

Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули

В последние годы в технологии создания термоэлектрических микромодулей достигнут значительный прогресс. Причем одновременно с прогрессом в так называемой объемной технологии получила развитие и новая методика изготовления термоэлектрических модулей, вобравшая известные операции технологий тонких пленок. Данные термоэлектрические модули именуют тонкопленочными. При наличии обоих типов на рынке возникает важный вопрос о конкуренции двух технологий и изделий, созданных на их основе: является ли новая тонкопленочная технология более прогрессивной, способной вытеснить давно существующую «объемную»? Анализ показывает, что для большинства современных применений объемные термоэлектрические модули, как холодильные, так и генераторные, сохраняют свои преимущества. При внешне кажущихся бесспорных достоинствах тонкопленочных охладителей и генераторов рабочие параметры и эффективность «объемных» модулей заметно выше. За тонкопленочными модулями будущее. В широком диапазоне применений оба типа изделий имеют свои ниши и, если их правильно позиционировать, скорее не конкурируют, а дополняют друг друга.

Геннадий ГРОМОВ
gennadi.gromov@rmtltd.ru

Введение

До настоящего времени традиционная технология изготовления термоэлектрических модулей (охладителей или генераторов) включала производство термоэлектрического материала в виде объемных слитков, изготовление из них термоэлементов и сборку термоэлементов в матрицы пар *n*- и *p*-типа.

За последние годы в этой технологии достигнут заметный прогресс как по свойствам полупроводниковых материалов, так и по технологии миниатюризации. В миниатюризации современные производители вплотную подошли к границам технологических возможностей [1–3]. Микромодули имеют размеры на уровне единиц миллиметра, а линейные размеры термоэлементов — на уровне 0,15–0,2 мм [1].

Новой технологией, получившей свое развитие в последние годы, является изготовление термоэлектрических модулей (рис. 1), в которых термоэлементы из объемного термоэлектрического материала заменены элементами, получаемыми методами тонкопленочного нанесения различными способами (вакуумное напыление, осаждение из растворов, MOCVD, MBE). Сама структура модуля создается методами нанесения тонких пленок и создания коммутационных рисунков из них.

Толчком к разработке технологии тонкопленочных термоэлектрических модулей и инвестированию в это новое направление явились многообещающие достоинства современных тонкопленочных технологий.

Прежде всего, такие технологии широко применяются в современной микроэлектронике, что должно обеспечить преимущества для массового выпуска (производительность, себестоимость).

Кроме того, совместимость технологий с производством полупроводниковых приборов обещает непосредственную интеграцию таких охладителей в устройства, которые требуют теплоотвода и охлаждения.

Тонкопленочные модули дают заметный импульс к дальнейшей миниатюризации термоэлектрических изделий, что весьма актуально для нужд опто- и микроэлектроники, где применяется термоэлектрическое охлаждение.

И наконец, тонкопленочные модули обещают большие перспективы в улучшении и без того высоких удельных характеристик, в частности, огромной холодильной или генераторной мощности, значительно превышающие возможности традиционных термоэлектрических модулей.

В связи с заметной разницей в технологиях изготовления появилась новая терминология, разделяющая термоэлектрические модули на так называемые объемные (bulk) и тонкопленочные (thin-film).

На рис. 2 схематично представлены различия в конструкции и технологиях изготовления. Тонкопленочные модули [4] собираются (спаиваются) из двух половин. Каждая из половин — это, например, кремниевая подложка, на которой формируется коммутационный рисунок и поверх него напылением создаются термоэлементы из тер-

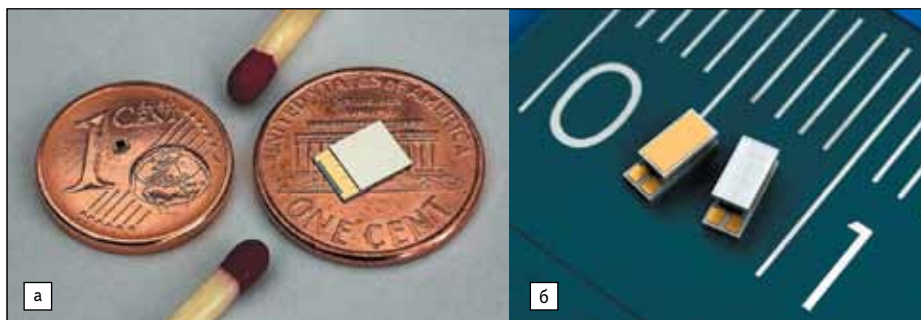


Рис. 1. Современный уровень миниатюризации:
а) миниатюрные тонкопленочные модули; б) объемные термоэлектрические модули

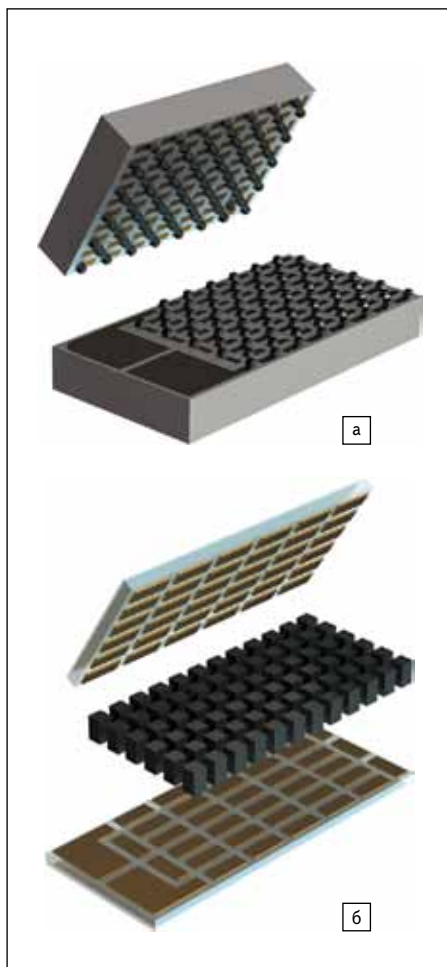


Рис. 2. Конструкция микромодулей: а) тонкопленочного; б) объемного

моэлектрического материала *n*- или *p*-типа (одна и вторая стороны), а уже поверх них наносится слой припоя. Для формирования такой конструкции рисунков и термоэлементов применяются методы напыления, фотолитографии и травления. Затем две стороны соединяются методом пайки.

Объемные микромодули изготавливаются путем предварительной подготовки коммутационных рисунков металлизации преимущественно на керамических подложках,

сборки матрицы из чередующихся объемных термоэлементов *n*- и *p*-типа и спаивания этой матрицы между данными керамическими подложками.

В мощных объемных модулях контакт между соседними термоэлементами усиливается прокладыванием дополнительно медных контактных пластинок.

Тонкопленочные термоэлектрические модули уже вышли из лабораторий и находят практические применения. Производители таких изделий уже присутствуют на рынке наряду с изготовителями традиционных объемных термоэлектрических модулей.

В то же время за объемными термоэлектрическими охладителями большинство современных рынков применений, устоявшаяся технология, проверенная надежность и разумные цены.

В связи с этим закономерны следующие вопросы. Что это, конкуренция новой и старой технологий? Вытеснят ли новые изделия и технологии традиционные? Где границы их сосуществования и конкуренции?

Поскольку термоэлектричество можно разделить на два сегмента — охлаждение и генерацию, то имеет смысл последовательно рассмотреть эти вопросы в обоих сегментах.

Термоэлектрическое охлаждение

Ключевыми для этой отрасли являются следующие характеристики термоэлектрических модулей — термоэлектрических охладителей (ТЭО):

- охлаждающая способность — глубина охлаждения;
- холодильная мощность;
- динамические характеристики;
- габаритные размеры.

В большинстве случаев в качестве примеров взяты известные на рынке объемные и тонкопленочные ТЭО схожих габаритных размеров.

На сегодняшний день существует только две компании, занятых выпуском тонкопленочных охладителей с довольно небольшой пока номенклатурой — три типа ТЭО у Laird-Nextreme [5] и два типа ТЭО

у Micropelt [4]. В качестве сравнения легко использовать номенклатуру модулей PMT [1], так как среди более чем 1800 выпускаемых наименований объемных ТЭО легко найти размерные аналоги.

Глубина охлаждения

На рис. 3 приведено сравнение по глубине охлаждения выбранных примеров (по данным производителей) в зависимости от температуры окружающей среды осушенного воздуха.

Способность охлаждать (максимальный перепад температур $\Delta T_{\max}$) зависит от термоэлектрической добротности Z ТЭО:

$$\Delta T_{\max} = 1 - \frac{\sqrt{1 + 2ZT} - 1}{Z}, \quad (1)$$

где T — температура окружающей среды.

В свою очередь, добротность ТЭО определяется свойствами термоэлектрического материала в нем:

$$Z = (\alpha^2 \sigma) / k, \quad (2)$$

где α — коэффициент Зеебека; σ — электропроводность; k — теплопроводность.

Глубина охлаждения $\Delta T_{\max}$ современных тонкопленочных модулей заметно (почти в 1,5–2 раза) уступает охлаждающей способности типичных объемных модулей (рис. 3).

Этот ключевой недостаток тонкопленочных микромодулей обусловлен фундаментальными физическими причинами. Здесь используются те же полупроводниковые материалы, что и в объемных ТЭО — твердые растворы на основе теллурида висмута и сурьмы.

Такие полупроводниковые материалы *p*-типа изотропны по термоэлектрической добротности Z . А в *n*-типе наблюдается сильная анизотропия — зависимость величины Z от кристаллической ориентации. Для объемных ТЭО термоэлементы из таких материалов изготавливаются специальными методами, оптимизирующими кристаллическую структуру и ориентацию. В тонкопленочных технологиях невозможно применить подобные приемы. Поэтому слабо текстурированные поликристаллические пленки термоэлектрического материала *n*-типа имеют добротность Z почти в два раза ниже.

Согласно приведенным данным (рис. 3), в объемных модулях величина Z составляет около $(2,6-3) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (рис. 4). В тонкопленочных ТЭО всего около $(1,1-1,2) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Вместе с тем только не оптимальностью кристаллической структуры нельзя объяснить столь низкую охлаждающую способность тонкопленочных модулей по сравнению с объемными.

Если в термоэлементах *n*-типа добротность в два раза ниже, чем у текстурированных объемных ТЭО, это должно отразиться в средней добротности пары тонкопленочных термоэлементов *n*- и *p*-типа, которая бы

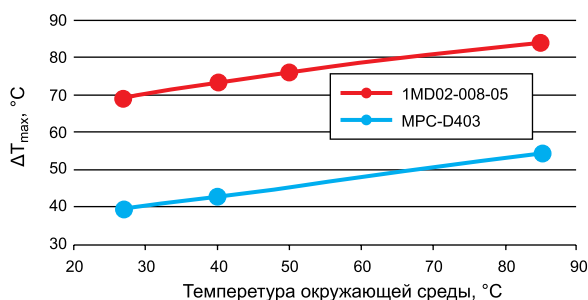


Рис. 3. Сравнение охлаждающей способности $\Delta T_{\max}$ в среде осушенного воздуха выбранных примеров выпускаемых модулей: 1MD02-008-05 и MPC-D403)

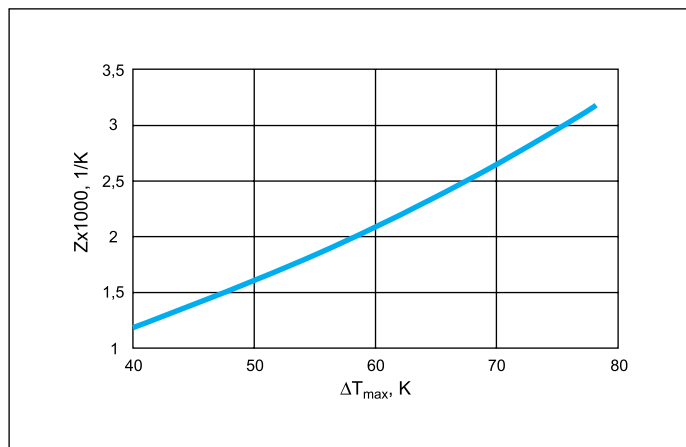


Рис. 4. Зависимость охлаждающей способности от термоэлектрической добротности в модуле (при T = 300 K)

составила величину около $Z = 2,2\text{--}2,3 \text{ K}^{-1}$. И охлаждающая способность — на уровне $\Delta T_{\text{max}} = 60\text{--}62 \text{ K}$.

Поскольку реальная охлаждающая способность тонкопленочных ТЭО значительно ниже, должны быть иные факторы в конструкции или принципиальные физические ограничения для тонкопленочных модулей.

Одним из таковых является контактное сопротивление — электрическое сопротивление между полупроводниковыми термоэлементами и коммутационными дорожками:

$$R_L = \frac{(\rho_L h + 2\rho_C)}{s}, \quad (3)$$

где R_L — сопротивление термоэлемента; ρ_L — удельное сопротивление материала термоэлемента; ρ_C — контактное сопротивление; h — высота термоэлемента; s — площадь сечения термоэлемента.

В конструкции термоэлектрических модулей термоэлементы имеют последовательную коммутацию, поэтому в общем сопротивлении такого модуля есть две составляющие: собственное сопротивление термоэлементов плюс сопротивление их контактов с коммутационными дорожками. На каждый термоэлемент приходится два таких контакта.

Типичные значения $\rho_L = (1\text{--}2) \times 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а $\rho_C = (2\text{--}3) \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. При снижении высоты термоэлементов ниже 0,1 мм вклад контактного сопротивления становится сопоставимым с сопротивлением термоэлементов. В объемных модулях контактным сопротивлением можно еще пренебречь, то в тонкопленочных ТЭО это заметная величина, значительно увеличивающая общее сопротивление, что становится существенным фактором снижения добротности ТЭО.

Следует отметить, что указанный недостаток в максимальной ΔT_{max} тонкопленочных ТЭО является, по-видимому, одной из причин, почему такие производители обычно предпочитают не приводить рабочие параметры при комнатной температуре (что ти-

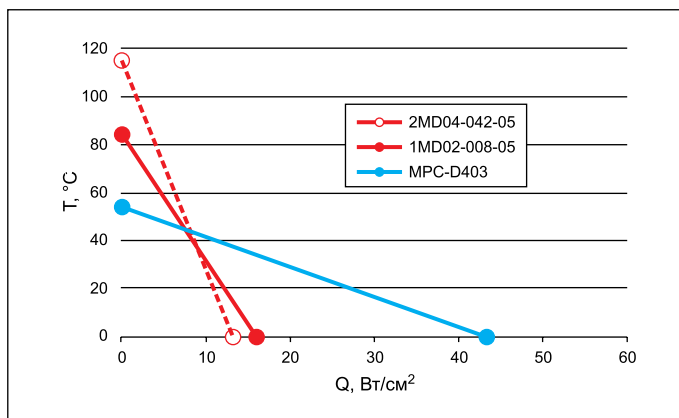


Рис. 5. Сравнение зависимости ΔT от Q для тонкопленочного MPC-D403 и объемных однокаскадного 1MD02-008-05 и двухкаскадного 2MD04-042-05 модулей при +85 °C при максимальных рабочих токах

Таблица 1. Стандартные спецификации производителей на выбранные примеры ТЭО сравнения

Условия измерений		ΔT_{max} , °C	Q_{max} , Вт	I_{max} , А	U_{max} , В	R_{elec} , Ом	A, мм	B, мм	C, мм	D, мм	H, мм
модуль MCP-D403 из каталога охладителей Micropelt [6]											
+85 °C (358 K)	воздух	54	0,67	0,24	5,5	23	1	1,55	2	1,55	1,09
	вакуум	65	—								
модуль 1MD02-008-05 из каталога охладителей PMT [7]											
+85 °C (358 K)	воздух	84	0,28	0,36	1,24	2,59	1,2	1,2	1,2	1,9	1,1
	вакуум	88	0,28	0,36	1,26	2,59					
+27 °C (300 K), вакуум		71	0,23	0,4	1	1,98					

пично для объемных ТЭО), а представляют данные при температурах, предельных для эксплуатации, — при +85 °C (табл. 1). При повышенной температуре, как известно, величина ΔT_{max} заметно выше (рис. 3).

Холодильная мощность

На рис. 5 приведено сравнение выбранных примеров ТЭО на типичных графиках зависимости ΔT от Q (где Q — в единицах плотности мощности).

При заданных электрических токах зависимости ΔT от Q для ТЭО имеют линейный характер. Крайняя точка на оси ΔT — это максимальный перепад температур (при заданном токе) ΔT_{max} , а на оси Q — это максимальная холодильная мощность Q_{max} при нулевом перепаде температур. На рис. 5 для конкретных примеров мощность Q представлена в виде нормированной величины на размер холодной стороны ТЭО, что удобно для сравнения модулей.

Тонкопленочный модуль, заметно проигрывая по ΔT_{max} , имеет, однако, преимущество по холодильной мощности.

Наиболее мощные объемные ТЭО, производимые PMT по специальной технологии, показывают Q_{max} на уровне 30–40 Вт/см². Для тонкопленочных модулей типичные значения Q_{max} находятся на уровне 40–100 Вт/см².

Здесь следует отметить один важный момент. Для объемных модулей указанные плотности мощности находятся на пределе возможностей объемной технологии изготовления. А для тонкопленочных заявляется, что возможны и более мощные решения.

Холодильная мощность напрямую связана с максимальным электрическим током, а больший ток возможен при уменьшении высоты термоэлементов. Для объемных термоэлементов высота на уровне 150–200 мкм — это предел технологии. Типичные же тонкопленочные термоэлементы имеют высоту на уровне 30–40 мкм, и ее возможно уменьшить. Вместе с тем уменьшение высоты термоэлементов тоже не безгранично, поскольку здесь вступают иные ограничивающие факторы: контактное сопротивление (3), теплопроводность материалов конструкции и т. п.

Кроме того, при очень больших плотностях мощности сам ТЭО становится проблемным объектом, от которого надо отвести большой тепловой поток, выделяющийся на горячей стороне. Суммарно необходимо отводить заметно больше тепла, чем полезное Q_{max} . Отвод больших тепловых потоков — непростая задача, делающая целесообразность «погони» за увеличением холодильной мощности ТЭО не столь очевидной.

Из представленного сравнения (рис. 5) можно сделать выводы, что тонкопленочные и объемные ТЭО скорее не конкурируют, а взаимно дополняют друг друга. Каждый из двух типов имеет свою нишу полезных применений.

Там, где требуется глубокое охлаждение, доминируют объемные ТЭО. А это большинство современных применений в оптоэлектронике и лазерной технике. Здесь тонкопленочные ТЭО с небольшой $\Delta T_{\text{max}} = 35\text{--}45$ °C вряд ли получат широкое распространение.

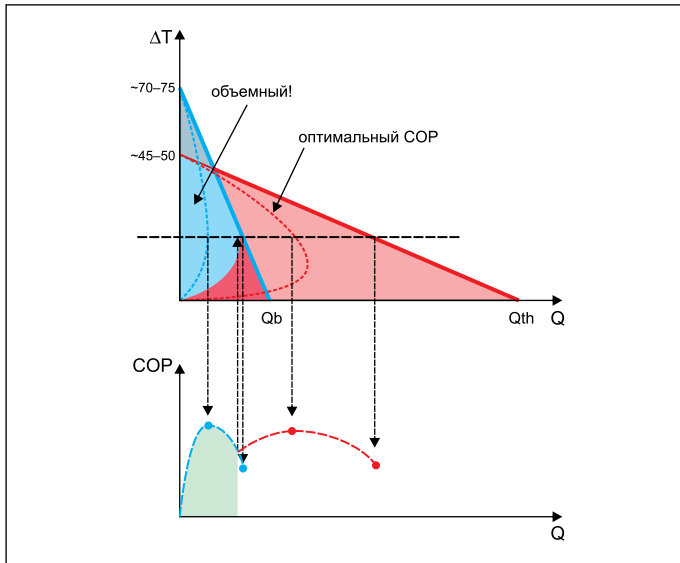


Рис. 6. Сравнение областей применимости тонкопленочных и объемных ТЭО

Кроме того, объемные ТЭО для таких применений могут изготавливаться в виде многокаскадных конструкций с увеличенным $\Delta T_{\max}$ (рис. 4). Многокаскадных тонкопленочных ТЭО на рынке и в лабораториях пока нет.

В то же время в применениях, где не нужно глубокое охлаждение, а требуется отвод максимального количества тепла, у тонкопленочных ТЭО есть преимущества. Здесь объемные ТЭО дошли до практического предела, а тонкопленочные, имеющие в несколько раз большие возможности, могли бы использоваться для отвода тепла от микропроцессоров, светодиодов и т. п.

В координатах ΔT от Q (рис. 5) существует довольно обширная область, перекрываемая характеристиками обоих типов ТЭО. Здесь есть кажущаяся конкуренция между изделиями двух технологий, однако при более глубоком анализе необходимо учитывать характеристику эффективности охлаждения, выражаемую коэффициентом COP (Coefficient of Performance) — отношением полезной холодильной мощности (Q) к затраченной на нее электрической мощности ($U \times I$):

$$COP = Q / (U \times I). \quad (4)$$

Можно показать, что в большей части пересекающейся области объемные модули будут работать эффективнее (то есть потреблять меньше энергии), чем тонкопленочные (рис. 6).

Динамические характеристики

Под динамическими характеристиками понимается скорость, с которой ТЭО способен охлаждать или даже нагревать объекты. Это весьма востребованная характеристика термоэлектрических модулей в применениях, где необходимо циклическое изменение температур или быстрый вывод объекта охлаждения на рабочую температуру — термоциклиеры и т. п.

У ТЭО, как электронного прибора, такой характеристикой является собственная постоянная времени. Это длительность экспоненциального переходного процесса в результате ступенчатого воздействия напряжением постоянного тока на ТЭО, в течение которого разность температур достигнет 63,2% от стационарного значения при установившемся стационарном токе.

Следует отметить, что ступенчатое воздействие при этом осуществляется приложением постоянного напряжения, а нарастание тока до стационарного значения будет коррелировать с изменением температуры до стационарной.

Миниатюрные ТЭО имеют весьма скоростные характеристики.

Постоянная времени зависит от теплопроводности ТЭО в направлении теплового потока и теплоемкости его элементов — материала термоэлементов, материала верхней и нижней сторон (рис. 2). При высотах термоэлементов менее 0,2–0,3 мм динамические характеристики в основном определяются теплоемкостью материалов холодной и горячей сторон. Поэтому тонкопленочные и объемные микромодули должны иметь сравнимые динамические характеристики.

Производители тонкопленочных ТЭО часто рекламируют высокие динамические параметры тонкопленочных микромодулей. Однако для сравнения чаще всего сознательно некорректно берут образцы больших объемных ТЭО, не предназначенных для таких применений [8, 9], в результате подобного анализа тонкопленочные микромодули показывают кажущиеся преимущества, в десятки раз превышающие параметры объемных модулей.

Попробуем разобраться на примерах. В таблице 2 приведены динамические характеристики объемных микромодулей PMT. Типичные значения — менее одной секунды.

Таблица 2. Примеры динамических характеристик объемных микромодулей PMT

Тип ТЭО	Общая высота, мм	Высота термоэлемента, мм	Стороны		Постоянная времени, с
			материал	толщина, мм	
1MD02-040-03/1	0,7	0,3	AlN	0,15	0,1
1MDD04-028-04	1,0	0,3	Al ₂ O ₃	0,25	0,23
1MD03-024-05/1	1,1	0,5	AlN	0,25	0,45

Таблица 3. Сравнение габаритов тонкопленочных и объемных микромодулей на примерах

Производитель	Тип ТЭО	Размеры: холодная сторона A×B, горячая сторона C×D, мм				Высота (H), мм
		A	B	C	D	
Micropelt [4]	MPC-D403	1	1,55	1	2	1,09
	MPC-D404	1	1,21		1,56	1,09
Nextreme [5]	HV14	1,77	1,15	2,04	1,89	0,6
	HV37	2,36	2,36	2,38	3,37	0,62
	HV56	3,54	2,36	3,54	3,57	0,6
PMT [1]	1MD02-004-03	1	1	1	1,6	0,8
	1MD02-024-05	2,1	2,1	2,1	2,7	1,1
	1MD03-015-04	2,5	3	2,5	3,9	0,9

Производитель тонкопленочных ТЭО компания Laird-Nextreme в стандартных спецификациях указывает некую динамическую характеристику, например, для модуля eTEC Series HV14 — “2 ms Response Time” [10]. Однако следует с осторожностью относиться к такому параметру. Очевидно, что он не имеет физического смысла постоянной времени. Там же в спецификации [10] производитель указывает максимальную скорость нарастания тока 1,75 А/с. При указанном в спецификации значении $I_{\max} = 1$ А постоянную времени такого ТЭО можно оценить как 0,36 с, что не отличается от значений объемных микромодулей PMT (табл. 2).

Компания Micropelt в целях увеличения динамических характеристик своих модулей значительно утончает кремниевые стороны микромодулей [8]. В результате скоростные характеристики улучшаются до 60–150 мс.

В целом, сопоставляя доступные данные, можно говорить о том, что как объемные, так и тонкопленочные микромодули имеют близкие динамические характеристики. Меры по увеличению динамики в обеих технологиях одинаковы: утончение, миниатюризация конструкции приводят к похожим результатам — лучшие значения на уровне 100 мс.

Необходимо отметить, что погоня за скоростными характеристиками миниатюрных ТЭО имеет свой предел — реальные минимальные размеры элементов конструкции. Кроме того, интегральная динамическая характеристика зависит от параметров объекта охлаждения. И часто его массивность, высокая теплоемкость и теплонатекания катастрофически снижают динамические характеристики.

Габаритные размеры

В силу применяемых технологий тонкопленочные модули изначально позиционировались как микромодули. Их типичные линейные размеры — единицы миллиметров. Изготовление

тонкопленочных модулей больших размеров сопряжено с технологическими трудностями (требования к точности совмещения, надежности контактов и т. п.). В результате увеличение линейных размеров ведет к нелинейному возрастанию себестоимости изготовления.

Для объемных ТЭО характерны две подобласти — это так называемые микромодули с условно размерами менее 10–15 мм и большие модули с размерами до 40–60 мм и более.

Дальнейшее увеличение линейных размеров (для применений, где нужны большие суммарные мощности) сопряжено со снижением надежности из-за возникающих напряжений в конструкции ТЭО материалов с разными коэффициентами линейного расширения (КТР).

Минимальные размеры современных объемных микроохлаждателей сопоставимы с размерами тонкопленочных. В таблице 3 все на сегодняшний день стандартные коммерческие тонкопленочные микромодули сопоставлены с несколькими схожими по размеру стандартными объемными микромодулями РМТ (или общей номенклатуры более 1800 типоразмеров).

Таблица 3 показывает, что тонкопленочные микромодули не имеют преимуществ в миниатюрности по сравнению с аналогичными объемными микромодулями. Более того, в силу более гибкого цикла разработки и производства объемные микромодули выпускаются в значительно большей и разнообразной номенклатуре.

Термоэлектрическая генерация

Здесь мы рассмотрим объемные и тонкопленочные термоэлектрические генераторы (ТЭГ) на базе сходных полупроводниковых материалов — так называемых низкотемпературных генераторных материалах на основе твердых растворов теллурида висмута.

Существует три типа объемных термоэлектрических генераторных модулей по температурным диапазонам, изготовленных из разных материалов, — низкотемпературный, среднетемпературный и высокотемпературный. Однако коммерческие тонкопленочные модули для генерации представлены в данной классификации пока только как низкотемпературные ТЭГ.

По сути, низкотемпературные термоэлектрические генераторные модули выпускаются из тех же материалов и по той же технологии, что и охладители. Можно даже сказать, что охладители используются с таким же успехом, как и низкотемпературные генераторы. Это в настоящее время набирающая популярность область преобразования энергии, утилизации окружающего, бросового тепла — energy harvesting/green energy.

Электрические характеристики

Эффективность термоэлектрического преобразования тепла определяется способ-

ностью ТЭГ вырабатывать термо-ЭДС (E) и обеспечить протекание рабочего тока (I). Основными соотношениями являются:

$$E = 2N \times \alpha \times \Delta T, \quad (5)$$

$$ACR = \frac{2N}{\sigma} \times \frac{h}{s} = \frac{2N}{\sigma} \times \frac{1}{f}, \quad (6)$$

$$I = E / (ACR + R_L), \quad (7)$$

$$U = I \times R_L, \quad (8)$$

$$P = U \times I = \left(\frac{E}{ACR + R_L} \right)^2 R_L, \quad (9)$$

где α — коэффициент Зеебека; N — количество пар термоэлементов; ΔT — перепад температур на сторонах генератора; ACR — внутреннее сопротивление ТЭГ (собственное сопротивление модуля, измеряемое на переменном токе); σ — электропроводность материала термоэлементов; R_L — сопротивление внешней электрической нагрузки; s — сечение термоэлемента; h — высота термоэлемента; $f = s/h$ — формфактор термоэлемента; U — напряжение нагрузки.

При одинаковых перепадах температур, что обычно позволяют сравнивать стандартные спецификации, тонкопленочные (Т — Thin) генераторы имеют кажущееся значительное преимущество перед объемными (В — Bulk). Это происходит из-за того, что большая плотность упаковки (Y) термоэлементов ($2N$) по площади поверхности (S) ТЭО обеспечивает более высокую термо-ЭДС (E_T и E_B соответственно):

$$Y = 2N/S, \quad (10)$$

$$E = \alpha \frac{2N}{S} \Delta T = \alpha Y \times S \Delta T, \quad (11)$$

$$\frac{E_B}{E_T} = \frac{\alpha_B}{\alpha_T} \times \frac{Y_B}{Y_T} \approx 1,5 \times (0,05 \dots 0,1) \approx 0,08 \dots 0,15. \quad (12)$$

Однако для анализа эффективности работы генератора необходимо сравнивать термо-ЭДС, вырабатываемые генераторами при одинаковых значениях теплового потока ($Q = \text{const}$). Здесь картина получается иная:

$$Q = K \times \Delta T, \quad (13)$$

$$K = k \times 2N \times f. \quad (14)$$

Откуда:

$$E = Q \frac{\alpha}{2kf}, \quad (15)$$

$$\frac{E_B}{E_T} = \frac{\alpha_B}{\alpha_T} \times \frac{k_T}{k_B} \times \frac{f_T}{f_B} \approx 1,5 \times 1,2 \times 0,3 \approx 0,5 \dots 0,6. \quad (16)$$

Максимальная полезная мощность ($P_{\max}$) может быть получена при согласованной электрической нагрузке ($R_L = ACR$):

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4ACR} = \frac{E^2}{4} \times \frac{f \times \sigma}{2N}, \quad (17)$$

$$\frac{P_B}{P_T} = \left(\frac{E_B}{E_T} \right)^2 \times \frac{f_B}{f_T} \times \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \times \frac{N_T}{N_B} \approx (0,5)^2 \times 0,3 \times (10 \dots 20) \approx 1,5 \dots 3. \quad (18)$$

В условиях одинаковых тепловых потоков ($Q = \text{const}$) объемный ТЭГ генерирует термо-ЭДС, сравнимую с тонкопленочным ТЭГ, а за счет меньшего внутреннего сопротивления, имеет заметное преимущество по выдаваемой электрической мощности.

Коэффициент полезного действия

Это один из ключевых вопросов для всех типов преобразователей энергии. У термоэлектрических генераторов это к тому же и слабое место — в целом низкая величина КПД. Для низкотемпературных ТЭГ она не превышает 4–5%.

Для ТЭГ КПД (η) можно выразить в первом приближении через добротность модуля и разницу температур на его сторонах как:

$$\eta = (Z/4) \times \Delta T. \quad (19)$$

В объемных модулях Z составляет величину около $(2,6 \dots 3) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (рис. 4). В тонкопленочных ТЭО — всего около $(1,1 \dots 1,2) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Отсюда:

$$\frac{\eta_B}{\eta_T} = \frac{Z_B}{Z_T} \approx 2,2 \dots 2,5. \quad (20)$$

Еще показательнее сравнение КПД при преобразовании одинаковой плотности теплового источника ($Q/S = \text{const}$); при этом ΔT могут отличаться. Площадь модуля (S) можно представить через число термоэлементов ($2N$), площадь сечения каждого (s) и коэффициент заполнения (x):

$$x = (2N \times s)/S, \quad (21)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{K} = \frac{Q}{k \times 2N \times (s/h)} = \frac{Q}{S} \times \frac{h}{kx}. \quad (22)$$

$$\eta = \frac{Z}{4} \times \frac{Q}{S} \times \frac{h}{kx}. \quad (23)$$

Сравнивая КПД двух типов ТЭГ при одинаковой плотности теплового потока ($Q/S = \text{const}$), получаем:

$$\frac{\eta_B}{\eta_T} = \frac{Z_B}{Z_T} \times \frac{h_B}{h_T} \times \frac{k_T}{k_B} \times \frac{x_T}{x_B} \approx (2,2 \dots 2,5) \times 5 \times 1,5 \times 4 \approx 6,5 \dots 7,5. \quad (24)$$

По КПД объемный ТЭГ значительно более эффективен, чем тонкопленочный. При

равных перепадах температур ($\Delta T = \text{const}$) объемный ТЭГ будет иметь более чем в два раза больший КДП по сравнению с тонкопленочным. А при равных тепловых потоках разница еще выше.

В таблице 4 и 5 представлены данные по выбранным для сравнения похожим по габаритам тонкопленочным и объемным ТЭГ. Параметры из спецификаций производителей позволяют сделать численные оценки, хорошо подтверждающие вышеприведенные расчеты.

Выводы

Современный уровень технологии изготовления объемных ТЭО позволяет им успешно конкурировать с тонкопленочными микромодулями по большинству параметров — по миниатюрности, холодильным параметрам и динамическим характеристикам.

1. Тонкопленочные термоэлектрические охладители имеют свои области применений для задач, где требуется отвод большого количества тепла с малой площади. При этом не приходится рассчитывать на заметное охлаждение.
2. Основной проблемой тонкопленочных термоэлектрических охладителей является крайне низкая эффективность термоэлектрического материала, что не позволяет получать большие перепады температур. Кроме того, до сих пор не известны решения по каскадированию тонкопленочных модулей, что, однако, хорошо отработано для объемных ТЭО и используется для увеличения глубины охлаждения.
3. Для большинства современных применений, где требуется термоэлектрическое охлаждение, объемные термоэлектрические охладители имеют преимущества перед тонкопленочными.
- 4) Тонкопленочные термоэлектрические генераторы имеют кажущиеся преимущества в части генерируемой термо-ЭДС. Большая величина термо-ЭДС делает более простым дальнейшее использование преобразованной энергии. Однако современные специально разработанные

Таблица 4. Данные по коммерческим микрогенераторным модулям из спецификаций производителей

Производитель	Тип ТЭГ	При $\Delta T = 10^\circ \text{C}$					$R_{\text{т}}$, К/Вт	R , Ом	А, мм	В, мм	Количество пар термоэлементов
		Е, мВ	$I_{\text{с}}$, мА	P , мВт	U, В	I , мА					
Nextreme [5]	eTEG PG24	0,18	24	1	0,09	12	21	7,5	2,09	2,02	72
Micropelt [4]	MPG-D655	0,8	5	0,94	0,4	2	22	170	2,87	2,89	288
RMT [1]	1MD03-008-04	0,032	44	0,36	0,016	22	185	0,7	2	2	8
	1MD02-040-03	0,16	27	1,07	0,08	13	63	6	2,7	2,7	40

Таблица 5. Данные по коммерческим микрогенераторным модулям по результатам расчета

Производитель	Тип ТЭГ	Площадь, мм²	При ΔT= 10 °C					
			Q, Вт	E/S, мВ/см²	P/S, мВт/см²	Q/S, Вт/см²	E/Q, мВ/Вт	η, %
Nextreme [5]	eTEG PG24	4,22	0,48	0,43	2,37	1,13	0,38	0,21
Micropelt [4]	MPG-D655	8,28	0,45	0,97	1,14	0,55	1,76	0,21
PMT[1]	1MD03-008-04	4	0,05	0,08	0,89	0,14	0,59	0,66
	1MD02-040-03	7,29	0,16	0,22	1,47	0,22	1	0,67

электронные DC/DC-преобразователи [11] с успехом работают от малых величин термо-ЭДС.

5. При корректном сравнении генерируемой термо-ЭДС относительно величины теплового потока, эффективность объемных ТЭГ заметно выше как по генерируемой мощности, так и по эффективности преобразования (КПД). Особенно заметно преимущество объемных ТЭГ по КПД.
6. Проблемами тонкопленочных ТЭГ является низкая эффективность полупроводникового материала термоэлементов и высокое сопротивление. Недостаточная эффективность термоэлектрического материала — это фундаментальное ограничение тонкопленочной технологии. Высокое сопротивление — цена миниатюризации и высокой плотности упаковки термоэлементов.
7. Для обоих применений (охлаждение и генерация) перспективы тонкопленочных термоэлектрических модулей могут быть связаны с поиском новых более эффективных термоэлектрических материалов. Однако если это будут новые термоэлектрические материалы, то, скорее всего, они также приведут к улучшению параметров и объемных модулей, что сохранит их преимущество, продемонстрированное выше.

8. Поэтому перспективы тонкопленочных модулей могут быть скорее связаны с применением специальных структур (квантоворазмерные структуры и т.п.). Но такие технологии дороги. Это будет долго оставаться сдерживающим фактором использования тонкопленочных технологий в коммерческом термоэлектричестве. ■

Литература

1. www.rmtltd.ru
2. <http://www.kelk.co.jp/english>
3. http://www.yamaha.co.jp/english/product/thermoelectric_cooler
4. www.micropelt.com
5. <http://www.lairdtech.com/nextreme/#.U2plC6OGiUk>
6. http://www.micropelt.com/downloads/datasheet_mpc_d403_d404.pdf
7. <http://www.rmtltd.ru/datasheets/1md02008.pdf>
8. http://micropelt.com/down/ict05_haboe.pdf
9. http://www.nextreme.com/media/pdf/whitepapers/Nextreme_Whitepaper_Use_of_Thin-Film_Thermoelectrics_in_PCR_Thermal_Cycling_NWP005.1.pdf
10. <http://lairdtech.thomasnet.com/viewitems/thermoelectric-modules-2/etec-series>
11. http://www.linear.com/products/Micropower_Boost