УДК 537.32

Громов Г.Г., Глязер С.А., Захарцев Ю.В.

ООО «ПЛ Инжиниринг», Варшавское шоссе дом 46, Москва, 115230, Российская Федерация

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований датчиков теплового потока, изготовленных по технологии термоэлектрических микромодулей. Исследованы зависимости основных параметров таких датчиков от свойств термоэлектрического материала и параметров конструкции модулей. На основе теоретических исследований разработан новый метод самокалибровки термоэлектрических датчиков теплового потока используя измеренные значения добротности Z и сопротивления ACR модуля. Технология микромодулей позволяет изготавливать миниатюрные датчики теплового потока с широким диапазоном параметров для удовлетворения потребностей разнообразных применений. Подтверждены достоинства термоэлектрических датчиков теплового потока – высокая чувствительность, быстродействие, миниатюрность и масштабируемость, изменяемые по необходимости параметры и др.

Ключевые слова: термоэлектрический, модуль, теплота, поток, датчик.

Results of theoretical and experimental investigations of heat flux sensors based on the technology of thermoelectric micromodules are reported. There were investigated dependences of the main parameters of such sensors on properties of thermoelectric materials and parameters of module design. On the base of theoretical investigations a new method of self-calibrations of thermoelectric heat flux sensors using measurement of the module Figure-of-Merit Z and resistance ACR was developed. The technology of thermoelectric micromodules allows designing miniature heat flux sensors with a wide range of performance parameters on demands of variety of applications. Advantages of thermoelectric heat flux sensors – high sensitivity, fast response, miniature design, variable performance parameters, scalability, and some others were confirmed.

Key words: thermoelectric, module, heat, flux, sensor.

Введение

Выделение и поглощение тепла, потоки тепловой энергии сопровождают множество физико-химических превращений, имеют место в природных и техногенных процессах и являются результатом жизнедеятельности человека. Измерение тепловых потоков, как и температуры, позволяют контролировать эти процессы, получать нужную информацию, управлять ими. Тепловой поток обычно измеряют датчиками теплового потока [1].

Измерение теплового потока необходимо в различных областях: научные исследования; сельское хозяйство; климатология; промышленное и жилое домостроение; солнечная энергетика; промышленные применения; жилищно-коммунальное хозяйство; охрана и

безопасность и др. Датчики тепловых потоков, как и температуры, занимают значительную нишу на рынке современных сенсоров.

Единицы теплового потока и характеристики датчиков

Тепловой поток P_s измеряется в единицах мощности ватт на единицу площади перпендикулярно его направлению (Вт/м^2) или суммарного теплового потока P (Вт). Датчики теплового потока имеют чувствительность к тепловому потоку, которая также измеряется в двух типах единиц.

Чувствительность к плотности теплового потока S_e – отношение электрического сигнала датчика к плотности теплового потока P_e. Единицы – мкВ/(Вт/м^2).

$$S_e = \frac{E}{P_e} \tag{1}$$

Интегральная чувствительность – это отношение электрического сигнала датчика к суммарной мощности теплового потока, падающего на данный датчик P. Единицы – В/Вт.

$$S_a = \frac{E}{S \times P_e} = \frac{S_e}{S} \tag{2}$$

Понятие интегральной чувствительности роднит датчики теплового потока с фотоприемниками. С другой стороны это верно, так как излучение, это тот же поток энергии/тепла. Датчики теплового потока применяют для измерения теплового излучения.

Современные датчики теплового потока

Принцип действия большинства датчиков тепловых потоков основан на методе «дополнительной стенки» [1]. Суть – дополнительная стенка с известной теплопроводностью K располагается на пути теплового потока P, который требуется измерить. При прохождении теплового потока температурный градиент ΔT между сторонами стенки пропорционален величине теплового потока. Коэффициент пропорциональности – тепловое сопротивление стенки R_T, обратная величина теплопроводности:

$$\Delta T = R_T \times P \tag{3}$$

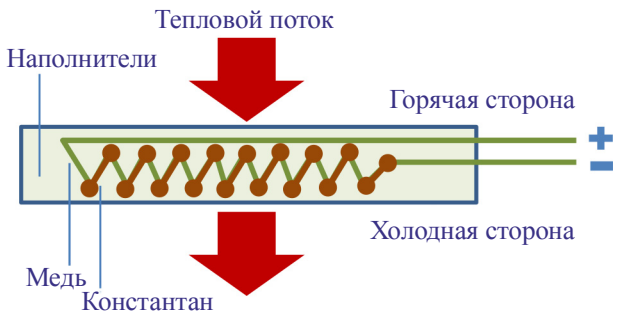


Рис. 1. Схематическое изображение датчика теплового потока из дифференциальных термопар.

В большинстве современных датчиков тепловых потоков для измерения создаваемой тепловым потоком разности температур используют дифференциальные термопары (рис. 1) [2]. Это эффект Зеебека в металлах. Абсолютные значения термоЭДС металлов невелики –

единицы и десятки мкВ/град. Поэтому конструкция большинства современных датчиков на основе дифференциальных термопар для увеличения чувствительности – это множество дифференциальных термопар, соединенных последовательно (рис. 1) [3, 4]. Плотность такой конструкции может достигать до 1000 – 2000 спаев термопар на 1 см^2. Этим обеспечивается кратное (количеству спаев N) увеличение термоЭДС.

$$E = N \times \alpha \times \Delta T \tag{4}$$

где α – коэффициент термоЭДС (коэффициент Зеебека) на спай, N – количество спаев, ΔT – градиент температур.

Термоэлектрические датчики теплового потока

В последние годы возрос интерес к применению термоэлектрических модулей в качестве датчиков теплового потока [5,6]. Термоэлектрические модули широко применяются для охлаждения (эффект Пельтье) или генерации энергии (эффекты Зеебека и Пельтье). Здесь тоже эксплуатируется эффект Зеебека, что является физической основой датчиков на дифференциальных термопарах. Конструкция термоэлектрических модулей аналогична матрице термопар – чередование термоэлементов из разных n- и p-типа полупроводников. Только здесь «спай» это пара термоэлементов из разных по проводимости полупроводниковых материалов (n- и p-типа), а в термопаре – это спай разнородных металлов.

В полупроводниках эффект Зеебека многократно выше, чем в металлах. Например, в медь-константановой термопаре термоЭДС на спай – 38 мкВ/°С. В термоэлектрическом охладителе на одну пару термоэлементов – более 400 мкВ/°С.

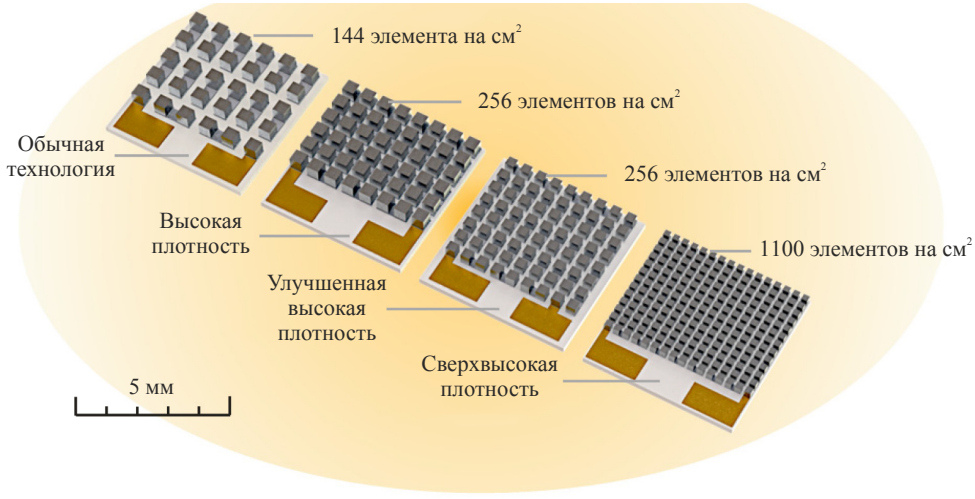


Рис. 2. Прогресс в миниатюризации и уплотнении термоэлектрических модулей на примере развития технологии микромодулей.

Хотя термоэлектрические модули давно применяются в качестве генераторов и охладителей, однако длительное время данное преимущество для датчикового направления не реализовывалось. Ключевой причиной являлась невысокая степень интеграции термоэлементов. Долгое время это было на уровне 100 – 150 элементов на 1 см^2. При невысокой степени интеграции термоэлектрических модулей, такие датчики проигрывают по

суммарной термоЭДС матрицам из дифференциальных термопар (4). Однако современный тренд в миниатюризации термоэлектрических модулей (рис. 2), главным образом из-за потребностей миниатюризации оптоэлектроники, где широко применяется термоэлектрическое охлаждение, привело к значительному прогрессу в конструкции термоэлектрических микромодулей. Современные термоэлектрические микромодули имеют степень интеграции, сопоставимую с датчиками на дифференциальных термопарах, что позволяет применять их в качестве датчиков теплового потока.

Миниатюрные и высокоплотные по упаковке модули изготавливаются в настоящее время по двум технологиям – тонкопленочная (новая) и объемная (традиционная) технологии.

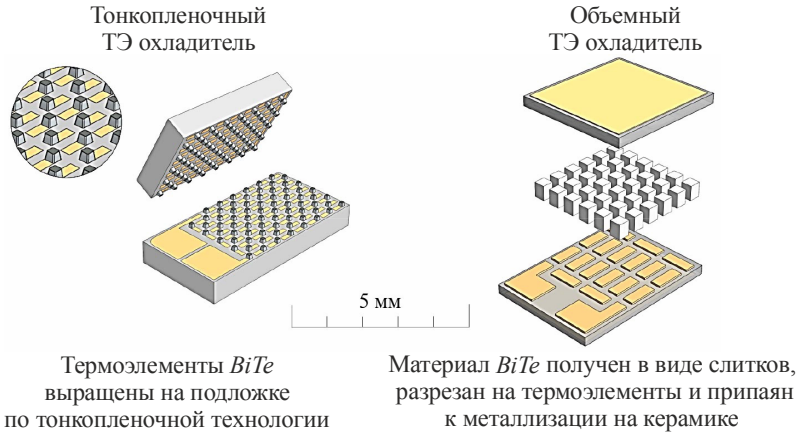


Рис. 3. Сравнение конструкций термоэлектрических модулей.

Каждая имеет свои достоинства и границы применения, но обе обеспечивают возможности производить действительно микромодули немыслимых совсем еще недавно миниатюрных размеров как всей конструкции (на уровне 1 мм^2 и менее) так и высокой плотности их упаковки.

Параметры термоэлектрических датчиков теплового потока

Абсолютная чувствительность

Величина электрического сигнала E термоэлектрического датчика.

$$E = 2N \times a \times \Delta T \tag{5}$$

где a – средний коэффициент Зеебека на один термоэлемент; $2N$ – количество термоэлементов.

Откуда с учетом (3) абсолютная чувствительность датчика S_a

$$S_a = \frac{E}{P} = 2N \times a \times R_T \tag{6}$$

В идеальном случае (тепло протекает только через термоэлементы):

$$R_T = \frac{1}{K_T} = \frac{1}{2N \times k \times \frac{s}{h}} \tag{7}$$

где K_T – теплопроводность датчика; k – удельная теплопроводность на один термоэлемент; $\frac{s}{h}$ – отношение площади сечения (s) термоэлемента к высоте (h) – форм-фактор термоэлемента f.

Откуда, чувствительность датчика

$$S_a = \frac{1}{f} \times \frac{\alpha}{k} \tag{8}$$

Чувствительность термоэлектрического датчика определяется отношением коэффициента Зеебека к удельной теплопроводности и обратно пропорциональна форм-фактору термоэлемента.

Важное следствие (8) – чувствительность не зависит от количества термоэлементов. Место этой зависимости занимает обратная пропорциональность форм-фактору. Т.е. чем меньше площадь сечения по отношению к высоте термоэлемента, тем чувствительнее датчик. Чувствительность можно увеличивать путем миниатюризации (малые сечения термоэлементов) при сравнительно большой высоте термоэлементов.

Удельная чувствительность

Удельная чувствительность S_e к плотности теплового потока получается из абсолютной чувствительности, если умножить ее на площадь чувствительной поверхности датчика S (2).

Тепловое сопротивление

Величина теплового сопротивления датчика теплового потока имеет определяющее значение. С одной стороны именно благодаря тепловому сопротивлению создается перепад температур (3), который вызывает сигнал датчика. Большое тепловое сопротивление – высокая чувствительность датчика. С другой стороны эффект присутствия измерительного датчика желательно свести к минимуму, поэтому «вспомогательная стенка», по возможности, не должна быть дополнительной, как ее иногда называют.

Постоянная времени

Для термоэлектрических датчиков применяем выражение, используемое для расчета постоянной времени термоэлектрических микроохладителей:

$$\tau = \frac{C_c}{f \times k \times 2N} \tag{9}$$

где C_C – полная теплоемкость керамики термоэлектрического модуля или обкладки датчика.

Способ калибровки термоэлектрического датчика

Для обеспечения высокой точности измерений необходима калибровка. Калибровка позволяет получить величину пропорциональности выходного сигнала таких датчиков от теплового потока. Для калибровки датчиков теплового потока применяются два способа.

Один способ – использование внешнего эталонного источника теплового потока [7, 8]. Такая калибровка проводится с применением специального оборудования и в лабораторных условиях. Может проводиться только при периодическом обслуживании с извлечением датчика из измеряемого объекта. Поэтому способ трудоемок, дорог и ограничен в применения.

Другой способ – в датчик встраивается эталонный тепловой источник [9, 10], например, напыленный на одну из его чувствительных сторон тонкопленочный резистивный нагреватель [10]. При известной выделяемой электрической мощности эталонного источника по сигналу отклика датчика определяется его чувствительность. Датчик с таким способом калибровки назван самокалибрующимся. Его достоинство в возможности проводить калибровку в любое время без

внешнего оборудования. Недостатком является то, что эталонный тепловой источник необходимо разместить в самом датчике. Это усложняет его конструкцию и удорожает производство.

Термоэлектрические модули уже давно и широко используются в задачах для охлаждения и генерации энергии. В этих применениях используется измерение ряда параметров модулей для определения их потребительских свойств и качества. Такими параметрами являются термоэлектрическая добротность Z, собственное сопротивление ACR и, реже, – постоянная времени τ. Использование данных параметров для определения основных свойств термоэлектрических датчиков тепловых потоков также является привлекательным.

Из формулы для чувствительности (6) следует ее зависимость от произведения $\alpha \times R_T$. Можно выразить это произведение через параметры Z и ACR термоэлектрического модуля:

$$Z = \frac{(2N \times a)^2 \times R_T}{ACR}. \tag{10}$$

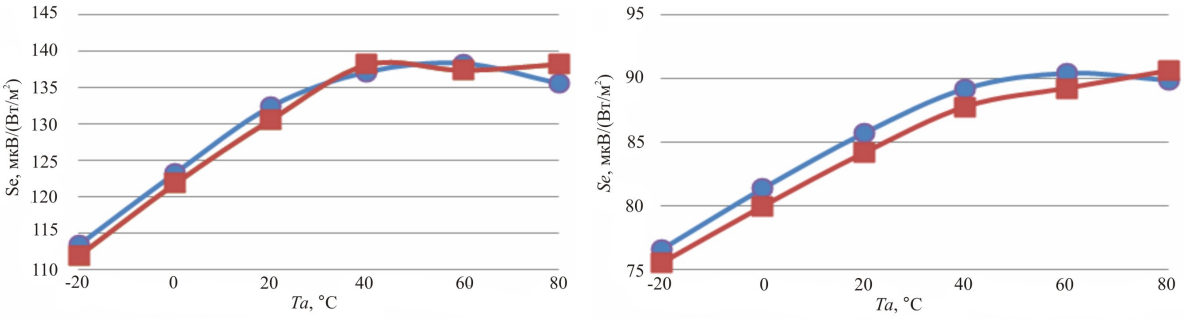
Отсюда

$$\alpha \times R_T = \frac{1}{(2N)^2 \times \alpha} Z \times ACR. \tag{11}$$

Тогда формула (6) преобразуется в

$$S_a = \frac{1}{a \times 2N} Z \times ACR. \tag{12}$$

Формула (12) является ключевой для нового способа калибровки термоэлектрических датчиков тепловых потоков. Конструкция термоэлектрического модуля ($2N$) заранее задана. ТермоЭДС α термоэлектрического материала, используемого для изготовления датчиков, может контролироваться. При известных площади чувствительной поверхности S, количестве термоэлементов $2N$ и величине термоЭДС α легко определяется чувствительность S_a и S_e по формулам (12) и (2) соответственно путем измерения термоэлектрической добротности Z и собственного сопротивления ACR.



Образец №1 *Образец №2*

Рис. 4. Сравнение результатов калибровки по способу с эталонным внешним источником (красные точки) с калибровкой по предложенному способу (синие точки).

Установленная чувствительность датчиков по данному способу не более 2% отличается от результатов эталонных измерений (рис. 4). Это является хорошим результатом для практического использования данного способа. Он не требует применения эталонных тепловых источников, не требует вывода датчиков из эксплуатации для процедуры калибровки, может проводиться с любой периодичностью.

Оптимизация конструкции датчиков

Как следует из выражений (8), (2), ключевые параметры термоэлектрических датчиков теплового потока зависят от их конструктивных особенностей:

1) свойства термоэлектрического материала – a, k.
2) параметры термоэлементов модуля, его термоэлементов – f
3) площадь поверхности S.

Технология позволяет изготавливать микромодули в широких диапазонах габаритных размеров, степени миниатюризации, коэффициентов упаковки, размеров термоэлементов и т.п. (рис. 2). Это делает возможным разрабатывать как отдельные, так и серии оптимизированных под различные применения датчиков теплового потока. Такая практика применяется компанией при разработке и производстве микромодулей для охлаждения и генерации. Подход применим и для датчикового направления.

Свойства термоэлектрического материала

Свойства термоэлектрического материала задаются технологией его изготовления. В оптимизации параметров датчиков вряд ли можно оперировать вариациями этих параметров в широких пределах. Единственным важным моментом, является необходимость выбора материала с максимальным коэффициентом термоЭДС α. Типично на уровне средних значений 200 – 240 мкВ/К.

Параметры термоэлектрического модуля

Конструктивными параметрами термоэлектрического модуля можно управлять в широких пределах. Технологии позволяют изготавливать модули из термоэлементов в широких диапазонах сечений и высот, разных плотностей упаковки и в большом диапазоне количества элементов.

Форм-фактор термоэлементов

Зависимость абсолютной чувствительности термоэлектрического датчика от форм-фактора (8) приведена в графическом виде на рис. 5. В таблице приведены значения форм-фактора типовых термоэлементов модулей. Соответственно, на рис. 5 отмечен диапазон чувствительностей датчиков тепловых потоков на основе модулей.

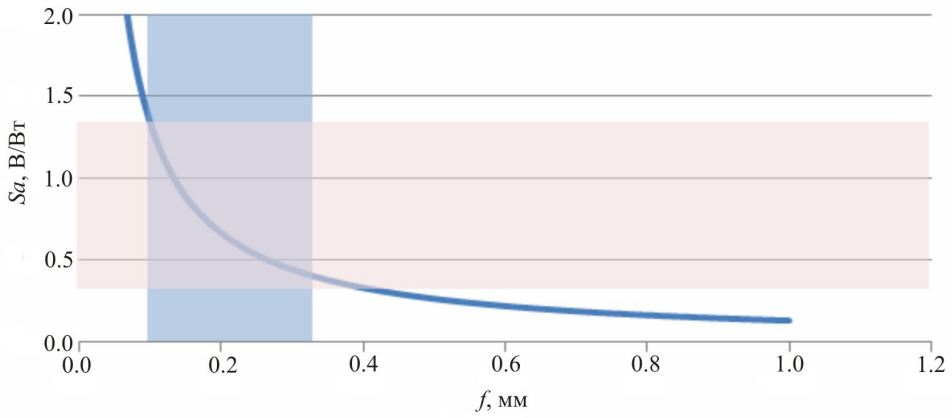


Рис. 5. Зависимость чувствительность термоэлектрического датчика теплового потока от форм-фактора его термоэлементов.

Таблица

Величины форм-факторов термоэлементов в производстве датчиков

Высота h, мм	f, мм (при заданном сечении термоэлементов $a \times b$)		
	0.2×0.2 мм	0.3×0.3 мм	0.4×0.4 мм
0.3	0.133	-	-
0.4	0.100	0.225	-
0.5	0.080	0.180	0.320
0.8	-	0,113	0.200
1.0	-	-	0.160
1.2	-	-	0.133
1.5	-	-	0.107

Высота термоэлементов

Из зависимости (рис. 5) и определения форм-фактора следует, что при заданном сечении термоэлемента чувствительность датчика будет увеличиваться с ростом высоты термоэлемента. Однако, с увеличением высоты термоэлемента, будет расти и постоянная времени датчика в соответствии с (9). Поэтому получение высоких параметров чувствительности датчика с хорошим быстродействием – это задача оптимизации для конкретного применения (рис. 6).

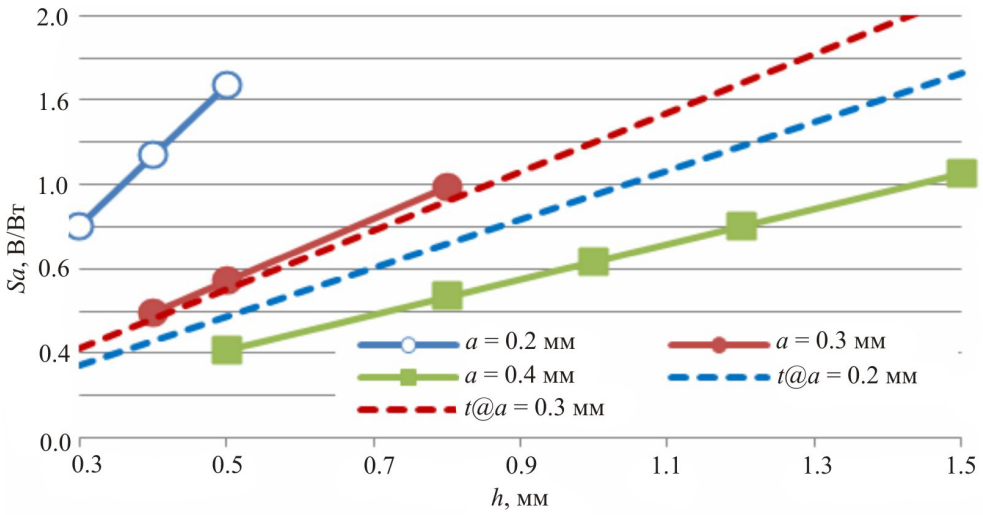


Рис. 6 Расчетные зависимости чувствительности Sa и постоянной времени τ от высоты термоэлементов для их разных сечений: 0.2; 0.3 и 0.4 мм.

Самые быстродействующие и чувствительные датчики возможны с использованием термоэлементов минимального сечения 0.2 мм. Высокая чувствительность достижима на больших сечениях, однако при этом уменьшается быстродействие из-за большой высоты термоэлементов.

Размеры датчиков

Чувствительность к плотности теплового потока *Se* зависит от площади приемной стороны датчика (2). В термоэлектрическом модуле – это его сторона. Размер термоэлектрического модуля определяется количеством термоэлементов, их сечением и плотностью упаковки.

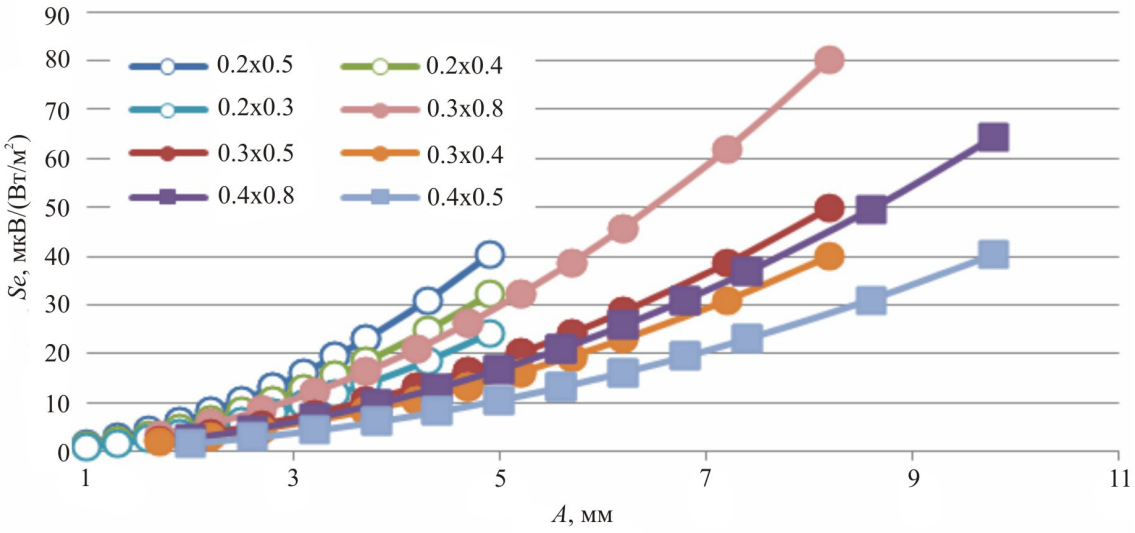


Рис. 7. Чувствительность S_ε термоэлектрических датчиков от их размера A.

Семейство экспериментальных датчиков теплового потока

На основе приведенного выше анализа была создана экспериментальная линейка датчиков теплового потока, состоящая из трех подтипов.

HTX – датчики теплового потока и температуры (HT – Heat flux & Temperature). Датчики содержат термоэлектрический датчик теплового потока и датчик средней температуры (Pt1000). Круглая форма, внешние стороны – алюминий с черным покрытием. Заливка внутренних компонентов – силиконовая.

HFX – датчики теплового потока без температуры (HF – Heat Flux). Квадратная форма, внешние стороны – керамика (AlN) с черным покрытием. Заливка внутренних компонентов - силиконовая.

HRX – датчики ИК радиационного теплового потока (HR – Heat flux Radiation). Миниатюрные термоэлектрические датчики теплового потока. Исполнение – SMD под поверхностный flip-chip монтаж, квадратная форма, внешние стороны – керамика нитрид алюминия.

Сравнение датчиков теплового потока

На рис. 8 в графическом виде приведено сравнение основных параметров экспериментальных серий датчиков теплового потока с представленными на рынке датчиками известных производителей.

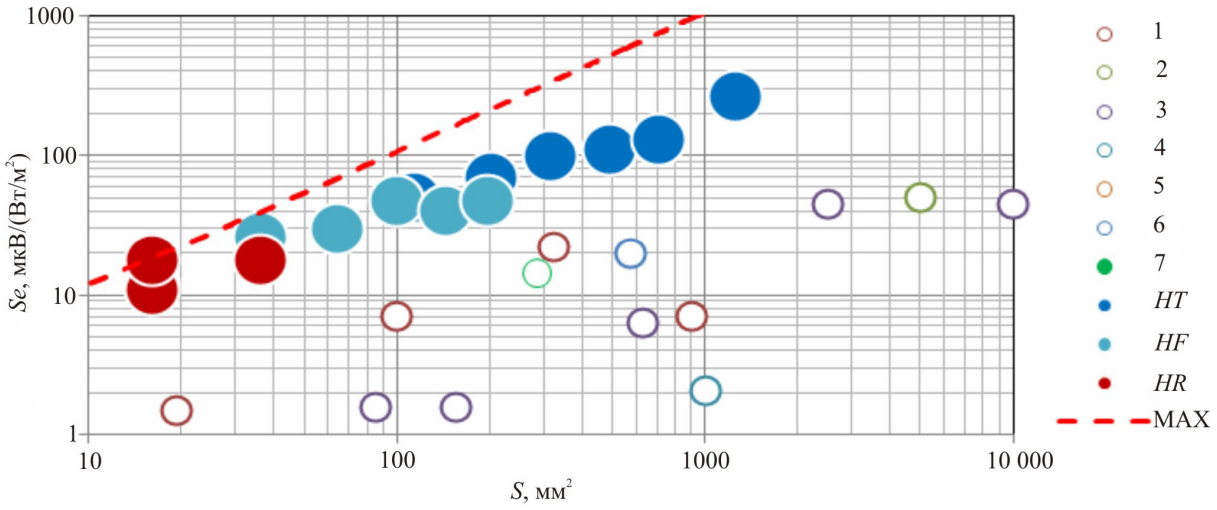


Рис. 8. Чувствительности S_ε датчиков тепловых потоков разных производителе (1-7) и экспериментальных серий (HT, HF, HR), в зависимости от площади. Пунктир – линия максимальных параметров по технологии .

Датчики разработанных серий имеют существенные преимущества перед датчиками тепловых потоков известных на рынке производителей.

1) Высокая абсолютная чувствительность, существенно более высокая, чем в датчиках на основе дифференциальных термопар.
2) Миниатюрный дизайн, благодаря высокой степени интеграции термоэлементов в микромодулях.
3) Управляемый коэффициент теплового сопротивления благодаря гибкости в конструкции микромодулей – управление высотой термоэлементов.
4) Высокое быстродействие.

Выводы

1. Термоэлектрические микромодули имеют три значимых по размерам рынка и перспективам направления применений: охлаждение, генерация и новое – датчики тепловых потоков.
2. В полупроводниках эффект Зеебека значительно выше, чем в металлах. Это делает применение термоэлектрических микромодулей в качестве датчиков тепловых потоков перспективным, способным конкурировать с датчиками на дифференциальных термопарах.
3. Чувствительность не зависит от количества термоэлементов. Определяется отношением коэффициента термоЭДС к удельной теплопроводности и обратно пропорциональна форм-фактору термоэлемента.
4. Разработан способ самокалибровки термоэлектрических датчиков тепловых потоков по *Z* и ACR, не требующих применения эталонных тепловых источников и вывода датчиков из эксплуатации для процедуры калибровки. Может проводиться с любой периодичностью. Имеет высокую точность.

Литература

1. T.E. Diller. Heat Flux. Copyright 2000 CRC Press LLC
2. D.J. Ortolano, F. F. Hines.. Advances Instrumentation, Vol. 38, Part II, 1983, pp. 1449-1456.
3. J. M. Hager, S. Onishi, L.W. Langley, T.E. Diller., AIAA J. Thermophysics Heat Transfer, 7, 1993, pp. 531-534.
4. J.P. Terrell. Proc. 42nd Int. Instrum. Symp., Research Triangle Park, NC: ISA, 1996, 235-249.
5. T. Leephakpreeda., ISA Transactions, 51(2012), pp. 345-350.
6. C. McKinnon, R.R. Bernardini, W. Thresher. S.L. Ruis, D.W. Yarbrough, Ecolibrium, may 2010, p. 32-36
7. United States Patent 4812050. Method for calibrating a heat flux gauge, 1987
8. ASTM C177 – 13. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
9. United States Patent 3599474. Self-calibrating heat flux transducer, 1969.
10. HFP01SC. Self-calibrating heat flux sensor. (Version 1003. Hukseflux. Page 1.) http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/HFP01SC%20v1003.pdf

Поступила в редакцию 22.12.2015.