

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller J.C. Laser Ablation: Principles and Applications // Springer Series in Mater. Sci. – 1994. – V. 28. – P. 56–70.
2. Bauerle D. Laser Processing and Chemistry // Springer Series in Mater. Sci. – 2000. – V. 30. – P. 89–94.
3. Омельченко А.И. Биофункциональные наночастицы в лазерной медицине // Вестник Югорского Государственного Университета. – 2011. – Вып. 2 (21). – С. 40–50.
4. Васильев О.С., Витовская М.В. Исследование каталитических свойств нанокластеров металлов на поверхностях твердых тел // Труды научных сессий МИФИ. – 2010. – Т. 2. Физика плазмы и плазменные технологии. Нетрадиционная энергетика. Ускорительная техника и электрофизика. Конструкционные материалы для ядерной энергетике. – С. 179–182.
5. Симакин А.В., Воронов В.В., Шафеев Г.А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. – 2004. – Т. 60. – С. 83–107.
6. Ельяшевич М.А. Разрушение металлов под действием излучения оптического квантового генератора // Отчет Института физики АН БССР. – № КЭ-14. – 1963. – С. 248–260.
7. Светличный В.А., Изаак Т.И., Бабкина О.В., Шабалина А.В. Синтез наночастиц металлов при лазерной абляции твердых тел в жидкостях наносекундным излучением 2-й гармоники Nd-YAG лазера // Известия ВУЗов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 12/2. – С. 110–115.
8. Лапин И.Н., Светличный В.А. Синтез наночастиц благородных металлов в воде методом лазерной абляции для медико-биологических приложений и косметологии // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2012: Матер. XI Междунар. конф. – Новосибирск, 2–4 октября 2012. – Новосибирск: НГТУ, 2012. – Т. 5. – С. 66–73.
9. Заявка на полезную модель 2012144669 РФ. Устройство для получения коллоидного раствора наночастиц в жидкости методом лазерной абляции / И.Н. Лапин, В.А. Светличный; Заяв. 19.10.2012; Приоритет 19.10.2012; Решение о выдаче 27.11.2012. – 6 с. ил.

Поступила 03.04.2013 г.

УДК 53.088.228+004.942

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

М.М. Филиппов, Ю.В. Бабушкин, А.И. Грибенюков*

Томский политехнический университет

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

*ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск

E-mail: nauka@tpu.ru

Проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния датчиков температуры на температурное поле кольцевого нагревательного модуля многозонной термической установки. Результаты расчетов показывают, что температурные датчики существенно влияют на распределение температуры в нагревательном модуле и на его энергопотребление.

Ключевые слова:

Кольцевой нагревательный модуль, математическое моделирование, температурное поле, энергопотребление, COMSOL Multiphysics.

Key words:

Ring heating module, mathematical modelling, thermal field, energy consumption, COMSOL Multiphysics.

Для контроля температурного поля промышленных установок, построенных на основе нагревательных модулей кольцевого типа, в том числе и многозонных термических установок (МТУ) для выращивания кристаллов [1, 2], используются термоэлектрические датчики температуры, представляющие собой термопары, изготовленные из проводов, защищенных от электрических помех кожухом с высокими электроизоляционными свойствами. В качестве защитного кожуха, как правило, используются керамические трубки разных диаметров с каналами, диаметр которых подбирается в зависимости от диаметра термопарных проводов. Фиксация чувствительного элемента (горячего спая) термопары в нужной точке нагревательного модуля осуществляется путем изгото-

вления в нем специального канала диаметром, достаточным для установки термопары.

Установка датчика температуры приводит к возникновению паразитных утечек тепловой энергии и изменению температуры в зоне измерения, а также к нарушению симметрии температурного поля кольцевого нагревательного модуля.

Исследования по влиянию термопар на температурное поле проводились ранее для различных объектов как экспериментально, так и с помощью математических моделей [3–5]. Например, в [3] показано, что падение температуры, вызванное введением термопары для измерения точки плавления меди, составило около 220 К. В [4] проведены исследования искажений температурного поля, вызванных установкой термопар в материалах

с низкой теплопроводностью. Приведен пример, в котором искажение достигает 390 К. Поэтому оценка влияния датчиков температуры на температурное поле кольцевого нагревательного модуля МТУ представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Разрез конструкции нагревательного модуля, симметричной относительно радиуса и половины высоты, приведен на рис. 1.

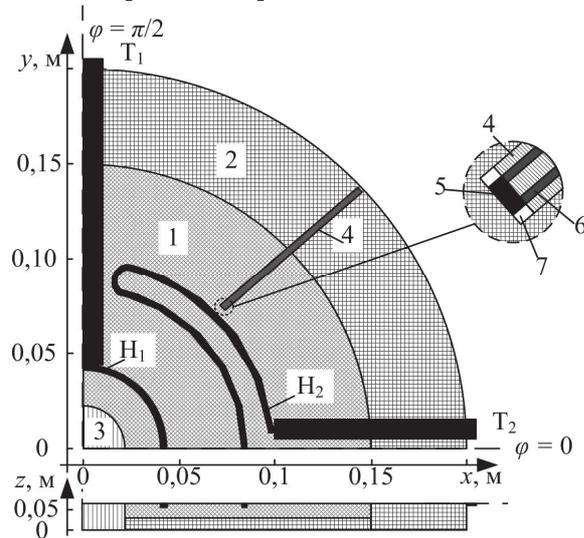


Рис. 1. Разрез части нагревательного модуля: 1 – электроизолятор 1; 2 – электроизолятор 2; 3 – рабочий объем; 4 – термопарная трубка; 5 – спай термопары; 6 – термопарные провода; 7 – воздушный зазор; H1, H2 – нагревательные элементы; T1, T2 – токовыводы

Нагревательные элементы H1, H2, изготовленные из высокотемпературного сплава, встроены в кольцевую структуру из электроизоляционных материалов с различными теплофизическими свойствами (табл. 1). Электроизолятор 1 изготавливается из материала с высокой теплопроводностью и предназначен для оперативной передачи тепловой энергии от нагревательных элементов к рабочему объему установок. Электроизолятор 2 изготавливается из материала с низкой теплопроводностью с целью сохранения тепловой энергии в рабочем объеме путем уменьшения ее утечки в окружающую среду.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов [6, 7]

Элемент конструкции	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)
Электроизолятор 1	11,5...8,0	2100,0	1095,0...1147,0
Электроизолятор 2	0,3330...0,3925	650,0	1087,0...1170,0
Сплав	27,7...36,8	7210,0	780,0...815,0
Термопарная трубка	6,0	2600,0	1000,0
Термопарные провода	82,25...90,00	20830,0...20565,0	156,0...167,0
Рабочий объем/воздух	0,07	0,31...0,24	1180,0...1225,0

Значения температуры кольцевого нагревательного модуля в рабочем режиме лежат в пределах 1150...1500 К. Для измерения температуры в этом диапазоне используются термопары платиновой группы с градуировкой ПП (S) [8] с термопарной трубкой из алюмосиликатной керамики (тип

С610 [7]). Теплопроводность термопарной трубки выше теплопроводности электроизолятора 2. Следовательно, она способствует усиленному отводу тепла от места расположения контрольной точки (спая термопары).

Математическое описание тепловых процессов в модуле при его нагреве представлено в [9]. Сложность геометрии и разнородность материалов нагревательного модуля не позволяют получить аналитическое решение, поэтому модель реализована в пакете программ COMSOL Multiphysics 3.5 [10], в котором для решения задачи используется метод конечных элементов.

Для оценки влияния датчика на искажение температурного поля нагревательного модуля проведена серия расчетов следующих вариантов конструкции модулей:

- a – без датчика измерения температуры;
- b – с датчиком, имеющим теплофизические свойства, приведенные в табл. 1;
- c – с датчиком, у которого теплопроводность термопарной трубки уменьшена в 10 раз ($\lambda=0,6$ Вт/(м·К));
- d – с датчиком, у которого теплопроводность термопарной трубки увеличена в 10 раз ($\lambda=60$ Вт/(м·К)).

Вследствие того, что точность измерения температуры зависит от условий теплообмена датчика с его окружением [3, 5], предполагается, что спай термопары с одной стороны плотно касается электроизолятора 1, а с других сторон он окружен воздухом (рис. 1). Рассчитывалось стационарное состояние при выделении тепловой энергии в нагревателе H1 – $5,82 \cdot 10^7$ Вт/м³ и в H2 – $6,96 \cdot 10^7$ Вт/м³.

С целью исключения влияния на ожидаемые результаты погрешностей, вызванных неопределенностью задания исходных данных, использованием приближенных численных методов и ошибок округления чисел на ЭВМ применены рекомендации, приведенные в [11]. А именно, согласно правилу Рунге по определению точности результатов, получаемых численными методами, проведены расчеты температурного поля нагревательного модуля для одинаковых исходных данных с числом расчетных элементов $N_{\text{э}}=23883$, 44831 и 78372. Установлено, что отличие в значениях температур в контрольной точке не превышает 0,05 % (~0,4 К). Это приемлемо для решения рассматриваемой задачи, так как ожидаемые отклонения температурного поля от исходного состояния (вариант a) могут составить несколько десятков градусов. На основании полученных результатов было принято, что расчетная область может быть удовлетворительно аппроксимирована 44831 конечным элементом, что с одной стороны обеспечивает желаемую точность, а с другой – приемлемое время расчетов.

Расчетные распределения температуры вдоль границы между электроизоляторами 1 и 2 для вариантов a и b представлены на рис. 2. Локальные падения температуры вблизи токовыводов связа-

ны с их высокой теплопроводностью. Снижение температуры (~20 К) в центре области (рис. 2, линия b) вызвано установленным датчиком.

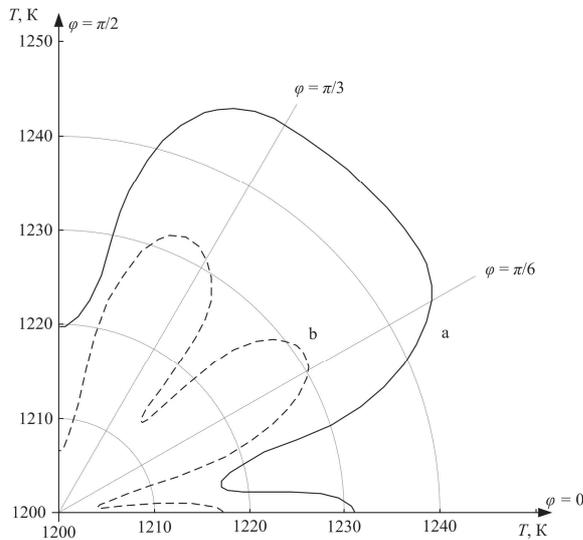


Рис. 2. Расчетные распределения температуры на граничной дуге между электроизоляторами 1 и 2 для вариантов а и б

Расчетные распределения температуры на границе рабочего объема (рис. 3) показывают, что температура на внутренней поверхности модуля падает на ~17 К, при этом характер распределения температуры не меняется.

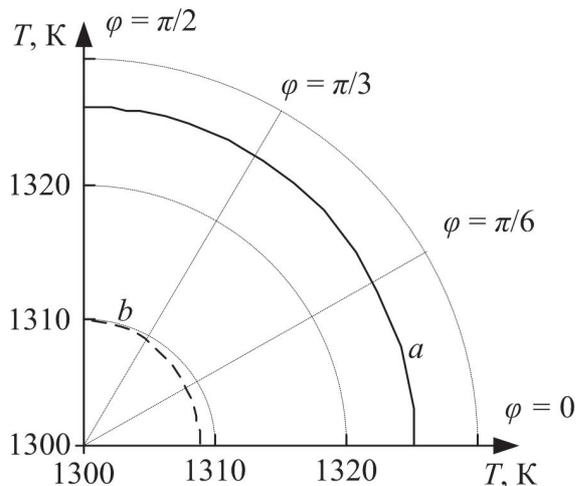


Рис. 3. Расчетные распределения температуры на границе рабочего объема (рис. 1, область 3) для вариантов а и б

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parsey Jr.J.M., Thiel F.A. A new apparatus for the controlled growth of single crystals by horizontal Bridgman techniques // Journal of Crystal Growth. – 1985. – V. 73. – № 2. – P. 211–220.
2. Филиппов М.М., Грибенюков А.И., Бабушкин Ю.В. Система управления технологическим процессом выращивания кристаллов методом Бриджмена // Датчики и системы. – 2012. – № 6. – С. 2–5.
3. Гордов А.Н., Эргардт Н.Н. О некоторых источниках ошибок измерения температур с помощью термопар // Заводская лаборатория. – 1958. – Т. 24. – № 12. – С. 1467–1470.

В табл. 2 представлены сводные данные по результатам расчета температурных полей для различных вариантов модулей.

Таблица 2. Результаты расчета температурных полей нагревательного модуля для различных вариантов

Вариант	T_1 , К	T_2 , К	ΔQ_2 , %	ΔT_1 , К	ΔT_2 , К
a	1290,28	1326,21	–	42,50	682,81
b	1273,74	1309,80	2,39	54,56	519,65
c	1282,11	1317,43	1,17	47,50	596,22
d	1232,78	1271,28	8,71	64,80	278,03

Примечание: T_1 , T_2 – температуры в контрольной точке и на границе рабочего объема ($\varphi=\pi/2$); ΔQ_2 – приращение мощности H_2 , необходимое для достижения в контрольной точке 1290,28 К; ΔT_1 , ΔT_2 – перепад температуры по термопарной трубке от контрольной точки до граничной дуги между электроизоляторами 1 и 2 и от граничной дуги между электроизоляторами 1 и 2 до внешней поверхности.

Анализ результатов расчета температурных полей показал, что использование датчиков с высокой теплопроводностью термопарной трубки приводит к более сильному понижению температуры в контрольной точке. Для компенсации этого эффекта требуется повышенное энергопотребление (ΔQ_2). Из расчетов перепадов температуры видно, что с ростом теплопроводности термопарной трубки увеличивается перепад температуры в области электроизолятора 1 и уменьшается перепад температуры в области электроизолятора 2.

Выводы

1. Установка датчиков температуры в нагревательные модули термических установок приводит к утечкам тепловой энергии, снижающим общий уровень температуры, как в зоне измерения, так и в области рабочего объема приблизительно на 17 К.
2. Полученные результаты следует учитывать как в режиме калибровки термических установок и выборе тепловых мощностей нагревательных элементов, так и при решении задач управления температурным полем.
3. Несмотря на искажение температурного поля в зоне установки датчика, распределение температуры на границе рабочего объема практически сохраняет осевую симметрию.

4. Бек Дж.В. Искажающее влияние термопары на температурное поле в материалах с низкой теплопроводностью // Теплопередача. – 1962. – № 2. – С. 33–42.
5. Кузнецов Г.В., Мухаммадеев К.М. Численная оценка погрешности измерений температур в условиях локального неидеального контакта спая термопары и материала // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 12–16.
6. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: в 2-х ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. – М.: Энергия, 1975. – 382 с.

7. Официальный сайт компании ООО «Технокерам». 2013. URL: <http://www.rauschert.com.ua/products/high-temperature-ceramics.html> (дата обращения: 21.02.2013).
8. Сплавы для термопар: справочник / под ред. И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
9. Филиппов М.М., Бабушкин Ю.В., Грибенюков А.И. Проблемы управления процессом выращивания кристаллов методом Бриджмена. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. – 174 с.
10. Официальный сайт COMSOL Multiphysics. 2013. URL: <http://www.comsol.com/> (дата обращения: 21.02.2013).
11. Киреев В.И., Пантелеев А.В. Численные методы в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 2004. – 480 с.

Поступила 01.04.2013 г.

УДК 519.63

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛАЗМЕННЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ У КОЛЛЕКТОРА ТЕРМОЭМИССИОННОГО ДИОДА

В.П. Зимин

Томский политехнический университет
E-mail: zimmin@tpu.ru

Анализируется модель монотонных плазменных граничных условий у коллектора термоэмиссионного диода на плоскостях плотность плазмы–ионный ток, плотность плазмы–плотность энергии электронов и других. Классифицировано характерное поведение кривых граничных условий, исследованы их особенности изменения, в том числе в области поджига дугового режима.

Ключевые слова:

Граничные условия, краевая задача, метод фазовой плоскости, низкотемпературная плазма, термоэмиссионный диод.

Key words:

Boundary conditions, boundary value problem, method of phase plane, low-temperature plasma, thermionic diode.

Введение

В работе [1] обоснована необходимость и представлены результаты исследования граничных условий у эмиттера термоэмиссионного диода. Исследование модели граничных условий у коллектора также представляет интерес, который обусловлен в первую очередь процессами у коллектора, связанными с переходом диффузионного режима работы диода в дуговой [2–5]. Как и в [1], в данной работе анализируются области возможных решений граничных уравнений, используя методику анализа решений краевых задач на фазовых плоскостях, предложенную в [6–8].

В настоящей работе проведены аналитические и численные исследования модели монотонных граничных условий у коллектора. Выявлены её асимптотическое поведение, характерные изменения при вариации параметров термоэмиссионного диода и плазмы и поведение параметров плазмы при поджиге дугового разряда.

Модель монотонных плазменных граничных условий у коллектора и её анализ

Модель монотонных граничных условий (виртуальный электрод отсутствует) в слое у коллектора для плотности ионного J_{id} , электронного J_{ed} тока и плотности энергии электронов q_{ed} для тормозящего ($V_c \geq 0$) приэлектродного потенциального барьера записывается [6, 9]:

$$J_{ed} = [J_{red} + A_{ce} J_{ed}] \exp\left(-\frac{eV_c}{kT_{ed}}\right) - J_{ce}^{(E)}, \quad (1)$$

$$J_{id} = [J_{rid} + A_{ci} J_{id}] - J_{ci}^{(E)} \exp\left(-\frac{eV_c}{kT_d}\right), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \left(1 - A_{ce} \exp\left(-\frac{eV_c}{kT_{ed}}\right)\right) q_{ed} = \\ & = J_{red} \exp\left(-\frac{eV_c}{kT_{ed}}\right) \left[\frac{2kT_{ed}}{e} + V_c\right] - \\ & - J_{ce}^{(E)} \left[\frac{2kT_c}{e} + V_c\right], \end{aligned} \quad (3)$$

и для ускоряющего ($V_c \leq 0$) приэлектродного потенциального барьера:

$$J_{ed} = [J_{red} + A_{ce} J_{ed}] - J_{ce}^{(0)} \exp\left(\frac{eV_c}{kT_{ec}}\right), \quad (4)$$

$$J_{id} = [J_{rid} + A_{ci} J_{id}] \exp\left(\frac{eV_c}{kT_d}\right) - J_{ci}^{(0)}, \quad (5)$$

$$(1 - A_{ce}) q_{ed} = J_{red} \frac{2kT_{ed}}{e} - J_{ce}^{(0)} \exp\left(\frac{eV_c}{kT_{ec}}\right) \frac{2kT_c}{e}, \quad (6)$$

$$J = J_{ed} + J_{id}, \quad (7)$$

где $J_{red} = \gamma_{ce} n_d \bar{v}_e(T_{ed})$, $J_{rid} = \gamma_{ci} n_d \bar{v}_i(T_d)$ – плотности хаотического тока электронов и ионов из плазмы на коллектор; e – заряд электрона; γ_{ce} , A_{ce} , γ_{ci} , A_{ci} – коэффициенты пропорциональности для хаотического