

## ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ

Миодушевский П.В.<sup>1</sup>, Бакмаев С.М.-К.<sup>2</sup>, Тингаев Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московской области «Международный университет природы, общества и человека «Дубна» (Университет «Дубна»), (141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19), nano@uni-dubna.ru;

<sup>2</sup>ЗАО «Межрегиональное производственное объединение технического комплектования «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» (ЗАО «МППОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»), (141981, Московская обл. г. Дубна, ул. Школьная д. 10-А), e-mail: nio@techo-com.ru.

Разработан метод измерения теплопроводности поликристаллических алмазных пластин. Метод включает в себя нанесение с противоположных сторон пластины двух тонкоплёночных термометров сопротивления, выполненных по мостовой схеме. С одной стороны в месте расположения одного из термометров сопротивления пластина нагревается с помощью контакта с горячим медным стержнем. С противоположной стороны (в месте расположения другого термометра сопротивления) производится охлаждение пластины с помощью контакта с медным стержнем, охлаждаемым водой. Тепловой поток, протекающий через пластину, измеряется с помощью термопар, установленных на горячем медном стержне, и регулируется автоматическим устройством. Тонкоплёночные термометры сопротивления, нанесённые методом вакуумной депозитции, имеют толщину 50 нанометров и составляют практически одно целое с поверхностью пластины. Поэтому измеряемые температуры точно соответствуют температурам на противоположных поверхностях пластины. Высокая чувствительность тонкоплёночных термометров сопротивления обеспечивается благодаря повышенному сопротивлению их резисторов, что позволяет использовать напряжение питания моста не менее 20 В.

Ключевые слова: теплопроводность, поликристаллические алмазные пластины, тонкоплёночный мостовой датчик температуры

## PRECISE MEASUREMENTS OF THE SUPER-HIGH THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT INTO THIN PLATES

Miodushevsky P.V.<sup>1</sup>, Bakmaev S.M.-K.<sup>2</sup>, Tingaev N.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dubna International University, Universitetskaya str., 19, Dubna, Moscow region, Russia, 141980. E-mail: nano@uni-dubna.ru;

<sup>2</sup>"TECHNOCOMPLEKT" JSC, Shkolnaya str., 10-a, Dubna, Moscow region, Russia, 141981, E-mail: nio@techo-com.ru

The new method for measuring the thermal conductivity of polycrystalline diamond plates is developed. The method includes deposition of the two thin film full bridge resistance thermometers on the two opposite surfaces of the plate. The plate is heated from one side in area, where one of the resistance thermometers is located, by the contact with hot copper bar. The plate is cooled from the opposite side in area, where second of the resistance thermometers is located, by the contact with other copper bar that is cooled by the water. Heat flux that is flowing through the plate is measured with help of the thermocouples, that are installed on the hot copper bar, and is controlled by the automatic device. Thin film resistance thermometers, that are made by vacuum deposition, have thickness 50 nanometers and practically are the parts of the plate surfaces. For this reason the measured temperatures are exactly coinciding with temperatures on the two opposite surfaces of the plate. The high sensitivity of the thin film resistance thermometers is provided using their elevated electrical resistance value, that is permitting to have the bridge excitation not less than 20 V.

Keywords: thermal conductivity, polycrystalline diamond plates, thin-film temperature sensor bridge

Современные компоненты электроники, в особенности силовой электроники, выделяют значительное количество тепла. Для обеспечения надёжной работы этих компонентов в настоящее время создаются устройства теплотвода, в которых используются пластины из синтетических алмазов, обладающие сверхвысокой теплопроводностью. Точное измерение

коэффициента теплопроводности этих материалов имеет большое значение для создания современных устройств силовой электроники.

Для измерения с приемлемой точностью величины теплопроводности в основном направлении теплоотвода (перпендикулярно толщине пластины) необходимо создать на поверхности образца тепловой поток с поверхностной плотностью не менее  $20 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$ , вследствие очень большой теплопроводности поликристаллических алмазных пластин-теплоотводов. Описанные в литературе методы, с использованием лазерных установок (см. [6]), обеспечивают недостаточную поверхностную плотность теплового потока  $3,2 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$  и, кроме того, вызывают нежелательный разогрев измеряемого образца. Методы измерения теплопроводности, использующие импульсный нагрев образца сфокусированным лучом [1], и методы, использующие фотоакустический эффект [4], не являются прямыми методами, и поэтому не могут обеспечить требуемый уровень достоверности и точности измерений, а также требуют сложной аппаратуры и громоздких вычислений. Метод измерений, описанный в работе [5], в основу которого положен принцип плоских тепловых волн, пригоден только для материалов со сравнительно невысокой теплопроводностью. Метод стационарной теплопроводности [2], может быть применён только для измерения теплопроводности в направлении вдоль пластины, а это направление не является основным направлением теплоотвода и не представляет научного интереса.

### **Описание выбранного метода измерений**

Необходимую поверхностную плотность стационарного теплового потока можно обеспечить с помощью контакта горячего медного стержня с одной стороны алмазной пластины и контакта с холодным медным стержнем с противоположной стороны алмазной пластины. Измеряемый перепад температур может быть при этом небольшим, например, всего лишь  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поэтому необходимо достаточно точно измерять температуру с обеих сторон пластины в местах контакта. Это можно сделать с помощью миниатюрных тонкоплёночных термометров сопротивления, которые могут быть изготовлены методом вакуумной депозиции мостовой измерительной схемы термометра на поверхность пластины. В работе [7] описан наш предыдущий опыт в конструировании и изготовлении миниатюрных тонкоплёночных термометров сопротивления высокой точности, который подтверждает возможность и полезность применения этой технологии в рассматриваемом нами случае. Тонкоплёночные термометры имеют очень малую толщину  $50 \div 80 \text{ нм}$ , и поэтому их температура не отличается от температуры поверхности пластины, на которую они нанесены. Горячий медный стержень нагревается с помощью электроизолированной нихромовой проволоки, обмотанной вокруг этого стержня на значительной длине, чтобы

обеспечить подвод необходимой тепловой мощности. Теплопроводность медного стержня обеспечивает передачу в осевом направлении стержня теплового потока с плотностью не менее  $20 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$ . Измерение величины этого теплового потока производится с помощью двух тонких хромель-алюмелевых термопар, расположенных на заданном расстоянии друг от друга в двух сечениях по оси стержня. Отвод потока тепла, проходящего через пластину, осуществляется с помощью медного стержня охлаждаемого водой. Для снижения тепловых сопротивлений в местах контакта медных стержней с пластиной применяется силиконовая смазка типа Dow Corning TC-5022. Тепловые контактные сопротивления не влияют на величину измеряемого теплового потока, они вызывают незначительное повышение температуры пластины и нагревателя. Таким образом, теплопроводность пластины в основном направлении теплоотвода определяется прямыми измерениями величины теплового потока, проходящего через пластину и величины перепада температур на её поверхностях. Для этих измерений может быть использован образец пластины с размерами приблизительно 8x8 мм.

Следует отметить, что тонкоплёночные термометры сопротивления могут быть использованы в дальнейшем для мониторинга функционирования изделий силовой электроники, содержащих теплоотводные алмазные пластины. В литературе [3] также подчеркивается важность встроенного контроля теплового состояния силовых модулей.

### **Описание конструкции стенда, его основных элементов и приборов**

#### **Тонкоплёночные мостовые датчики температуры**

Для высокоточного измерения температуры на поверхность пластины из поликристаллического искусственного алмаза методом магнетронного напыления наносится мостовая схема термометра сопротивления. В этой схеме два резистора  $R_1, R_3$  изготавливаются из платины или из титана, а два других  $R_2, R_4$  изготавливаются из нихрома. При комнатной температуре сопротивления всех четырёх резисторов одинаковы и равны  $R_0$ . Рассмотрим случай, когда два резистора  $R_1, R_3$  изготавливаются из платины. При изменении температуры на  $\Delta T$  сопротивление резисторов возрастает:

$$R_1 = R_3 = R_0(1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \Delta T); \quad R_2 = R_4 = R_0(1 + 0,4 \cdot 10^{-3} \Delta T).$$

Суммы сопротивлений:  $R_1 + R_2 = R_3 + R_4 = R_0(2 + 4,43 \cdot 10^{-3} \Delta T)$ . Сопротивление моста равно  $R_m = R_0(1 + 2,215 \cdot 10^{-3} \Delta T)$ . Величина сигнала на измерительной диагонали моста равна:  $U_m = I_1 R_0(1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \Delta T) - I_4 R_0(1 + 0,4 \cdot 10^{-3} \Delta T)$ .

При малом изменении температуры на несколько градусов можно принять допущение, что суммарное сопротивление моста равно  $R_0$ , ток через плечо моста равен  $0,5 \cdot U_0 / R_0$ , где  $U_0$  – напряжение питания моста. При этих допущениях получим величину измерительного сигнала равную:  $U_m = 0,5 \cdot U_0 \cdot 3,53 \cdot 10^{-3} \Delta T = 1,765 \cdot 10^{-3} \cdot U_0 \Delta T$ .

Допустим, что величина  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ , тогда при напряжении питания 20 В мы получим величину измерительного сигнала равной  $U_m=70$  мВ. Принимая во внимание то, что погрешность измерительных приборов будет не более 70 мкВ, мы получим, что теплопроводность пластины может быть измерена с погрешностью не хуже 0,1%.

Для тензо- и терморезисторов обычно принимается величина рассеиваемой мощности не более 200 мВт. При напряжении питания 20 В это означает, что сопротивление моста должно быть не менее 2000 Ом. По технологическим причинам терморезистор состоит из  $n$  нитей шириной 30 мкм, расположенных на расстоянии 30 микрон друг от друга. Толщина нити резистора 50 нм. Длина нити резистора 1,5 мм. Тогда сопротивление одной нити из платины равно 106 Ом. 20 платиновых нитей составят резистор с сопротивлением 2120 Ом. Ширина резистора составит 1,2 мм. Сопротивление одной нити из нихрома равно 1060 Ом. Следовательно, резистор из нихрома будет иметь 2 нити и ширину 0,12 мм. В том случае, когда два резистора  $R_0, R_3$  изготавливаются из титана, чувствительность датчика понизится на 12%, однако, вместо 20 платиновых нитей резистор можно будет выполнить из 4-х титановых нитей.

На рисунке 1 представлена схема тонкопленочного мостового датчика температуры.

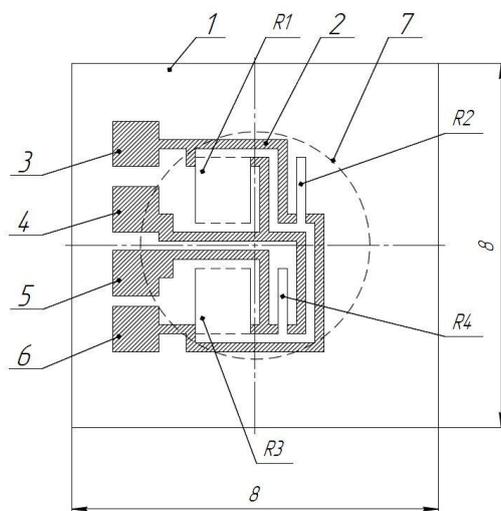


Рис.1. Тонкопленочный мостовой датчик температуры

Образец пластины 1 имеет размер 8x8 мм и толщину 0,25 мм. Размеры соответствуют тому случаю, когда используются платиновые резисторы  $R_1, R_3$ , а  $R_2, R_4$  — резисторы из нихрома. Соединения 2 резисторов между собой (заштрихованы), контактные площадки 3, 4, 5, 6 шин питания и измерения выполнены медно-никелевыми проводниками. Круг контакта с медными стержнями нагревателя 7, с одной стороны, и охладителя, с другой стороны имеет диаметр 5 мм. Изображенная на рисунке 1 электрическая схема термометра сопротивления наносится с обеих сторон образца-пластины. Для электроизоляции поверхность каждого

термометра сопротивления покрывается тонкой плёнкой двуокиси кремния или окиси кремния с помощью вакуумной депозиции.

### Устройства нагрева и охлаждения

Для создания стационарного перепада температуры между двумя поверхностями алмазной пластины используются нагреватель и охладитель (рисунок 2).

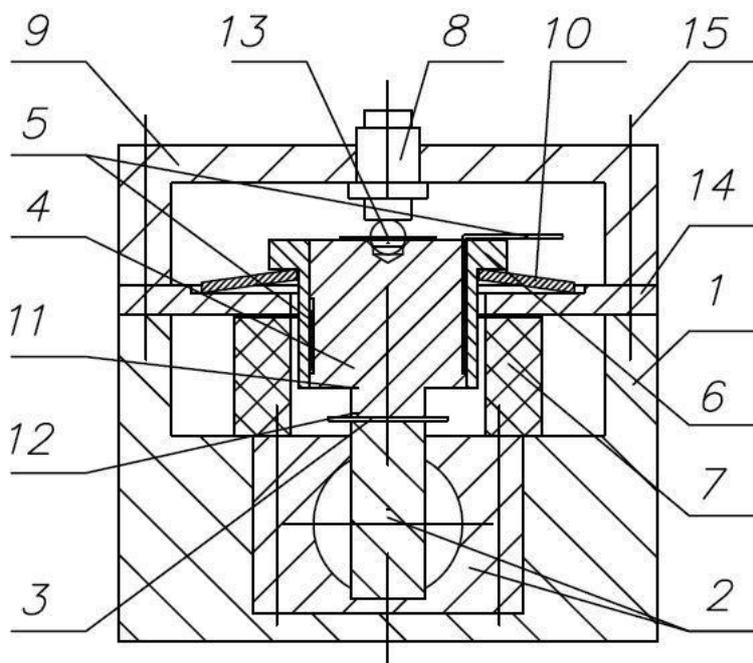


Рис. 2. Схема стенда:

1 – корпус, 2 - корпус охлаждения, 3 – алмазная пластина, 4 - стержень нагревателя, 5 - нихромовая проволока, 6 – стакан, 7 – теплоизоляция, 8 - винт микрометрический, 9 - крышка корпуса, 10 - пружина тарельчатая, 11, 12 – термопары, 13 - стальной шарик, 14 - опорная пластина, 15 - винт.

Нагреватель состоит из электроизолированной нихромовой проволоки 5, которая намотана на медный стержень нагревателя 4. С внешней стороны нагреватель закрыт медной трубкой 6, окруженной теплоизоляцией 7. В нижней части медный стержень 4 имеет диаметр 5 мм и торец стержня 4 контактирует с поверхностью алмазной пластины 3. С противоположной стороны алмазная пластина контактирует с верхней цилиндрической частью медного корпуса 2, охлаждаемого водой (корпус охлаждения). 11, 12 - хромель-алюмелевые термопары.

Обозначим  $T_1$  температуру, измеряемую термопарой 11,  $T_2$  - температуру, измеряемую термопарой 12,  $T_3$  - температуру на поверхности пластины 3 со стороны нагревателя,  $T_4$  - температуру на поверхности пластины 3 со стороны охладителя и  $T_w$  - температуру воды. В описанном устройстве имеют место теплообменные процессы, характеризующиеся следующими уравнениями:

$$w_{el}\eta = \frac{\lambda_m(T_1 - T_2) \pi d^2}{l} \quad (1)$$

$$\frac{\lambda_m(T_1 - T_2)}{l} = \frac{\lambda_a}{t}(T_3 - T_4) \quad (2)$$

$$\frac{\lambda_a}{t}(T_3 - T_4) \frac{\pi d^2}{4} = \alpha_w (T_4 - T_w) S_w \quad (3)$$

$$\alpha_w (T_4 - T_w) S_w = cV \frac{\pi D^2}{4} \Delta T_w \quad (4)$$

где:  $w_{el}$  - электрическая мощность нагревателя,  
 $\eta$  - коэффициент полезного действия нагревателя,  
 $\lambda_m$  - теплопроводность меди,  
 $l$  - длина контактного стержня,  
 $d$  - диаметр контактного стержня,  
 $\lambda_a$  - ожидаемая теплопроводность пластины 3,  
 $t$  - толщина пластины,  
 $\alpha_w$  - коэффициент отвода тепла для скорости воды  $V$ ,  
 $S_w$  - площадь поверхности охлаждения,  
 $c$  - объемная теплоемкость воды,  
 $D$  - диаметр водопроводной трубки в корпусе охлаждения,  
 $\Delta T_w$  - изменение температуры воды.

Допустим, что перепад температур на пластине равен  $2^\circ\text{C}$ . Тогда через пластину проходит тепловой поток  $20 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$ . При диаметре медного стержня равном 5 мм этому тепловому потоку соответствует мощность 392,4 Вт. Принимая коэффициент полезного действия нагревателя равным 0,5, получим электрическую мощность нагревателя 684,8 Вт. Из уравнений (3,4) следует, что вода почти не изменяет свою температуру, а температура на поверхности алмазной пластины 3 будет равна  $T_4 \approx 146^\circ\text{C}$ . Из уравнений (1,2) получим (при длине контактного медного стержня равной 2 мм, и  $T_2 \approx T_3$ ), что температура, измеряемая термопарой 11 равна  $T_1 = 248^\circ\text{C}$ .

Для нагрева медного стержня 4 используется нихромовая проволока 5, в изоляции. Концы проводов нагревателя выходят через проточку в детали 4. Провода нагревателя через более толстые медные провода подсоединяются к симисторному усилителю электрической мощности PR1500, который управляется регулятором ТРМ148. Программа регулятора задается по величине температуры  $T_1$ , измеряемой термопарой 11, которая используется в качестве обратной связи для регулятора.

Устройство охлаждения образца состоит из медного корпуса 2, имеющего в верхней части контактный цилиндр диаметром 5 мм. Корпус 2 охлаждается водой.

Нагревательное устройство устанавливается на тарельчатую пружину 10 и связано с головкой точного винта 8 при помощи шарика 13, который расположен в углублении детали 4. Пружина 10 позволяет регулировать напряжения в контакте стержня 4 с образцом 3. Это достигается вращением верхней головки точного винта 8 с помощью ключа. Определённому перемещению винта соответствует известное усилие пружины 10. Производя начальную градуировку усилий пружины без образца при контакте стержня 4 с корпусом 2, мы можем добиться хорошего механического контакта поверхностей при допустимых напряжениях. В случае необходимости точного измерения контактных напряжений конструкцию стенда можно доработать, соединив корпус 2 тарированными пластинчатыми пружинами с нижней частью корпуса стенда 1.

Термопары 11 и 12 устанавливаются, как показано на рисунке 2 в узкие пропилы в головке стержня 4. Термопарная проволока хромель и алюмель диаметром 50 мкм сваривается между собой и для электроизоляции покрывается эпоксидным клеем, затем устанавливается в свой пропил и закрепляется клеем. Возможно также зачеканить конец каждого вида термопарного провода вблизи друг друга без образования спая. На расстоянии 10 см к тонким термопарным проводам нужно подпаять более толстые (0,5 мм) одноименные провода, которые будут присоединены к регулятору и к мультиметру.

### **Заключение**

С помощью метода и средств измерений, описанных в настоящей работе можно с высокой точностью производить измерения коэффициента теплопроводности пластин из синтетических алмазов.

*Разработка метода измерения теплопроводности проводится в рамках работы «Разработка перспективных технологий и конструкций изделий интеллектуальной силовой электроники для применения в аппаратуре бытового и промышленного назначения, на транспорте, в топливно-энергетическом комплексе и в специальных системах (силовой модуль с поликристаллическим алмазным теплоотводом)» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 14.429.12.0001 от 05 марта 2014 г.*

### **Список литературы**

1. Битюков В.К., Петров В.А., Терешин В.В. Методология определения коэффициента теплопроводности полупрозрачных материалов // Международная теплофизическая школа, Тамбов, 2004. – С. 3-9.
2. Духновский М.П., Ратникова А.К. Способ определения теплофизических характеристик материала и устройство для его осуществления//Патент РФ № 2319950 МПК G01N25/00 (2006).

3. Колпаков А., Карташев Е. Контроль тепловых режимов силовых модулей. //Компоненты и технологии. – 2010. – №4. – С. 83-86.
4. Определение теплопроводности алмазных поликристаллических плёнок с помощью фотоакустического эффекта // ЖТФ, 1999. – Т. 69. – Вып. 4. – С. 97-101.
5. Установка для измерения теплопроводности порошковых материалов // Тезисы докладов, представленных на Третью международную конференцию и Третью международную Школу молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (IHISM-07). – Саров, 2007. – С. 311-312.
6. Царькова О.Г. Оптические и теплофизические свойства металлов, керамик и алмазных плёнок при высокотемпературном лазерном нагреве // Труды Института общей физики им. А.М.Прохорова, 2004. – Т. 60. – С. 30-82.
7. Minutuarized thin film temperature sensor for wide range of measurement // Proc. of 2<sup>nd</sup> IEEE International workshop on advances in sensors and interfaces, IWASI. – 2007. – P.120-124.

**Рецензенты:**

Акишин П.Г., д.ф-м.н., старший научный сотрудник (доцент), заместитель начальника отдела, Лаборатория информационных технологий, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна;

Иванов В.В., д.ф-м.н., старший научный сотрудник (доцент), главный научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.