

Активные теплоотводы как новое направление в микроэлектронике

© Ю.Н. Бендрышев, В.И. Стрелов

ФИК РАН НИЦ «Космическое материаловедение». Калуга, 248640, Россия

Исследована проблема отвода теплоты, образующейся при работе электронных изделий. Проведен ряд экспериментов, подтверждающих эффективность применения микронасосов в качестве охлаждающих устройств для полупроводниковых приборов, компьютеров, видеокарт, лазеров, светодиодных систем освещения и т. д. Выявлены некоторые особенности использования микронасосов. Полученные результаты важны при разработке интегрированных систем (в том числе и по технологии MEMS).

Ключевые слова: активный теплоотвод, микронасос, пьезопровод, мембранный пьезопровод.

Введение. В подавляющем большинстве случаев для охлаждения электронных изделий используют так называемые пассивные (естественные) системы охлаждения без вентиляторов, выполненные в виде металлических (как правило, алюминиевых) радиаторов. При этом для охлаждения любого тепловыделяющего устройства, необходимо вначале отвести от него на некоторое расстояние теплоту, а затем рассеять ее в окружающей среде. Физика и механизмы этих двух взаимосвязанных процессов теплопередачи принципиально различны: в первом случае теплопроводность, во втором — конвекция. Основные используемые в настоящее время системы охлаждения — радиаторы, теплообменники и тепловые насосы.

Радиаторы. Естественная конвекция состоит из непрерывного процесса подхода к поверхности радиатора «холодных» частиц воздуха и их локального нагрева. Нагретые частицы воздуха (характеризуются большим удельным объемом) перемещаются вверх, освобождая место для новых «холодных» частиц. Выделенная при этом теплота в дальнейшем постепенно рассеивается. Окружающий воздух, играет таким образом роль своеобразного «теплорассеивающего насоса». Процесс рассеяния теплоты воздухом определяется в первую очередь параметрами так называемого пограничного слоя охлаждающего воздуха (его температурой, влажностью, скоростью естественной конвекции).

Теплопроводность материала радиатора, на поверхности которого происходит теплообмен, влияет на количество поглощенной воздухом теплоты опосредованно, через изменение температуры поверхности теплообмена. Зависимость теплоты рассеяния от теплопроводности материала имеет нелинейный характер с ярко выраженной асимптотой (рис. 1).

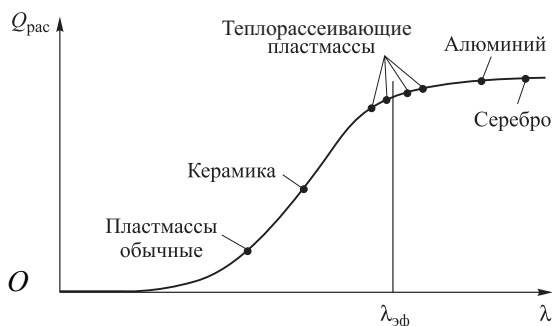


Рис. 1. Зависимость теплоты рассеяния от теплопроводности материала радиатора

Как показывает строгий теплофизический расчет [1], в условиях естественной конвекции воздух не в состоянии рассеять (принять) более (5...10) Вт тепловой энергии с единичной поверхности теплообмена.

Таким образом, воздушный «теплорассеивающий насос» имеет вполне ограниченную производительность и при выборе материала для радиаторов следует учитывать, что для передачи на поверхность охлаждения всей теплоты, которая максимально может быть принята окружающим воздухом, необходимо и достаточно иметь теплопроводность материала в интервале 5...10 Вт/м·К. В этой связи радиаторы, у которых теплопроводность материала превышает 5...10 Вт/(м·К), являются неэффективными ни с технической точки зрения, ни с экономической.

В таблице представлены результаты расчета «рабочей» температуры $T_{\text{раб}}$ прибора с тепловой мощностью 6 Вт [1], который охлаждался радиатором с шестью ребрами (50 × 52 × 30 мм), выполненным из разных материалов.

Результаты расчета «рабочей» температуры $T_{\text{раб}}$ прибора с тепловой мощностью 6 Вт

Материал радиатора	λ , Вт/(м·К)	$T_{\text{раб}}$, °С	Материал радиатора	λ , Вт/(м·К)	$T_{\text{раб}}$, °С
Обычная пластмасса	0,15	170	Коррозионно-стойкая сталь	18	66
Керамика	1,0	105	Алюминиевый сплав	90	63
Теплорассеивающие пластмассы	7	69	Серебро	400	62

Видно, что увеличение теплопроводности в 40 раз (от 0,15 до 7 Вт/(м·К)) приводит к уменьшению рабочей температуры почти на 100 °С, что дает значительный технический эффект. Дальнейшее по-

вышение теплопроводности еще в 40 раз (от 7 до 400 Вт/(м·К)) уменьшает рабочую температуру источника всего лишь на 7 °С.

Классический эксперимент по сравнению тепловых характеристик алюминия и теплоотводящих пластмасс в режиме естественного охлаждения был проведен группой под руководством профессора В.М. Кисеева в рамках разработки высокоэффективной системы охлаждения светодиодных светильников на базе тепловых труб (контурных термосифонов) [1].

Из алюминия и теплоотводящей пластмассы «Теплосток» были изготовлены одинаковые по размерам радиаторы охлаждения (рис. 2), внутри которых были вмонтированы медные трубки. По трубкам на входе поступал теплоноситель в виде пара с температурой T_v , который, сконденсировавшись и отдав теплоту конденсации, выходил в виде конденсата с температурой T_1 . Ключевой характеристикой эффективности охлаждения сравниваемых радиаторов принималась температура T_h теплогенерирующего устройства в данном случае кластера светодиодов.

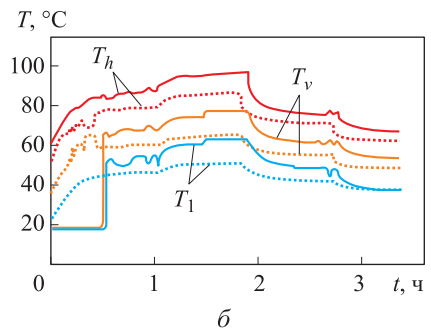
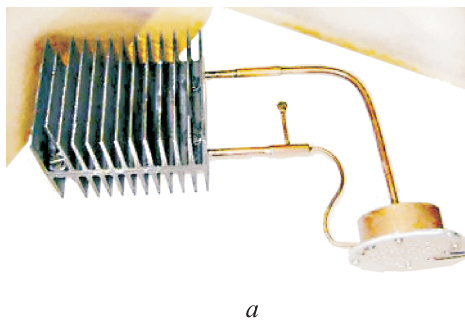


Рис. 2. Радиатор охлаждения (а) и характер изменения температур в процессе охлаждения:

сплошные линии — трубки из теплоотводящей пластмассы; штриховые — из алюминия

В результате проведенных исследований был сделан вывод, что обе конструкции продемонстрировали близкие теплоотводящие характеристики, а их температуры T_h отличались в среднем на 5...8 °С.

Эти и ряд других [2] экспериментальных результатов подтверждают, что повышать теплопроводность материалов радиатора выше 5...10 Вт/(м·К) нецелесообразно.

Теплообменники. Еще одним из способов утилизации выделяемой оборудованной теплоты является применение различного рода теплообменников, которые представляют собой специальные конструкции для обмена тепловой энергией между любыми теплоносителями (жидкости, газы). Теплота, согласно законам термодинамики, всегда передается к более холодному стоку. Теплообменники применяют в энергетической, нефтеперерабатывающей, химической, газодобывающей и других отраслях промышленности (рис. 3).

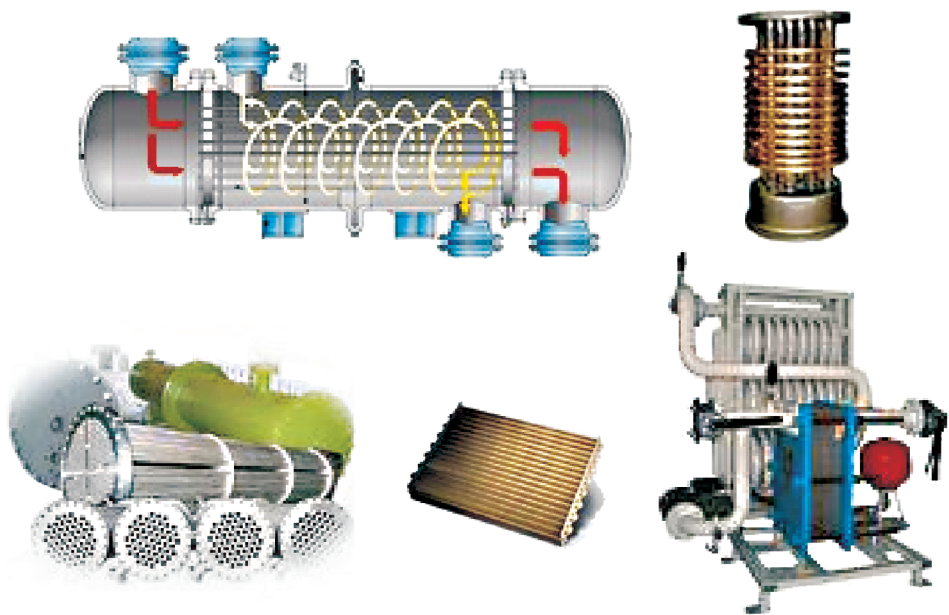


Рис. 3. Теплообменники различных конструкций

Конкретный вид теплообменника определяется как некий компромисс между его функциональным назначением и экономическими показателями.

Основным элементом теплообменника (рис. 4, а) является тепловая труба, которая представляет собой герметичное теплопередающее устройство, работающее по замкнутому испарительно-конденсационному циклу в контакте с внешними источником и приемником теплоты.

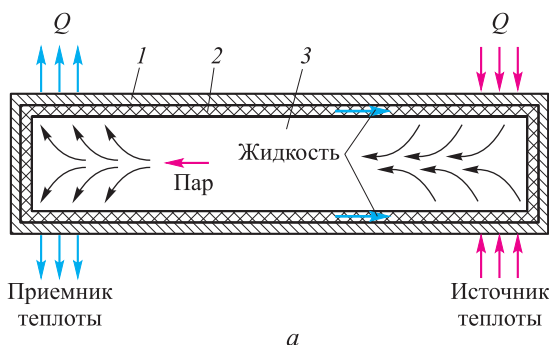


Рис. 4. Устройство тепловой трубы (а) и ее различные конструкции (б):

1 — труба; 2 — теплоизолятор

Теплоперенос в трубах вместо механизма теплопроводности (как в сплошных средах) осуществляется переносом массы теплоносителя, сопровождающимся изменением его фазового состояния (обычно

испарение рабочей жидкости и ее последующая конденсация). В настоящее время это самые эффективные устройства для передачи тепловой энергии. Отношение плотности передаваемого через них теплового потока к падению температуры на единицу длины трубы в десятки тысяч раз больше, чем теплопроводность меди или серебра.

Существует множество конструкций тепловых труб (рис. 4, б). При этом общим для них является наличие трех зон:

подвода теплоты — испаритель (именно здесь происходит поглощение теплоты и переход теплоносителя в паровую фазу);

транспортировки (собственно сама тепловая труба, внутри которой в одном направлении движется пар, в другом — конденсат);

отвода теплоты — конденсатор (ее задача обеспечить конденсацию паровой фазы и передать (рассеять) полученную при этом теплоту окружающему пространству).

Одними из самых перспективных являются контурные тепловые трубы (рис. 5). В контурной тепловой трубе зона транспортировки выполнена из двух труб: по одной идет конденсат, по другой — пар (см. рис. 5, а). Они имеют следующие преимущества:

непревзойденная теплопередающая способность; отсутствие механически подвижных частей;

для работы не требуется никакой дополнительной (внешней) энергии;

исключительно надежны и долговечны;

имеют низкую материалоемкость;

хорошо адаптируются к различным условиям размещения;

обладают низкой чувствительностью к изменению положения в пространстве.

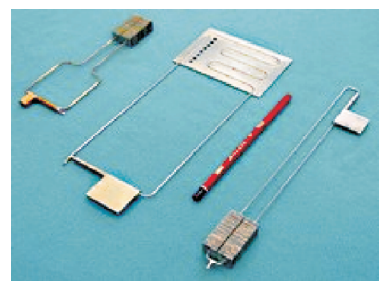
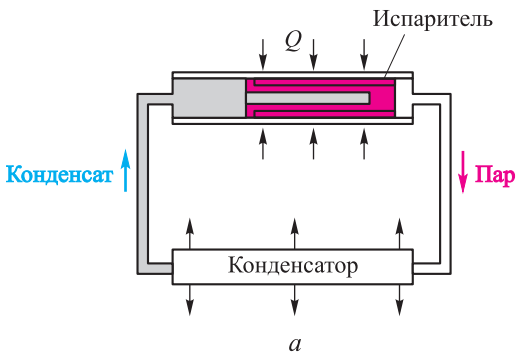


Рис. 5. Схема (а) и различные варианты (б) контурной тепловой трубы

Тепловые насосы. Основным принципом действия теплового насоса является поглощение низкопотенциальной теплоты из окружающей среды (вода, воздух, земля) и передачи ее в систему теплоснабжения потребителей в виде нагретой воды или воздуха.

Теплота передается рабочим телом — хладагентом (фреоном). Электроэнергия, потребляемая тепловым насосом, тратится лишь на перемещение фреона по системе с помощью компрессора точно так же, как в холодильных машинах. Основное отличие теплового насоса от других генераторов тепловой энергии (электрических, газовых и дизельных) заключается в том, что при производстве тепловой энергии до 80 % энергии извлекается (перекачивается) из окружающей среды. Средний коэффициент преобразования таких тепловых насосов составляет 4,5. Это значит, что для производства 4,5 кВт тепловой энергии устройство затратит всего 1 кВт электричества.

Существует великое множество различных конструкций тепловых насосов (рис. 6, а), однако основными элементами во всех этих конструкциях являются, по крайней мере, два: теплообменник-коллектор для сбора теплоты из окружающей среды вне отапливаемого помещения и теплообменник для рассеяния этой теплоты внутри помещения.

На рис. 6, б представлен один из вариантов воздушного теплообменника, используемого для нагрева или охлаждения помещения (фанкойл), который представляет теплообменник с вентилятором. Он забирает тепло или холод от теплоносителя и нагревает или охлаждает окружающее пространство.

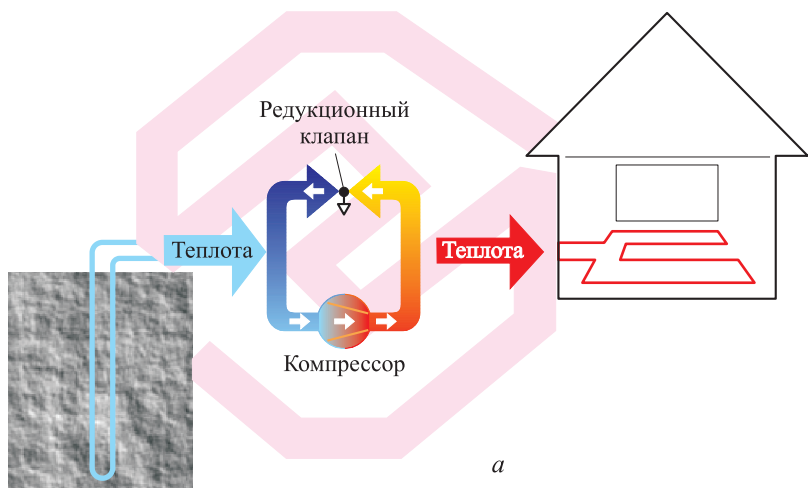


Рис. 6. Схема теплового насоса (а) и один из вариантов фанкойла (б)

Поскольку современная микроэлектроника, продолжая уменьшаться в размерах, увеличивает при этом свою производительность (быстродействие, информационный объем и т. п.), возрастает соответственно и плотность тепловой энергии внутри устройства. В этой связи возникает необходимость иметь более эффективные методы теплоотвода. Принудительное воздушное охлаждение стало сейчас необходимым даже для устройств, в которых ранее считалось достаточным естественное охлаждение.

Электронные изделия с большим энергопотреблением, такие как компьютеры и стационарные аудиовизуальные системы, обычно имеют какое-либо теплоотводящее устройство, например радиатор, тепловую трубку или вентилятор воздушного охлаждения. При этом возрастает потребность в охлаждающих устройствах для изделий небольших размеров, в которые эти устройства уже не могут быть установлены.

Для охлаждения таких изделий предлагается использовать микронасос, характерной особенностью которого является пьезокерамический привод в виде системного диска, что позволяет создать очень компактный и тонкий блок. Микронасос, использующий ультразвуковой вибратор из пьезоэлектрической керамики, работает как воздушный насос высокого давления или разрежения для воздуха в устройстве.

Несмотря на то что микронасос намного меньше по размерам, чем общепринятые устройства воздушного охлаждения (его размеры $20 \times 20 \times 1,85$ мм (без сопла)), он имеет улучшенные технические характеристики: максимальное статическое давление 1,9 кПа при размахе питающего напряжения переменного тока 15 В при расходе $1 \text{ дм}^3/\text{мин}$, что более чем на порядок превышает технические характеристики известных микронасосов подобной конструкции. Микронасос имеет также меньший уровень энергопотребления (около 250 мВт) по сравнению с общепринятыми устройствами воздушного охлаждения благодаря его пьезокерамическому приводу.

Основные области применения микронасосов:

газоанализаторы;

детекторы утечек;

медицинская аппаратура (например, регулируемая доставка инсулина и других лекарств в организм больного);

химия и биология (например, микродозаторы и т. п.);

вакуумные насосы;

гидропривод (системы перемещения и позиционирования, микродомкраты, системы наведения (прицелы) и т. д.);

сифонирование различных жидкостей;

охлаждающие устройства для мощных силовых приборов (встроенные или в виде подложек): компьютеры, видеокарты, высокоско-

ростные системы передачи данных, лазеры, светодиодные системы освещения и т. п.;

бытовое применение (микронасосы для аквариумов);

автомобилестроение (топливные насосы) и др.

Ниже в качестве примера представлены основные технические характеристики микронасосов фирмы MuRata при 25 °С (рис. 7):

Частота автоколебаний, кГц.....	24,0...27,0
Расход воздуха, $\text{дм}^3/\text{мин}$, при	
$U = 15 \text{ В}$	1
$U = 25 \dots 30 \text{ В}$	2*
Статическое давление, кПа	1,9
Габаритные размеры (без сопла)** , мм.....	20 × 20 × 1,85
Способ подключения	Пайка или непосредственный контакт

* Для доработанного варианта.

** Стандартная высота сопла 1,6 мм.

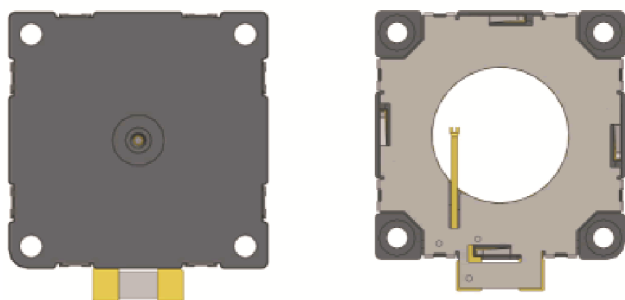


Рис. 7. Внешний вид микронасоса фирмы MuRata

Способы охлаждения электронных изделий в таких микронасосах в основном двух видов:

прямое воздушное охлаждение (рис. 8, а) — высокая скорость потока создает циркуляцию и охлаждение воздуха вокруг устройства;

эвакуация горячего воздуха (рис. 8, б) — охлаждение происходит путем отвода теплоты со всего устройства.

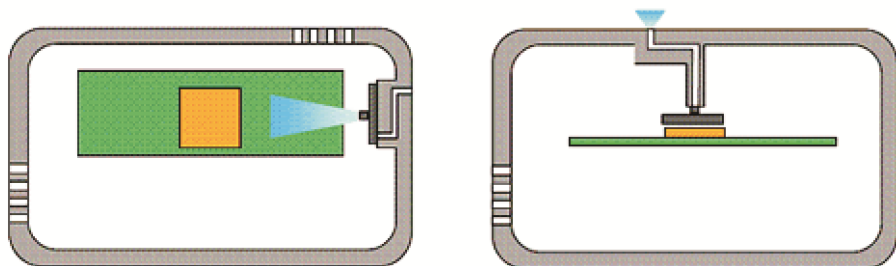


Рис. 8. Способы охлаждения с использованием микронасосов

В целях улучшения технических характеристик микронасос фирмы MuRata был усовершенствован и на нем были проведены эксперименты, подтверждающие эффективность применения микронасосов в качестве охлаждающих устройств для полупроводниковых приборов, компьютеров, видеокарт, лазеров, светодиодных систем освещения и т. д. Одно из усовершенствований заключалось в дополнительной установке в микронасос фирмы MuRata встроенной на системном диске схемы (микрочипа) возбуждения, использующей электромеханический резонанс системы и повышающей тем самым эффективность работы прототипа.

При этом при охлаждении были получены следующие результаты:

в маломощных полупроводниковых приборах пропускаемые токи и мощность рассеяния увеличились в 3...18 и более раз, при затрачиваемой на создание охлаждающего потока воздуха мощности около 250 мВт;

в мощных осветительных светодиодах отпала необходимость использования радиаторов охлаждения при увеличении мощности в 3–5 раз;

в маломощных лазерных диодах (без радиатора) с типовым током возбуждения до 50 мА рабочий ток увеличился до 240 мА.

Возможность управлять напряжением питания микронасоса от 5 до 40 В и более (в зависимости от электропрочности пьезокерамики) и тем самым регулировать скорость воздушного потока позволила создавать системы автоматического управления с необходимой для охлаждения температурой (рис. 9).

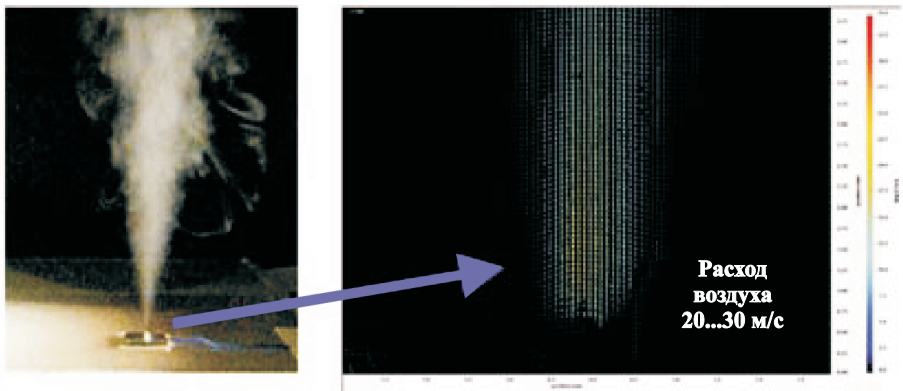


Рис. 9. Фрагмент работы усовершенствованного микронасоса

Заключение. Дополнительная установка в микронасос фирмы MuRata встроенной на системном диске схемы возбуждения, использующей электромеханический резонанс системы, существенно повысила эффективность работы прототипа. Кроме того, выявлены особенности установки микронасосов для получения максимально возможного эффекта охлаждения. Необходимо также отметить, что совместное приме-

нение микронасосов и радиаторов охлаждения из алюмонитридной керамики (так называемые микроэлектромеханические системы) позволит совершить качественный скачок в системах охлаждения, вплоть до полного отказа от громоздких и дорогих традиционных систем охлаждения, и обеспечить в ближайшем будущем их массовое применение в приборостроении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кисеев В., Аминев Д., Черкашин В., Мурзин Р. Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников. *Полупроводниковая светотехника*. 2011, № 3.
- [2] www.teplostok-plastic.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2014.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бендрышев Ю.Н., Стрелов В.И. Активные теплоотводы как новое направление в микроэлектронике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/eleng/1278.html>

Бендрышев Юлий Николаевич родился в 1954 г., окончил КФ МВТУ в 1978 г. Ведущий специалист ФИК РАН НИЦ КМ. Область научных интересов: термоэлектрогенераторы, микроэлектроника, акустическая электроника. e-mail: jnba@mail.ru

Стрелов Владимир Иванович родился в 1952 г., окончил МИЭЖ в 1976 г. Д-р физ.-мат. наук, директор ФИК РАН НИЦ «Космическое материаловедение». Область научных интересов: рост кристаллов, физика твердого тела. e-mail: strelovvi@kaluga.ru

Active heat sinks as a new concept in microelectronics

© Yu.N. Bendryshev, V.I. Strelov

SIC "Space Materials", Branch of the Crystallography Institute RAS,
Kaluga, 248640, Russia

We studied the problem of removing heat generated during the operation of electronic products. A number of carried out experiments proved the effectiveness of micro-pumps usage as a cooling device for semiconductor devices, computers, lasers, LED systems, and so on. We have identified some features of the micropumps use. The obtained results are very important for the development of integrated systems (including MEMS technology).

Keywords: active heat sink, micropump, piezodrive, membrane piezodrive.

REFERENCES

- [1] Kiseev V., Aminev D., Cherkashin V., Murzin R. Dvukhfaznye teploperedayuschie sistemy dlya okhlazhdeniya svetodiodnykh svetilnikov [Two-phase heat transfer system for cooling the LED lamps]. Poluprovodnikovaya svetotekhnika — Solid-State Lighting, 2011, no. 3, pp. 27–31.
- [2] www.teploatok-plastic.ru

Bendryshev Yu.N. (b. 1954) graduated from Kaluga branch of Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Leading Specialist of the SIC "Space Materials", Branch of Crystallography Institute named after A.V. Shubnikov RAS. Research interests include thermoelectric generator, microelectronics, acoustic electronics. e-mail: jnba@mail.ru

Strelov V.I. (b. 1952) graduated from Moscow Institute of Electronic Technology. Dr. Sci. (Phys.&Math.), Director of the SIC "Space Materials", Branch of Crystallography Institute RAS. Author of over 150 scientific papers in the fields of crystal growth and solid state physics. e-mail strelovvi@kaluga.ru