує або не враховує товщину теплоізоляційних екранів. Оптимізовано конструкцію теплового вузла установки. Показано, що при одержанні кристалів германія діаметром 320 мм із використанням оптимізованої конструкції теплового вузла питомі норми споживання електроенергії зменшуються на 20...25 %.

Изучено влияние теплоизолирующих графитовых и молибденовых экранов на воздействие тепловых потоков в радиальном направлении на водоохлаждаемую стенку камеры ростовой установки при выращивании крупногабаритных кристаллов германия методом погружного вращающегося формообразователя. Проведен расчет радиальных тепловых потоков, учитывающий или не учитывающий толщину теплоизоляционных экранов. Оптимизирована конструкция теплового узла установки. Показано, что при получении кристаллов германия диаметром 320 мм с использованием оптимизированной конструкции теплового узла удельные нормы потребления электроэнергии уменьшаются на 20...25 %.

Введение. В оптических системах, работающих в ИК области спектра, в качестве материала линз, окон, используется германий, характеризующийся высокими оптическими параметрами, в частности высокой однородностью показателей преломления и прозрачности [1,2]. Такие оптические системы используются в различных областях науки и техники, в том числе и при проведении астрофизических исследований. В оптических системах астрофизического назначения, а также в некоторых областях военной техники требуются крупногабаритные (диаметром более 300 мм) кристаллы германия с высокой оптической однородностью, низким интегральным показателем ослабления и высокой механической прочностью. Указанным требованиям соответствуют кристаллы германия с регулируемым распределением удельного электрического сопротивления, низким уровнем внутренних напряжений и монокристаллической структурой [3].

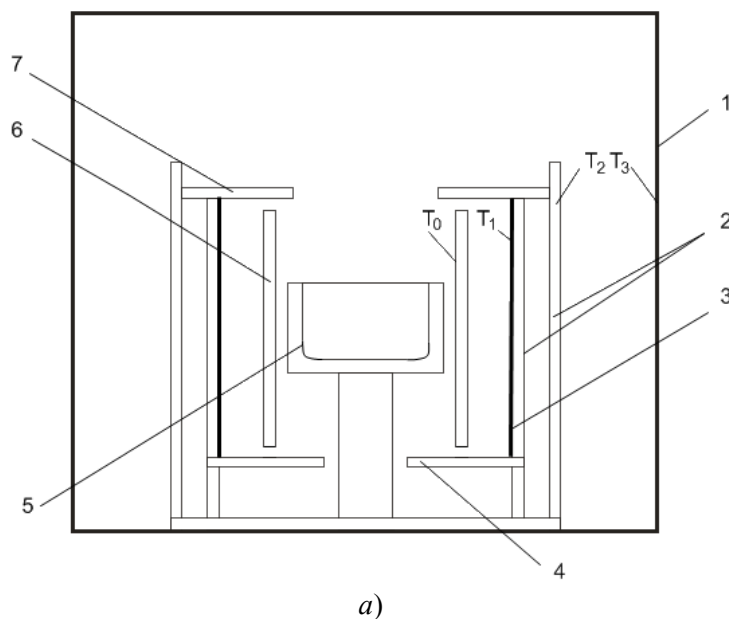
Состояние вопроса. Крупногабаритные кристаллы германия получают модифицированным способом Степанова с применением погружного вращающегося формообразователя (ПВФ) [4]. В работе [5] нами описана конструкция установки для получения крупногабаритных кристаллов германия, основным элементом которой является тепловой узел, состоящий из тигля, нагревателя и теплоизолирующих боковых, потолочных и донных экранов. Разработанный тепловой узел позволяет получать крупногабаритные (диаметром до 420 мм) кристаллы германия с низким коэффициентом

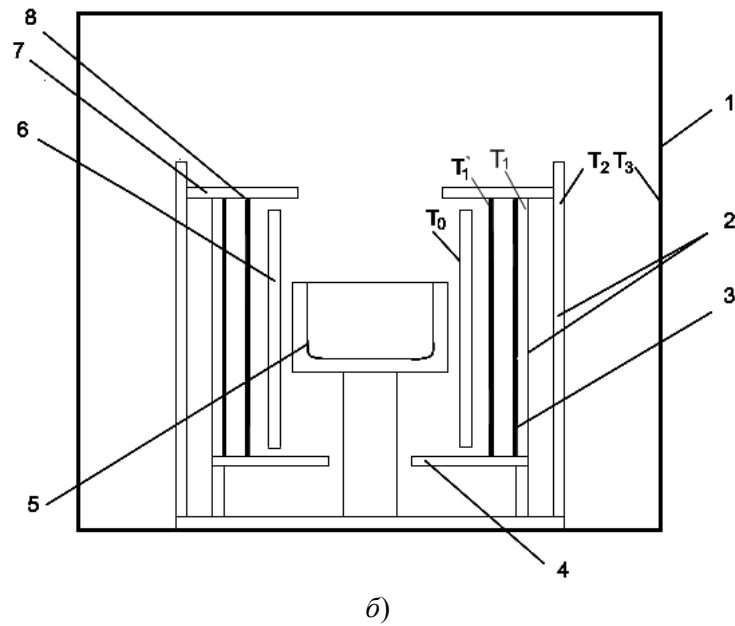
спектрального ослабления и практически монокристаллической структурой. Однако при получении таких кристаллов отмечается повышенный расход электроэнергии на единицу годной продукции, что связано с большой массой (до 100 кг) расплава и конструктивными особенностями ростовой камеры установки (водоохлаждаемые стенки камеры, штоки вращения тигля и затравки). Потому важной задачей является изучение влияния теплоизолирующих экранов на распределение тепловых потоков на водоохлаждаемых стенках ростовой камеры установки и поиск вариантов их уменьшения.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является изучение влияния теплоизолирующих экранов на тепловые потоки, действующие в радиальном направлении на водоохлаждаемую стенку ростовой камеры, и оптимизация конструкции теплового узла установки для получения крупногабаритных кристаллов германия методом ПВФ.

Методика эксперимента и обсуждение результатов исследования. Исследование и испытание тепловых узлов в процессах выращивания крупногабаритных кристаллов германия методом ПВФ проводили на модернизированной установке «Редмет-10» (объем ростовой камеры $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ м}^3$). Разработаны два варианта конструкции тепловых узлов, схема которых приведена на рис. 1.

По первому варианту конструкции предусмотрено размещение и закрепление к первому боковому экрану со стороны, обращенной к нагревателю, молибденового листа толщиной 0,5...0,6 мм. Во втором варианте конструкции дополнительно к установленному молибденовому листу между нагревателем и первым боковым экраном размещали дополнительный молибденовый экран. Диаметр молибденового экрана составлял 0,6 м, высота – 0,45 м. Потолочный и донный экраны были выполнены из графита марки ГМЗА-0, а нагреватель – из графита марки МГ-1-ОСЧ. Боковые экраны изготавливали из углерод-углеродного композита марки УПА-0, тигли – из углерод-углеродного композита, уплотненного пироуглеродом (УУКМ с ПУ). Геометрические размеры нагревателя: внешний диаметр 0,556 м, высота – 0,360 м. Наружный и внутренний диаметры внутреннего и внешнего боковых экранов составляли соответственно $d_{1'} = 0,645$, $d_1 = 0,626$ и $d_{2'} = 0,750$, $d_2 = 0,728$, а их высоты – $h_1 = 0,45$ и $h_2 = 0,60$ м.





1 - водоохлаждаемая ростовая камера; 2 - боковые экраны; 3 - молибденовый лист;
4 - донный экран; 5 - тигель; 6 - нагреватель; 7 - потолочный экран;
8 - дополнительный молибденовый экран

Рисунок 1 – Схема теплового узла без использования (а) и с использованием (б) дополнительного молибденового бокового экрана

а) Расчет радиального теплового потока без учета толщины экранов.

В рассматриваемой конструкции теплового узла установки нагреватель, боковые (цилиндрические), донный и потолочный (торцевые) экраны образуют замкнутую систему. Предполагаем, что нагреватель и экраны имеют постоянную температуру, не изменяющуюся во времени. Считаем также, что толщина экранов пренебрежимо мала.

В замкнутой системе тепловой поток от одной поверхности, имеющей температуру T_1 , к другой, температура которой T_2 , определяется из выражения [6]:

$$Q_{12} = F_1 \cdot C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где F_1 – площадь поверхности; $C_{1,2}$ – приведенные коэффициент излучения.

Приведенный коэффициент излучения определяется по формуле [7]:

$$C_{12} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \bar{\varphi}_{2,1} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (2)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты серого тела соответственно для первого и второго вариантов конструкции; $\bar{\varphi}_{2,1}$ – средний угловой коэффициент излучения.

Температура нагревателя (T_0) составляет $\sim 1373 \text{ К}$, а температура стенки камеры (T_3) $\sim 333 \text{ К}$.

Исходные данные для расчета теплового потока в конструкциях теплового узла с использованием и без использования дополнительного молибденового экрана приведены в табл. 1. Угловые коэффициенты излучения вычисляли по методике [7], а степень черноты используемых материалов определяли по данным работ [8-10].

Таблица 1 – Площадь поверхности и излучательная способность элементов конструкции

теплового узла с использованием и без использования дополнительного бокового экрана

Наименование элемента	Материал	$\bar{\Phi}_{k+1,n}$		ε_n		$F_n, \text{м}^2$
		I вариант	II вариант	I вариант	II вариант	
Нагреватель	графит	0,508	0,847	0,60	0,60	0,629
Дополнительный экран	молибден	-	0,922	-	0,105	0,848
Первый экран: внутренняя поверхность внешняя поверхность	молибден	0,49	0,571	0,20	0,20	0,912
	УУКМ с ПУ	1,0		0,75	0,75	
Второй экран	УУКМ с ПУ	0,234	0,234	0,80	0,80	1,414
Степень черноты	нерж. ст.	-	-	0,65	0,65	6,059

Тепловыми потоками от торцевых поверхностей боковых экранов через потолочный экран пренебрегаем. Тогда в конструкции теплового узла без дополнительного экрана $Q_{0,1} = Q_{1,2} = Q_{2,3}$ и, согласно (1), запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} C_{0,1} \cdot F_0 \cdot \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] = C_{1,2} \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]; \\ C_{2,3} \cdot F_2 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] = C_{1,2} \cdot F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \end{cases} \quad (3)$$

Исключив из системы T_1 и T_2 , находим выражение для результирующего излучения в радиальном направлении:

$$Q_{0,3} = \frac{\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4}{\frac{1}{C_{0,1} \cdot F_0} + \frac{1}{C_{1,2} \cdot F_1} + \frac{1}{C_{2,3} \cdot F_2}}. \quad (4)$$

После подстановки в (4) соответствующих значений из табл. 1 находим результирующий тепловой поток. Результирующий тепловой поток в радиальном направлении в конструкции теплового узла без дополнительного экрана составляет 25,139 кВт.

В конструкции теплового узла с дополнительным экраном полный тепловой поток в радиальном направлении определяется из выражения:

$$Q_{0,3} = \frac{\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4}{\frac{1}{C_{0,1'} \cdot F_0} + \frac{1}{C_{1',1} \cdot F_{1'}} + \frac{1}{C_{1,2} \cdot F_1} + \frac{1}{C_{2,3} \cdot F_2}}. \quad (5)$$

После выполнения расчетов получаем $Q_{0,3} = 7,007$ кВт. Следовательно, применение дополнительного молибденового экрана, размещенного между нагревателем и первым экраном, позволяет снизить тепловой поток в радиальном направлении более чем в три раза.

б) Расчет радиального теплового потока с учетом толщины экранов.

Для расчета полного теплового потока в радиальном направлении с учетом толщины экранов систему уравнений (3) дополняем уравнением теплопроводности через радиальную стенку:

$$Q = \frac{2\pi \cdot h \cdot (T_n - T_{n'})}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{d_{n'}}{d_n}}, \quad (6)$$

где h – высота экрана; λ – коэффициент теплопроводности материала экрана; $T_n, T_{n'}$ – соответственно температура внутренней и внешней поверхности экрана; $d_{n'}, d_n$ – соответственно наружный и внутренний диаметр экрана.

В результате получаем систему уравнений, содержащую линейные и нелинейные уравнения, неизвестными величинами в которых являются $T_1, T_{1'}, T_2, T_{2'}$. При решении системы уравнений принимаем, что перепад температуры по толщине экрана значительно меньше температуры экрана. После разложения в ряд $T_1^4, T_{1'}^4$, пренебрегая при этом членами высших порядков, получаем:

$$\begin{aligned} T_1^4 &= T_{1'}^4 \cdot \left(1 - 4 \frac{\Delta t_1}{T_1}\right), \\ T_2^4 &= T_{2'}^4 \cdot \left(1 - 4 \frac{\Delta t_2}{T_2}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta t_1 = T_1 - T_{1'}$, $\Delta t_2 = T_2 - T_{2'}$.

Подстановка уравнений (7) в систему уравнений (3) и (6) позволяет ее свести к нелинейному уравнению относительно T_1 , в результате решения которого получаем $T_1 = 1062$ К, $Q_n = 21,451$ кВт. Принимая $\lambda_{\perp} \approx 5$ Вт/м²·К [5], вычисленные значения средних угловых коэффициентов излучения для нагревателя, первого бокового экрана с молибденовым листом и второго бокового экрана составят соответственно 0,537, 0,515 и 0,234.

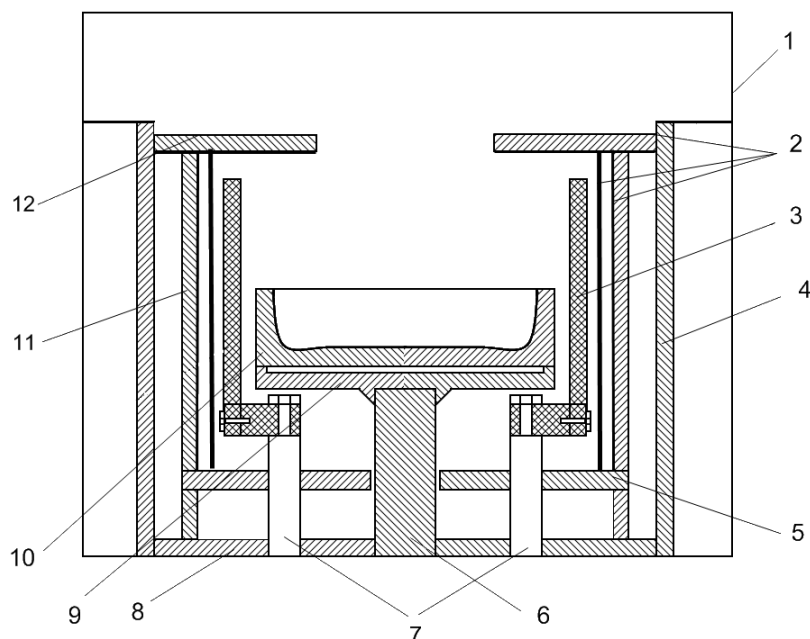
Таким образом, величина теплового потока с учетом толщины экранов в конструкции теплового узла без дополнительного молибденового экрана уменьшилась на ~ 3,7 кВт.

Увеличение толщины экранов приводит к росту тепловой энергии установки и соответственно снижению эффективности ее использования в опытно-промышленном и промышленном производстве. Данный фактор необходимо учитывать при выборе конструкции теплового узла ростовой установки для получения крупногабаритных кристаллов германия методом ПВФ.

Разработанные конструкции тепловых узлов испытывали на модернизированной установке «Редмет-10» при выращивании кристаллов германия диаметром ~ 320 мм. При выращивании кристаллов в качестве исходного материала использовали германий поликристаллический зонноочищенный с удельным электрическим сопротивлением более 48 Ом·см (при температуре ~ 21 °С), а в качестве легирующего элемента – сурьму. В процессе разращивания и вытягивания кристалла из расплава скорость вращения тигля и затравки поддерживали в интервале значений 2...6 и 4...8 мин⁻¹ соответственно. Скорость разращивания кристалла до стенок ПВФ составляла ~ 1,5...1,8 мм/мин, а скорость вытягивания кристалла из расплава ~ 0,2...0,4 мм/мин. Полученные кристаллы германия имели низкие значения коэффициента ослабления (не более 0,015 см⁻¹ на длине волны 10,6 мкм) и практически монокристаллическую структуру. По периферии кристалла присутствовали отдельные крупные (10...15 мм) поликристаллические блоки. При получении крупногабаритных кристаллов германия использование дополнительного

бокового молибденового экрана позволяет уменьшить удельные нормы расхода электроэнергии на 20...25 % и, тем самым, повысить эффективность производства.

На рис. 2 представлена схема оптимизированного теплового узла (ПВФ не показан).



- 1 - стенки ростовой камеры; 2 - дополнительные экраны из молибдена; 3 - нагреватель;
4 - внешний боковой графитовый экран; 5 - донный графитовый экран; 6 - ножка тигля;
7 - токовводы; 8 - графитовая плита; 9 - подставка тигля; 10 - тигель;
11 - внутренний боковой экран; 12 - потолочный экран

Рисунок 2 – Оптимизированный тепловой узел установки выращивания с применением ПВФ

Выводы

1. Изучали влияние теплоизолирующих графитовых и молибденовых экранов на воздействие тепловых потоков в радиальном направлении на водоохлаждаемую стенку ростовой камеры.

2. Выполнены расчеты радиальных тепловых потоков, учитывающих и не учитывающих толщины экранов. Установлено, что в конструкции теплового узла, изготовленного из УУКМ с ПУ и графита, содержащего молибденовый лист, величина радиального потока с учетом и без учета толщины экранов составляет соответственно 21,451 и 25,139 кВт. Увеличение толщины экранов приводит к росту тепловой инерции установки, что необходимо учитывать при выборе конструкции промышленных тепловых узлов.

3. Расчет радиального теплового потока в конструкции теплового узла с дополнительным молибденовым экраном показал, что его величина составляет ~ 7,0 кВт.

4. Получены крупногабаритные кристаллы германия диаметром 320 мм методом ПВФ. Установлено, что при получении кристаллов германия диаметром 320 мм с использованием оптимизированной конструкции теплового узла удельные нормы потребляемой электроэнергии уменьшились на 20...25 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов А. В. Обзор мирового рынка германия / А. В. Наумов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 3. – С. 7-14.
2. Наумов А. В. Рынок германия: ошибки и перспективы / А. В. Наумов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2008. – № 4. – С. 13-23.

3. *Смирнов Ю. М.* Дислокационная структура и оптические свойства монокристаллов германия, полученных профилированием / Ю. М. Смирнов, Е. Б. Шаморикова // Материалы IX совещания по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применение в народном хозяйстве (10-12 марта 1982 г., г. Ленинград). – Л.: ФТИ, 1982. – С. 138-142.
4. Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова / *П. И. Антонов*, А. М. Загуловский, А. С. Костыгов [и др.] – Л.: Наука. – 1981. – 280 с.
5. *Богомаз А. В.* Тепловой узел ростовой камеры установки выращивания крупногабаритных кристаллов германия методом погруженного вращающегося формообразователя // А. В. Богомаз, Т. В. Критская, А. В. Карпенко // *Металургія: наукові праці ЗДІА.* – Запоріжжя: ЗДІА. – 2010. – Вип. 22. – С. 139-146.
6. *Исаченко В. П.* Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 485 с.
7. *Блох А. Г.* Основы теплообмена излучением / А. Г. Блох. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 375 с.
8. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник / *В. Г. Нагорный*, А. С. Касатонов, В. С. Островский [и др.]; под ред. В. П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
9. Искусственный графит / *В. С. Островский*, Ю. С. Виргимев, В. И. Костиков, Н. Н. Шипков. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
10. Температурные измерения. Справочник / *О. А. Геращенко*, А. Н. Гордов, В. И. Лах [и др.] – Киев: Наукова думка, 1984. – 494 с.

Стаття надійшла до редакції 15.06.2011 р.
Рецензент, проф. В.М. Михайлін