

---

УДК 621.365.3  
ББК 31.292-5  
В 68

**Волошин М.А.**

*Аспирант кафедры теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного университета, тел. 89184891212, e-mail: voloshin.ma@gmail.com*

**Чижиков В.И.**

*Доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного университета, тел. 89183351736, e-mail: cvi@phys.kubsu.ru*

## **Расчет и изготовление печей сопротивления для установки выращивания монокристаллов (Рецензирована)**

### **Аннотация**

*Предложен метод расчета печей сопротивления, позволяющий сократить время изготовления печи, сэкономить материалы и достигнуть желаемого распределения температуры по длине печи. В методе учитывается материал, из которого изготовлен муфель печи и теплоизоляция. По полученным результатам расчета собрана печь сопротивления с заданным распределением температуры.*

**Ключевые слова:** *печь сопротивления, установка выращивания монокристаллов, распределение температуры, двухзонная печь, лучистый теплообмен, теплопроводность муфеля, расчет нагревательной обмотки.*

**Voloshin M.A.**

*Post-graduate student of Theoretical Physics and Computer Technologies Department, Kuban State University, ph. 89184891212, e-mail: voloshin.ma@gmail.com*

**Chizhikov V.I.**

*Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Theoretical Physics and Computer Technologies Department, Kuban State University, ph. 89183351736, e-mail: cvi@phys.kubsu.ru*

## **Designing and building resistance furnaces for the monocrystal growth device**

### **Abstract**

*The paper discusses a method for calculating the temperature distribution along the length of resistance furnaces. The method has several advantages: it reduces the time to build a furnace, saves resources and leads to the desired result. Muffle material and heat insulation material are taken into account. A resistance furnace with a given temperature distribution was built based on the calculation.*

**Keywords:** *resistance furnace, monocrystal growth installation, temperature distribution, two band furnace, radiant heat exchange, muffle thermal conduction, heating coil calculation.*

### **Введение**

В технологии полупроводниковых материалов печи сопротивления находят широкое применение для осуществления различных процессов, таких как диффузионный отжиг, жидкофазная эпитаксия, выращивание кристаллов методом Бриджмена-Стокбаргера, газотранспортная эпитаксия и др. Для получения требуемого распределения температуры по длине печи используют секционированные печи с отдельной регулировкой мощности, подводимой к каждой секции [1], а иногда и с использованием дополнительного водоохлаждаемого блока внутри печи [2].

Недостатком таких печей является множество источников питания или элементов регулировки, шунтирующих секций, включенных последовательно. В большинстве случаев используют печи с неизменным распределением температуры. Для таких печей

необходима регулировка температурного профиля толщиной теплоизоляции, в качестве которой применяют асбестовый шнур, а также используют нагревательные обмотки с переменным шагом. Однако процесс регулировки трудоемок, занимает много времени и требует повышенной затраты материалов. Предложенный в данной работе метод расчета и изготовления печей сопротивления достаточно прост, универсален и дает надежные результаты.

### Требования к печам

Для разрабатываемой установки выращивания монокристаллов требуется двухзонная печь, разделенная воздушным промежутком с температурным профилем, изображенным на рисунке 1.

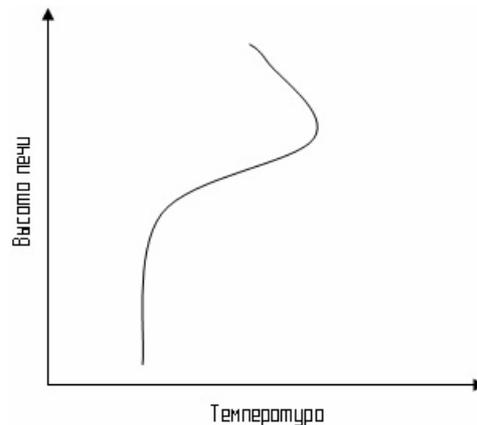


Рис. 1. Требуемый температурный профиль двухзонной печи

Изготовление такой печи без предварительного расчета заняло бы много времени, поскольку необходимо перематывать муфель печи до получения нужного распределения температуры. Предложенный метод позволяет сократить число перемоток до двух.

На рисунке 2 показана схема печей, состоящая из верхней печи 1, нижней печи 2, кварцевых муфелей 3 и 4, теплоизоляции 5 и 6, нагревательных обмоток 7 и 8, смотрового окна из кварцевого стекла 9.

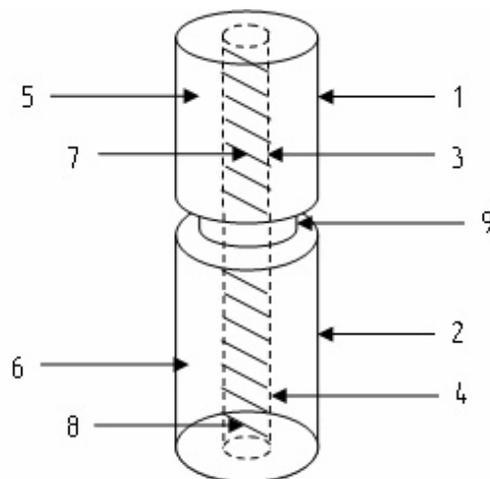


Рис. 2. Схема двухзонной печи с воздушным промежутком

---

## Элементы расчета

### Лучистый теплообмен между элементами муфеля

Расчет производят по известной методике [3], несколько модернизированной. Печь делят по высоте на равные элементы, а в радиальном направлении на отрезки, кратные толщине стенок муфеля. Задаются распределением температуры по высоте муфеля в точках деления и вычисляют мощности лучистого теплообмена между кольцевыми элементами муфеля, используя закон Стефана-Больцмана, закон квадратов, закон Ламберта и применяя численное интегрирование

$$P_{i,j} = \frac{8\sigma\varepsilon DZ^2 (T_i^4 - T_j^4)}{k} \sum_{l=1}^k \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{\pi l}{k}\right)\right]^2}{\left\{2\left[1 - \cos\left(\frac{\pi l}{k}\right)\right] + \left(\frac{Z}{R}\right)^2\right\}^2}, \quad (1)$$

где  $R$  – внутренний радиус муфеля;  
 $Z$  – расстояние между элементами лучистого теплообмена по оси  $Z$ ;  
 $DZ$  – высота кольцевого элемента;  
 $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  
 $\varepsilon$  – излучательная способность;  
 $T_i, T_j$  – абсолютные температуры элементов теплообмена;  
 $k$  – число элементов интегрирования полукольца.

### Учет теплопроводности муфеля

В случае, если муфель выполнен из материала, отличного от кварцевого стекла, например, алунда, необходимо учитывать теплопроводность муфеля. Для этого определяют мощности тепловых потоков между соседними кольцами

$$P_z = \lambda_m S \frac{\Delta T}{DZ}, \quad (2)$$

где  $\lambda_m$  – теплопроводность муфеля (0,016 Вт/(см·К) для алунда);  
 $S$  – площадь сечения муфеля;  
 $\Delta T$  – разность средних температур колец муфеля.

Затем вычисляют мощность теплового потока в радиальном направлении через каждый кольцевой элемент муфеля

$$P_R = 2\pi\lambda_m \frac{\Delta T}{\ln \frac{R+h}{R}}, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина стенки муфеля.

### Расчет распределения температуры в теплоизоляции

Используя уравнения теплового баланса, зная разность температур между соседними элементами муфеля, находят распределение температуры на наружной поверхно-

сти муфеля и мощность теплового потока каждого кольцевого элемента муфеля. Распределение температуры по периметру кожуха печи и по наружной поверхности муфеля образует граничные условия для нахождения распределения температуры в объеме теплоизоляции на основе решения уравнения Лапласа в цилиндрических координатах. С учетом осевой симметрии уравнение Лапласа приобретает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} = 0. \quad (4)$$

Для численного решения этого уравнения производные заменяют конечными разностями, образуя систему линейных уравнений [4]

$$TN = W[AT_{i+1,j} + BT_{i-1,j} + C(T_{i,j+1} + T_{i,j-1})] + (1-W)T_{i,j}, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{\left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{\rho h}\right)}{\left(\frac{2}{h^2} + \frac{2}{DZ^2} + \frac{1}{\rho h}\right)}, \quad B = \frac{\frac{1}{h^2}}{\left(\frac{2}{h^2} + \frac{2}{DZ^2} + \frac{1}{\rho h}\right)}, \quad C = \frac{\frac{1}{DZ^2}}{\left(\frac{2}{h^2} + \frac{2}{DZ^2} + \frac{1}{\rho h}\right)};$$

$W$  – множитель (равный 1,8), ускоряющий сходимость решения системы уравнений (5);

$h$  – элемент деления области теплоизоляции в радиальном направлении  $\rho$ ;

$DZ$  – элемент деления теплоизоляции в осевом направлении  $Z$ .

Пользуясь найденным распределением температуры в теплоизоляции, примыкающей к муфелю, находят мощность теплового потока в теплоизоляцию каждого кольцевого элемента муфеля с нагревательной обмоткой

$$P_u = 2\pi\lambda_u \frac{\Delta T}{\ln \frac{R+2h}{R+h}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_u$  – теплопроводность теплоизоляции (0,0013 Вт/(см·К) для асбестовой крошки).

### Расчет нагревательной обмотки

Суммируя полученные значения мощностей, находят общий баланс тепловой мощности для каждого кольцевого элемента муфеля. Зная зависимость нарастания мощности от длины муфеля, при учете только положительных значений мощности, соответствующих «нагревателям», и игнорируя отрицательные мощности, соответствующие «холодильникам», располагающимся обычно на концах муфеля, осуществляют расчет нагревательной обмотки и ее шаг. Для этого по оси  $y$  наносятся нарастающие значения мощности, а по оси  $x$  расположение соответствующих кольцевых элементов, и строится кривая.

Далее ось  $y$  разбивается на равноотстоящие точки, число которых равно числу витков в обмотке. Проводя через полученные точки линии до пересечения с кривой, к оси  $x$  восстанавливают перпендикуляры к точкам пересечения. Эти перпендикуляры и представляют собой расположение витков по длине печи. Для удобства намотки печи делается еще один рисунок, в котором расположение витков смещено на 0,5 мм отно-

---

сительно первого рисунка. Полученные рисунки распечатывают, вырезают, закрепляют на кварцевой трубке друг напротив друга и по ним осуществляют намотку муфеля и собирают печь.

### Коррекция

После выхода печи на стационарный режим работы проводят измерение распределения температуры по длине печи при помощи термопары. Требуемое распределение температуры  $f$  и экспериментально полученное  $f_1$  будут отличаться в связи с неизбежными ошибками в коэффициентах  $\lambda_u$  и  $\varepsilon$ .

После проведения измерений определяют распределение температур с поправками  $f_2 = 2f - f_1$ , которое берут в качестве исходного для повторного расчета.

Печь, изготовленная на основе повторного расчета, дает распределение температуры, совпадающее с заданным, поскольку происходит компенсация всевозможных ошибок. Все указанные распределения температур изображены на рисунке 3.

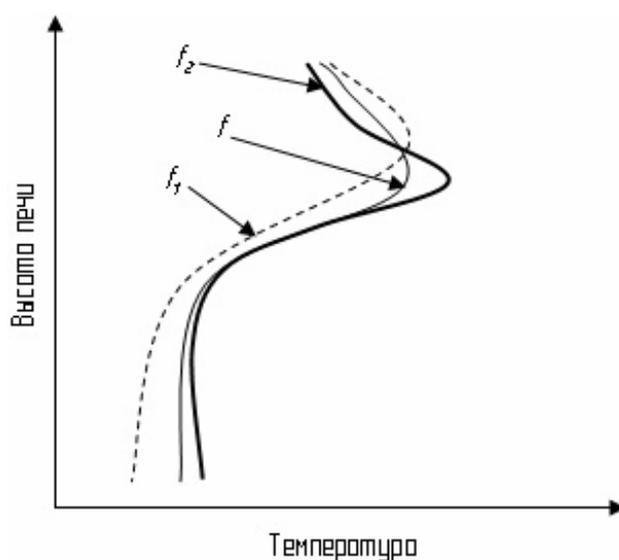


Рис. 3. Распределение температур по длине печи:  $f$  – требуемое распределение,  $f_1$  – экспериментальное распределение,  $f_2$  – распределение с поправками

### Выводы

1. Приведена методика расчета, позволяющая получить температурный профиль в печи сопротивления с учетом свойств материала, из которого изготовлены муфель печи и теплоизоляция.

2. При помощи представленной методики произведен расчет двухзонной печи с воздушным промежутком, изображенной на рисунке 2.

3. По результатам первого расчета собрана печь, измерено распределение температуры по длине печи, рассчитано распределение с поправкой и произведен повторный расчет. По результатам повторного расчета собрана печь, в которой распределение температуры совпало с заданным. Этот результат свидетельствует о верности приведенных формул методики расчета.

4. Написана компьютерная программа в среде Mathcad, позволяющая автоматизировать расчет.

---

### Примечания:

1. Mikkelsen J.C. Three-zone Bridgman-Stockbarger crystal growth furnace // Rev. Sci. Instrum. 1980. No. 11. Vol. 51. P. 1564-1566.
2. Lewis J., Huang S. High temperature furnace with a sharp temperature gradient // Rev. Sci. Instrum. 1963. No. 3. Vol. 34. P. 271-273.
3. Затуловский Л.М., Хазанов Э.Е., Полищук Я.А. Электротермические установки для выращивания монокристаллов полупроводниковых материалов. М.: Энергия, 1973. 127 с.
4. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на фортране. М.: Мир, 1977. 584 с.

### References:

1. Mikkelsen J.C. Three-zone Bridgman-Stockbarger crystal growth furnace // Rev. Sci. Instrum. 1980. No. 11. Vol. 51. P. 1564-1566.
2. Lewis J., Huang S. High temperature furnace with a sharp temperature gradient // Rev. Sci. Instrum. 1963. No. 3. Vol. 34. P. 271-273.
3. Zatulovskiy L.M., Khazanov E.E., Polishchuk Ya.A. Electrothermal installations for the growth of monocrystals of semiconductor materials. M.: Energiya, 1973. 127 p.
4. McCracken D., Dorn U. Numerical methods and Fortran programming. M.: Mir, 1977. 584 p.