

УДК 536.087.92

А. В. МИТЯКОВ

## ГРАДИЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ФИЗИЧЕСКОМ И ПРОМЫШЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Описано применение градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в физическом и промышленном эксперименте. Созданы и протестированы новые градиентные датчики теплового потока повышенной теплостойкости. Приведены основные композиции для датчиков и их характеристики. Рассмотрены перспективы использования датчиков при температурах до 1300 К.

**Ключевые слова:** тепловой поток, датчик, эффект Зеебека, теплофизический эксперимент.

В современном эксперименте возможности цифровой преобразовательной техники превосходят уровень используемых датчиков. Одним из подтверждений этому служат датчики для измерения теплового потока (теплометрии). В работах [1—3] показано, что к наиболее перспективным относятся градиентные датчики теплового потока (ГДТП).

Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека — появлении термоЭДС с вектором напряженности, нормальным к вектору теплового потока, в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоЭДС. Схема ГДТП (рис. 1) впервые была представлена в 1947 г. в работе Л. Гайлинга [4].

Элементарная теория ГДТП обобщена в работах [4, 5] и в общем случае сводится к следующему.

В кристалле с анизотропными теплопроводностью, электропроводностью и коэффициентом термоЭДС при прохождении теплового потока в направлении, не совпадающем с главными осями кристалла, возникает поперечная компонента электрического поля.

Исходным материалом для ГДТП служат вырезанные из кристалла под углом  $\theta$  параллелепипеды, которые называют анизотропными термоэлементами (АТЭ). На рис. 1, а показано, что угол  $\theta$  не совпадает с главными кристаллографическими осями  $C_1$  и  $C_3$ .

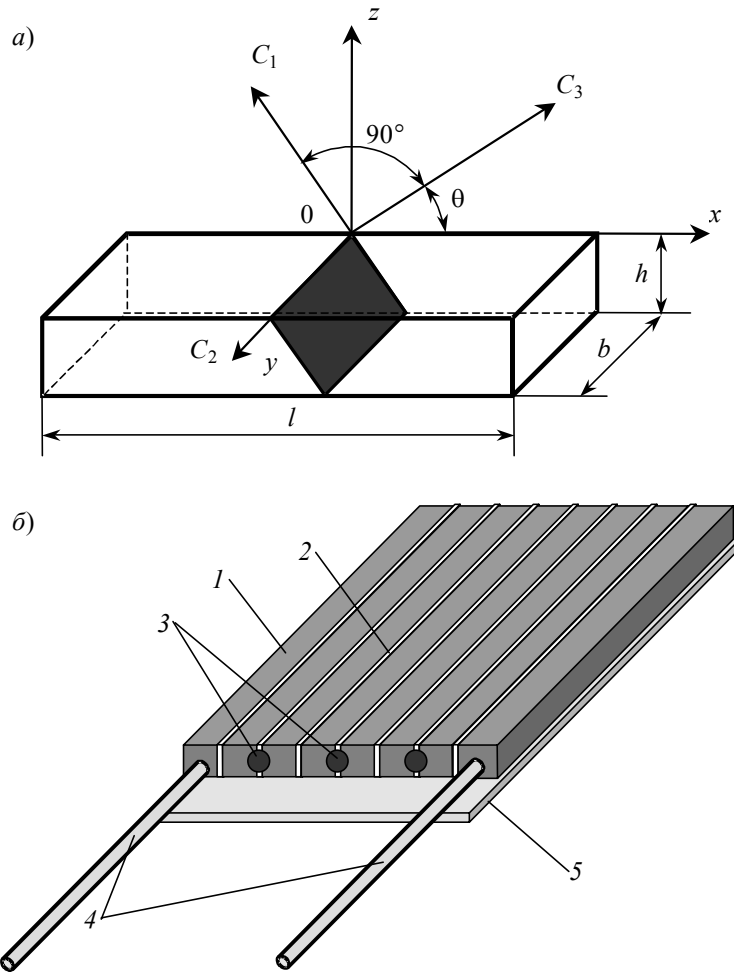


Рис. 1

Поскольку АТЭ обладает анизотропией теплопроводности, вектор теплового потока во всех сечениях, кроме плоскости  $z=0$ , будет отклоняться от оси  $z$ . Это означает, что разность температур возникает не только в направлении оси  $z$ , но и в направлении оси  $x$ , вдоль которой генерируется термоЭДС  $E_x$ , пропорциональная градиенту  $\partial T/\partial z$  (т.е., на основании закона Фурье, плотности теплового потока  $q_z$ ):

$$E_x = \frac{(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) \sin \theta \cos \theta \cdot F_0 q_z}{\sqrt{\lambda_{33}^2 \sin^2 \theta + \lambda_{11}^2 \cos^2 \theta} \cdot b},$$

где  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{33}$  — коэффициенты термоЭДС в направлениях осей  $C_1$  и  $C_3$  соответственно;

$\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{33}$  — составляющие тензора теплопроводности в тех же направлениях;  $F_0$  — площадь АТЭ в плане;  $b$  — ширина АТЭ.

Таким образом, величина  $E$  связана с плотностью теплового потока  $q$ , проходящего через сечение датчика, соотношением

$$E = qFS_0,$$

где  $F$  — площадь ГДТП в плане,  $S_0$  — вольт-ваттная чувствительность.

Конструкция типичного ГДТП ясна из рис. 1, б: АТЭ 1 соединены контактами 3 на основе из слюды 5; друг от друга элементы изолированы прокладками 2; крайние элементы снабжены выводами 4.

Градиентные датчики теплового потока конструкции Н. П. Дивина [6, 7] выполнены на основе монокристалла висмута чистоты 0,9999. Они обладают чувствительностью  $S_0=5\ldots 20$  мВ/Вт и рабочим диапазоном температур 20...540 К (верхняя граница близка к точке плавления висмута). Датчики имеют толщину около 0,2 мм. Форма их может быть произвольной; в опытах [1] использовались преимущественно прямоугольные датчики размерами в плане от  $1\times 1$  до  $10\times 10$  мм<sup>2</sup>. Ограничения на дальнейшее увеличение размеров связаны только со стоимостью и трудоемкостью изготовления. С другой стороны, благодаря небольшим размерам датчиков можно считать температуру поверхности в их окрестности постоянной, что делает возможным измерения теплового потока на неизотермических поверхностях.

Конструкция градуировочного стенда [1] обеспечивает сопоставление термоЭДС ГДТП с тепловым потоком от электрического нагревателя, измеряемым в соответствии с законом Джоуля — Ленца с погрешностью не более 1 %.

Наиболее интересную особенность ГДТП представляют их динамические характеристики. Исследования пяти датчиков из висмута толщиной от 0,2 до 4,0 мм показали, что постоянная времени всех датчиков практически одинакова [1]. По последним оценкам (полученным при облучении поверхности датчика с помощью импульсов лазера ОГМ-20 на длине волны 693,4 нм и регистрации сигнала осциллографом Tektronix) время реакции ГДТП из висмута составляет  $10^{-8}\ldots 10^{-9}$  с, что позволяет производить измерения теплового потока в различных процессах с частотой до 10 ГГц [2, 3].

Выявленное аномально высокое быстродействие ГДТП из висмута требует дополнительных исследований с позиции физики твердого тела, а также уточнения возможности использования результатов градуировки датчиков в стационарном режиме при измерении теплового потока, создаваемого импульсным лазером.

Простейшими датчиками продольного типа являются одиночные датчики, созданные в 1960-х гг. в Институте технической теплофизики НАН Украины (Киев) под руководством О. А. Геращенко [5].

Существенным недостатком одиночного датчика является низкая вольт-ваттная чувствительность. Значительно большей чувствительностью обладают многоспайные (батарейные) датчики [5]; число их спаев достигает нескольких тысяч.

Сопоставление возможностей датчиков продольного и поперечного типов в стационарной и нестационарной теплотрии [1] показало следующее. При стационарном режиме условия измерений, градуировки и другие характеристики датчиков обоих типов близки, но различия между ними остаются. Датчик продольного типа должен быть „термически толстым“, чтобы обеспечить максимальный перепад температур (и увеличить сигнал); это увеличивает искажения в поле температуры и, следовательно, методическую погрешность измерения. В то же время датчики поперечного типа можно делать тонкими, насколько это технологически возможно: градиент температуры в стационарном режиме от толщины датчика не зависит.

При нестационарном режиме принципиальное различие двух типов датчиков заключается в том, что сигнал датчика продольного типа пропорционален перепаду температур по всей толщине, а сигнал ГДТП, видимо, формируется в его тонком поверхностном слое. Анализ зависимости сигнала датчиков от времени показывает [1], что (при одинаковых размерах обоих датчиков) для получения приемлемой погрешности измерения (около 1...2 %) расчетное быстродействие типичного датчика конструкции О. А. Геращенко составляет около 4 с, а быстродействие ГДТП (если учитывать минимальный слой, в котором возможно формирование термоЭДС) —  $10^{-5}$  с.

Показания ГДТП достаточно стабильны: градуировки одного и того же датчика, выполненные в 1960-х и 1990-х гг. показали, что изменение вольт-ваттной чувствительности не превышает 1...2 %.

Начиная с 1996 г. в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) проводились исследования, в ходе которых с ГДТП регистрировалась информация о местной плотности теплового потока в процессах конвективного, радиационного и сложного теплообмена [1].

В частности, рассматривались классические задачи конвективного теплообмена: поперечное обтекание одиночного цилиндра (гладкого и с турбулизаторами), обтекание сферической лунки на пластине, каверн и траншей, свободно-конвективное обтекание вертикальной пластины. Во всех случаях температура обтекаемой поверхности поддерживалась (путем обогрева насыщенным водяным паром) на уровне 373 К. Опыты подтвердили работоспособность ГДТП и позволили выявить важные особенности теплообмена: установлено, в частности, что колебания плотности теплового потока происходят на частотах около 10 Гц.

В ходе исследований впервые в мировой практике была получена зависимость плотности теплового потока на поверхности камеры сгорания дизельного двигателя от угла поворота коленчатого вала [1].

Многочисленные работы, выполненные в ударных трубах и на промышленных турбогенераторах мощностью 160 МВт [1—3], показали, помимо прочего, что ГДТП являются единственными датчиками, работоспособными в условиях электромагнитных воздействий порядка 2...4 Тл и гамма-излучения.

К числу важных и принципиально неустранимых недостатков ГДТП из висмута относятся:

- низкая теплостойкость (до 544,5 К — точки плавления висмута);
- значительная трудоемкость и малая пригодность технологии изготовления к условиям промышленного производства;
- ограничения толщины датчика технологически достижимым пределом, равным 0,1 мм.

Изложенные причины привели к необходимости создания нового семейства ГДТП — гетерогенных ГДТП (ГГДТП) — на основе использования композитов с косослойным расположением металлических и полупроводниковых пластин, обладающих анизотропией эффективных теплофизических и электрофизических характеристик.

Теория ГГДТП достаточно полно представлена в работах [4, 5]. Показано, в частности (см. рис. 2, а), что сигнал, генерируемый единицей длины ГГДТП,

$$\frac{E}{l} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2\lambda_1} q \frac{k_\delta (k_\lambda - k_p)}{(k_\delta + k_p)(k_\delta + k_\lambda)} \sqrt{\frac{k_\delta + k_\lambda}{1 + k_\delta k_\lambda} \frac{1}{k_\lambda}}, \quad (1)$$

где  $E$  — термоЭДС ГГДТП;  $l$  — длина датчика;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — коэффициенты термоЭДС 1-го и 2-го слоев композита;  $k_\lambda = \lambda_2 / \lambda_1$ ,  $k_p = \rho_2 / \rho_1$ ,  $k_\delta = \delta_2 / \delta_1$  — безразмерные параметры, определяемые теплопроводностью  $\lambda_1, \lambda_2$ , электропроводностью  $\rho_1, \rho_2$  и толщиной  $\delta_1, \delta_2$  слоев композита.

Исследование функции  $E/l$  выявило ее монотонность по параметру  $k_p$  (пара материалов выбрана тем удачнее, чем больше разнятся значения  $\rho_1$  и  $\rho_2$ ); в то же время существуют экстремумы этой функции по двум другим параметрам.

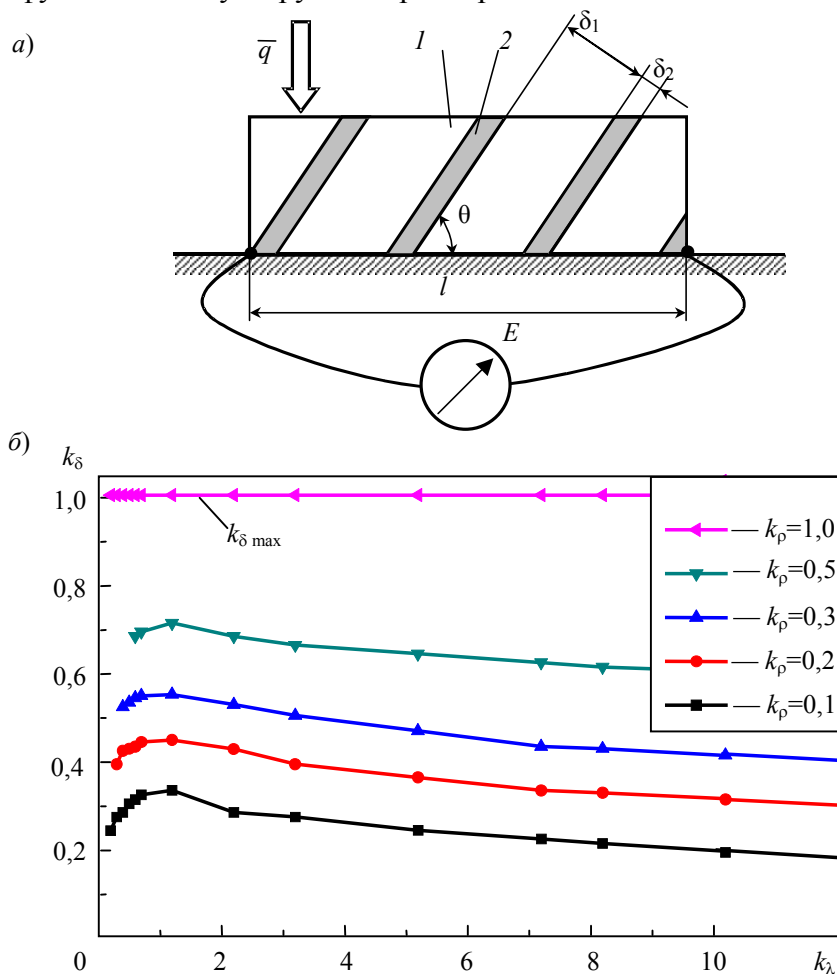


Рис. 2

При конструировании ГГДТП наиболее важно знать параметр  $k_\delta$ , задающий соотношение толщин слоев, составляющих композит.

Для функции

$$E^* = \frac{2q\lambda_1}{l(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} E = f(k_\lambda, k_p, k_\delta) \tag{2}$$

построен график (рис. 2, б), задающий значение  $k_{\delta \max}$ , соответствующее максимальному сигналу  $E$ .

Поскольку формула (1) получена в линейном приближении, она не может применяться в широком диапазоне температур, когда существенно изменяются  $k_p$  и  $k_\lambda$ . В то же время ее можно использовать на отдельных температурных участках, где линейное приближение допустимо, а затем выбирать значение  $k_\delta$  для рабочего интервала температур.

При создании композитов из разнородных материалов требуется, как принято считать, использовать достаточно специфичные технологии — такие как диффузионная сварка в вакууме [8, 9]. Существенных отличий по структуре и чувствительности ГГДТП, созданных с использованием вакуума и без него, не выявлено. Не отвергая возможностей диффузионной сварки в вакууме (например, для сплавов титана и других материалов с повышенной окисляемостью), простоту предложенной технологии можно считать одним из ее важных

преимуществ: композиты можно создавать в простейших условиях, широко варьируя ассортимент используемых материалов.

К настоящему времени созданы ГГДТП на основе композиций сталь 12Х18Н9Т + никель, сталь 65Х13 + никель, хромель + алюмель и железо + константан [10]. Эти ГГДТП применимы при температурах до 1300 К и выше.

Технология состоит в следующем. Металлические пластины из обоих материалов (сталь + никель и др.) должны быть обезжиренными, с высотой микронеровностей в 1...10 мкм. Стопку чередующихся пластин помещают в электрическую печь, сжимают давлением 0,1...0,2 МПа и нагревают до температуры, составляющей 0,5...0,7 от абсолютной температуры точки солидуса менее тугоплавкого материала (для чистых металлов — точки плавления). Время выдержки при этой температуре составляет 60...900 с. В результате сварки образуется многослойный брусок с анизотропией тепло-, электрофизических и термоэлектрических свойств. После охлаждения брусок разрезают на пластины, расположенные под углом 20...45° к его плоскостям. Изготовленные таким образом датчики градуируют. Значения вольт-ваттной чувствительности датчиков при температуре около 300 К приведены ниже.

Композиция	Чувствительность, мВ/Вт
Сталь 12Х18Н9Т + никель	0,40
Хромель + алюмель	0,35
Титан + молибден	0,02

Микроструктура одной из композиций (сталь 12Х18Н9Т + никель) представлена на рис. 3.

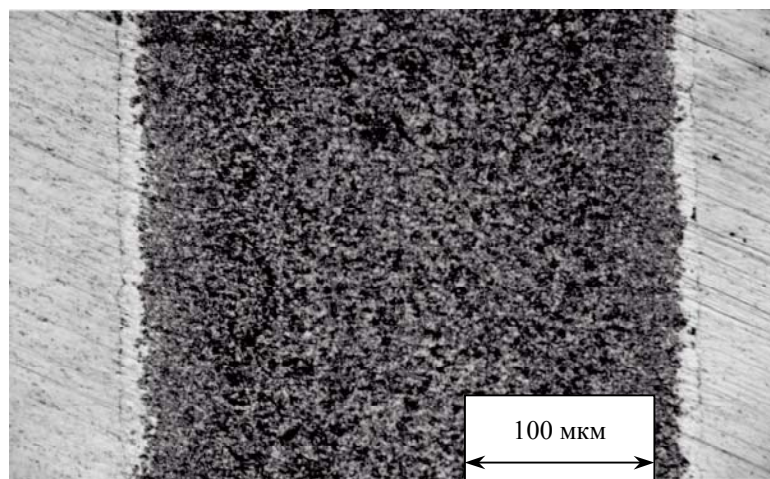


Рис. 3

Особый интерес вызывает применение композиций полупроводник + металл и полупроводник + полупроводник, поскольку значения коэффициентов термоЭДС у полупроводников на порядок и более превышают уровень, характерный для металлов.

ГГДТП из композиции кремний + алюминий был создан в СПбГПУ в условиях диффузионной сварки в воздушной среде (при температуре около 820 К и выдержке в течение 1 ч). Высокая степень растворимости алюминия в кремнии, что традиционно используется в цветной металлургии, сыграла положительную роль, обеспечив диффузионное соединение с образованием переходной зоны шириной 5...15 мкм.

Более перспективной представляется композиция из слоев кремния с *n*- и *p*-проводимостью. (Применяемая в технике полупроводников технология соединения стандартных кремниевых дисков (диаметром 60 мм и толщиной 0,35 мм) [9] трудоемка и в настоящее время не используется.) С использованием в качестве прокладок между слоями кремния алюминиевой фольги толщиной 0,05 мм по описанной выше технологии в СПб ГПУ был получен слоистый композит кремний + кремний. Чувствительность таких датчиков почти вдвое превышает уро-

вень, достигнутый ГГДТП из композита кремний + алюминий, а теплостойкость ограничена температурой размягчения кремния (1100 К).

Применение высокотемпературных ГГДТП оправдано как в условиях теплотехнического эксперимента, так и, что важнее, в промышленных условиях. В настоящее время датчики из композита сталь 12Х18Н9Т + никель устанавливаются на трубах котельных агрегатов взамен традиционных теплотеметрических вставок, что позволяет определить местные тепловые потоки в различных зонах котла, а в перспективе обеспечить исследование поля теплового потока в различных его зонах.

По мере накопления опыта и совершенствования технологии возникнут и другие приложения. Важно понять, что с появлением высокотемпературных ГГДТП существенно меняются как возможности, так и идеология теплотеметрии в энергетических установках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. СПб.: СПбГПУ, 2007. 202 с.
2. Митяков В. Ю., Можайский С. А., Сапожников С. З. Градиентные датчики для высокотемпературной теплотеметрии / Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, № 19. С.1—55.
3. Бобаишев С. В., Менде Н. П., Попов П. А. и др. Использование анизотропных датчиков теплового потока в аэродинамическом эксперименте // Там же. 2009. Т. 35, № 5. С. 36—42.
4. Geiling L. Das Thermoelement als Strahlungsmesser // Zschr. F. Angew. Phys. 1951. Bd. 3.12.
5. Геращенко О. А. Основы теплотеметрии. Киев: Наук. думка, 1971. 192 с.
6. Свид. на полезную модель № 9959. Датчик теплового потока / Н. П. Дивин. Приоритет от 10.08.1998.
7. Divin N., Sapozhnikov S. Gradient heat-flux transducers: application for heat investigations // Proc. of Intern. Symposium in Power Machinery. Moscow, 1995. P. 79.
8. Диффузионная сварка материалов: Справочник / В. П. Антонов и др.; Под ред. Н. Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
9. Воронков В. Б., Гук Е. Г., Козлов В. А., Шуман В. Б. Прямое сращивание кремниевых пластин с диффузионным слоем // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, № 6. С. 1—5.
10. Пат. на полезную модель № 75467. Датчик теплового потока (варианты) / В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, С. З. Сапожников. Заявка № 2007137839, приоритет от 04.10.07.

#### Сведения об авторе

**Андрей Владимирович Митяков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра теоретических основ теплотехники; E-mail: mitiakov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
теоретических основ теплотехники

Поступила в редакцию  
22.05.09 г.