

УДК 621.389

**Высокоэффективные теплоотводы нового поколения
для электронных изделий**

В. И. Стрелов, Ю. Н. Бендрьшиев, В. Г. Косушкин

Исследована эффективность применения микронасосов с интегрально встроенной на системном диске схемой возбуждения. В микронасосе используется электромеханический резонанс системы для активного (с обратной связью) охлаждения функционально насыщенных микроэлектронных устройств полупроводниковых приборов. Показано, что такие микронасосы без дополнительных теплоотводящих материалов с очень малыми массогабаритными характеристиками и низкими энергетическими затратами можно располагать непосредственно на самом полупроводниковом кристалле вместе с микроэлектронным устройством. При этом при охлаждении полупроводниковых приборов микроэлектроники существенно (в 4 раза) повышается эффективность их работы. Обратная связь обеспечивает оптимальный температурный режим работы электронного изделия.

PACS: 85.85.+j; 44.24.+f, 44.27.+g

Ключевые слова: микроэлектроника, микронасос, обратная связь, теплоотвод, радиоэлектронные изделия, схема возбуждения, система охлаждения, ультразвуковой вибратор.

Введение

Повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов, т.е. возрастание функциональной насыщенности микроэлектронных устройств, приводит к тому, что задача теплоотвода в электронных изделиях становится важнейшим фактором надёжного функционирования. Повышенные температуры способствуют росту интенсивности отказов радиоэлементов, вызывают ускоренное старение конструкционных материалов. По этой причине при разработке конструкций радиоэлектронных систем необходимо обеспечить хороший теплообмен аппарата с окружающей средой.

Основным недостатком наиболее распространённых в настоящее время систем охлаждения является то, что они имеют большую массу и размеры. Поэтому разработчики электронных систем ищут новые, более эффективные, способы теплоотвода. В настоящее время системы охлаждения электронных компонентов фактически представляют собой отдельный сегмент рынка, где работают несколько десятков производителей.

В современной микроэлектронике в качестве принудительного охлаждения используются в основном пассивные теплоотводы (как правило, радиаторы, использующие естественный путь отвода тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением) и активные, включающие вентиляторы, термоохладители, которые, однако, требуют дополнительного питания и увеличивают весогабаритные характеристики электронных устройств.

При использовании радиаторов отвод тепла происходит путем естественной конвекции, включающей непрерывный подвод к поверхности радиатора «холодных» частиц воздуха и отвод этих нагретых слоёв за счёт разности плотности нагретых и холодных частей потока. Окружающий воздух играет, таким образом, роль своеобразного "пассивного теплорассеивающего насоса". При этом эффективность отвода тепла определяют такие параметры, как теплопроводность материала радиатора, температура и влажность окружающего воздуха, скорость естественной конвекции.

Стрелов Владимир Иванович, директор филиала.
Бендрьшиев Юлий Николаевич, ведущий инженер.
Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН,
Федеральный научно-исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника».
Россия, 248064, Калуга, ул. Академическая, 8.
Тел.: (84842) 72-96-60; 72-82-63.
E-mail: strelovvi@kaluga.ru; jnba@mail.ru
Косушкин Виктор Григорьевич, зав. кафедрой.
Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 248000, Калуга, ул. Баженова, 2.
Тел. (84842) 74-21-80. E-mail: kosushkin@gmail.ru

Статья поступила в редакцию 24 августа 2016 г.

© Стрелов В. И., Бендрьшиев Ю. Н., Косушкин В. Г., 2016

Как показывают расчеты и эксперименты [1, 2], 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 теплопроводности материала в интервале 5—10 Вт/(м·К) вполне достаточно, чтобы передать на поверхность охлаждения всё тепло, которое максимально может быть принято окружающей средой. Увеличение теплопроводности материалов радиатора свыше значений 5—10 Вт/(м·К) практически не влияет на его эффективность охлаждения.

Лучшее охлаждение обеспечивает принудительная конвекция за счет обдува вентилятором. В настоящее время промышленностью выпускаются вентиляторы, минимальные размеры которых составляют 15×15×6 мм и которые могут быть смонтированы на радиаторе (т.н. «кулеры»). Однако и принудительное воздушное охлаждение не всегда позволяет добиться требуемой рабочей температуры охлаждаемого устройства из-за недостаточной скорости отвода тепла от охлаждаемого устройства.

Еще более эффективными являются жидкостное охлаждение и термоохладители [3, 4], т.к. теплоемкость жидкостей значительно выше, чем газов. При этом эффективность охлаждения зависит от ряда факторов и, в первую очередь, от скорости охлаждающей жидкости, состава охлаждающей жидкости, наличия каналов охлаждения в радиаторе, материала радиатора и т.п. В термоохладителях используют устройства, действие которых основано на эффекте Пельтье [5], т.е. при протекании постоянного тока через цепь из двух разнородных проводников в местах контактов, в зависимости от направления тока, выделяется или поглощается тепло.

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки. Пассивный теплоотвод («теплорассеивающий насос») не требует дополнительных затрат энергии, отсутствуют движущиеся части, что делает метод простым и надёжным. Главным недостатком этого метода, как уже сказано, является низкая эффективность охлаждения и большие габариты радиаторов.

К недостаткам наиболее эффективной жидкостной системы относится возможность протечек, насос и вентилятор потребляют энергию, система обычно имеет достаточно большие габариты. Кроме того, все, что движется (вентилятор и насос), снижает надежность и является источником шума. Термоохладители надежны и бесшумны,

имеют малые габариты, однако их недостатком является большое потребление энергии, другими словами, термоохладитель сам является источником выделения тепла (на бесшумный, малогабаритный, надежный модуль устанавливают большой радиатор и мощный вентилятор, и все его преимущества пропадают), а, главное, для его работы требуются токи до десятков ампер. Заметим, что в последнее время возрастает потребность в охлаждающих устройствах именно для изделий небольших размеров, в которые перечисленные выше устройства уже не могут быть установлены.

В этой связи, при современной устойчивой тенденции к уменьшению габаритов электронных устройств, проблема разработки высокоэффективных охлаждающих устройств с малыми массогабаритными характеристиками, низкими собственными энергетическими затратами становится всё более острой, и тем сильнее, чем выше мощность устройств и меньше их физический объём.

Целью данной работы является экспериментальная демонстрация возможности эффективного использования разработанного микронасоса с обратной связью на примере охлаждения полупроводниковых изделий

Теоретическая часть

Разработанный микронасос конструктивно представляет собой ультразвуковой вибратор на пьезоэлектрической керамике. При этом на пьезо-керамическом диске привода насоса разработана и установлена несложная в изготовлении схема возбуждения с обратной связью («ноу-хау»), которая позволяет использовать ультразвуковой вибратор как пьезотрансформатор. Такую схему управления не сложно интегрировать непосредственно в микронасос.

На рис. 1 представлена разработанная схема возбуждения микронасоса с положительной обратной связью.

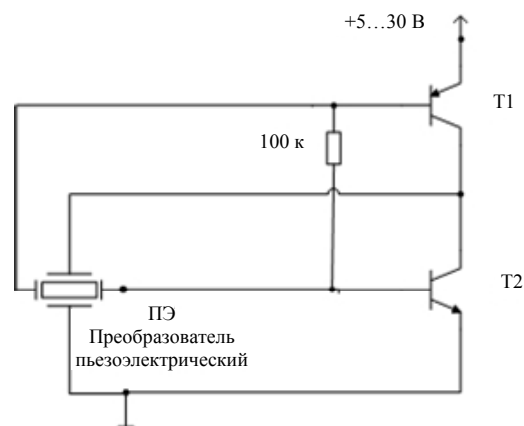


Рис. 1. Схема возбуждения микронасоса.

Для оценки эффективности охлаждения были проведены расчеты теплообмена, позволившие ориентировочно оценить возможности разработанного микронасоса. Расчеты проведены на примере охлаждения транзистора 2Т208А. Процесс конвективного теплообмена рассчитывался между поверхностью корпуса транзистора и газообразной средой (в данном случае, воздухом). При принудительной конвекции полный тепловой поток P_k , отдаваемый изотермической поверхностью транзистора, равен:

$$P_k = \alpha_k S(t_1 - t_2), \quad (1)$$

где α_k — коэффициент конвективного теплообмена, t_1 — температура корпуса транзистора, t_2 — температура воздуха, S — площадь поверхности корпуса транзистора.

Известно, что зависимость физических констант среды от температур t_1 и t_2 , а также большое разнообразие возможных форм поверхности нагретых тел исключают возможность получения табличных значений конвективных коэффициентов теплопередачи как теоретическими, так и экспериментальными методами. Поэтому в наших расчетах для определения α_k были использованы результаты экспериментальных исследований и их обобщение с помощью теории подобия. Согласно этой теории, сложные процессы характеризуются обобщенными параметрами, представляющими собой безразмерные комплексы размерных физических величин. Для определения конвективного коэффициента теплопередачи в условиях принудительной (вынужденной) конвекции был использован критерий Нуссельта:

$$N_u = \alpha_k L / \lambda, \quad (2)$$

где L — определяющий геометрический размер тела. Из (2) следует соотношение:

$$\alpha_k = N_u \lambda / L. \quad (3)$$

В нашем случае число Нуссельта для вынужденной конвекции было определено из выражения $N_u = 0,032 (w \cdot L / \nu)^{0,8}$ [6], где w — скорость потока вынужденной конвекции, которая составляла $\sim (25—30)$ м/с, L — среднее значение двух сторон корпуса транзистора, т.к. основное движение потока воздуха происходит именно в этих направлениях. Для транзистора эта величина составляет 2,1 мм, $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

В результате расчётов теплового потока для температуры окружающей среды $t_2 \sim 25$ °С и t_1 нагретой поверхности транзистора ~ 50 °С величина отводимого теплового потока за счет обдува разработанным микронасосом при температуре ~ 50 °С составила для транзистора $P_k = 0,28$ Вт. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, представленными ниже.

Экспериментальная часть

Электрическая схема установки, на которой проводились экспериментальные исследования эффективности охлаждения разработанного микронасоса, представлена на рис. 2.

В процессе эксперимента исследовалась эффективность охлаждения на примере пассивного тепловыделяющего компонента — резистора ТВО 0.125 и полупроводникового прибора — кремниевого транзистора 2Т208А. Кроме того, определялось время, за которое происходило охлаждение исследуемого образца.

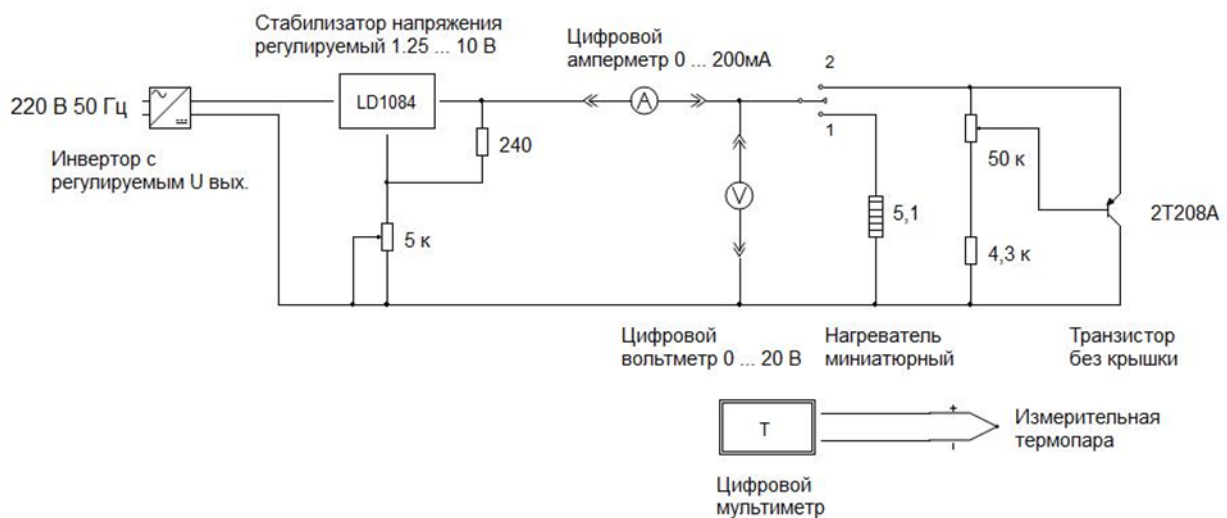


Рис. 2. Электрическая схема экспериментальной установки.

Места нагрева и охлаждения отделяются (для исключения влияния потока охлаждающего воздуха на термопару) от измерительной термопары в случае с резистором — экраном из кремниевой пластины (имеющей высокое значение теплопроводности), а в случае с транзистором — его корпусом без крышки (медь). При этом для улучшения теплового контакта измерительной термопары с исследуемым объектом используется теплопроводящая паста. Для регулировки направления воздушного потока микронасос крепился на шарнире. Напряжение питания микронасоса 30 В.

Основная идея эксперимента заключалась в измерении на первом этапе температуры на резисторе и транзисторе при пропускании тока разной величины (соответственно определялась и выделяемая мощность) через них без охлаждения. На втором этапе включался разработанный насос, который охлаждал резистор и транзистор до определенной температуры. Экспериментальные данные, полученные при охлаждении резистора, представлены в табл. 1, а при охлаждении транзистора в табл. 2. В следующих экспериментах на этих элементах увеличивали пропускаемый ток и снова рассчитывали выделяемую мощность.

Таблица 1

Экспериментальные данные, полученные при охлаждении резистора

№ эксп.	Мощность, Вт		Напряжение, В		Ток, А		Температура на образце, °С		$K_{эфф.Р}$	$K_{эфф.Т}$
	охл.	не охл.	охл.	не охл.	охл.	не охл.	охл.	не охл.		
1	5,4	1,45	5,4	2,9	1,0	0,5	56	134	3,72	0,42
2	3,08	0,84	4,05	2,15	0,76	0,39	45	85	3,67	0,53
3	2,22	0,59	3,47	1,78	0,64	0,33	40	70	3,78	0,57
4	1,11	0,27	2,46	1,21	0,45	0,22	40	50	4,16	0,8

Таблица 2

Экспериментальные данные, полученные при охлаждении транзистора

№ эксп.	Мощность, Вт		Напряжение, В		Ток, А		Температура на образце, °С		$K_{эфф.Р}$	$K_{эфф.Т}$
	охл.	не охл.	охл.	не охл.	охл.	не охл.	охл.	не охл.		
1	1,83	0,53	10,19	10,25	0,18	0,05	61	134	3,46	0,46
2	1,12	0,32	5,93	5,54	0,19	0,06	48	85	3,50	0,56
3	0,71	0,21	4,73	2,72	0,15	0,08	42	70	3,78	0,6
4	1,11	0,27	2,46	1,21	0,45	0,22	42	50	4,16	0,84

Для сравнения эффективности работы микронасоса со встроенной схемой возбуждения определялись эффективные коэффициенты по температуре $K_{эфф.Т} = T_{охл.} / T_{не\ охл.}$ (где $T_{охл.}$ — температура на резисторе и транзисторе при включенном насосе, $T_{не\ охл.}$ — температура на резисторе и транзисторе без охлаждения насосом), и по мощности $K_{эфф.Р} = P_{охл.} / P_{не\ охл.}$ (где $P_{охл.}$ — выделяемая мощность на резисторе и транзисторе при включенном насосе, $P_{не\ охл.}$ — выделяемая мощность на резисторе и транзисторе без охлаждения насосом). При этом необходимо отметить, что эффективный коэффициент по мощности — расчетная величина (напрямую измерялся ток и напряжение), но $K_{эфф.Р}$ более наглядно демонстрирует тенденцию эффективности работы микронасоса.

Кроме того, установлено, что чем выше температура, тем выше и эффективность работы по температуре. В среднем время охлаждения от

$T = 130\text{ °С}$ до температуры 60 °С составляло около 80 с (в основном время определяется размерами охлаждаемого объекта). При этом скорость охлаждаемого потока составляла $\sim (25\text{—}30)\text{ м/с}$ (в обычных системах вентиляционного охлаждения эта величина $\sim 2\text{ м/с}$).

Из представленных в таблицах 1 и 2 данных видно, что практически в четыре раза ($K_{эфф.Р} \approx 4$) возрастает эффективность работы электронных изделий при охлаждении с помощью разработанного микронасоса. При этом мощность, затрачиваемая на создание охлаждающего потока воздуха в охлаждающей системе, в среднем (зависит от разброса характеристик транзисторов схемы возбуждения) составляет около 250 мВт (в обычных системах вентиляционного охлаждения, применяемых в настоящее время, эта величина $\sim 2\text{ Вт}$).

На рис. 3 представлена графическая зависимость рабочей мощности P транзистора при раз-

ных режимах охлаждения (1 — паспортные данные, 2 — пассивное охлаждение с помощью радиатора, 3 — активное охлаждение с помощью микронасоса и 4 — активное охлаждение микронасосом с обратной связью) от температуры T . Из графических данных видно, как существенно возрастает эффективность работы транзистора при охлаждении с помощью разработанного микронасоса.

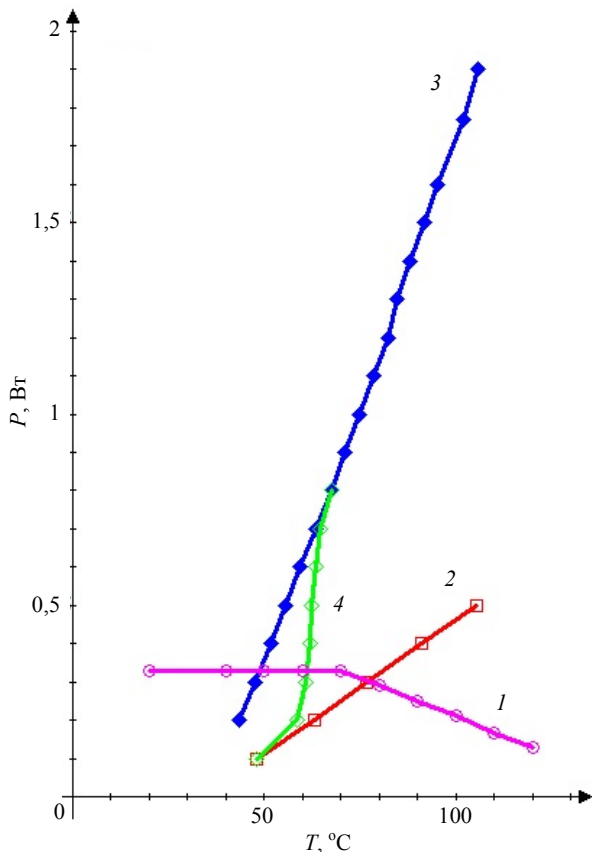


Рис. 3. Зависимость рабочей мощности P транзистора при разных режимах охлаждения от температуры T : кривая 1 — паспортные данные (без охлаждения), 2 — пассивное охлаждение с помощью радиатора, 3 — активное охлаждение с помощью микронасоса, 4 — активное охлаждение микронасосом с обратной связью.

На основе управления напряжением питания микронасоса (в пределах от 5 до 40 В) была разработана система автоматического управления температурой охлаждения приборов, что позволяет оптимизировать тепловые режимы работы электронных устройств (увеличивая тем самым эффективность работы электронного устройства), особенно для изделий, где требуется высокая степень охлаждения.

Аналогичные эксперименты были проведены на осветительных светодиодах и маломощных лазерных диодах. При охлаждении осветительных светодиодов рассеиваемая мощность на них возросла в 5 раз.

При охлаждении маломощных лазерных диодов с током возбуждения до 50 мА рабочий ток увеличился до 240 мА. При этом полностью в обоих случаях отпала необходимость использования радиаторов охлаждения.

Следует отметить, что применение микронасосов с интегрированной схемой возбуждения, выполненной в виде кристалла, расположенного непосредственно на пьезокерамическом диске насоса (т.н. интегрированные системы, в том числе и технологии MEMS), может расширить применение таких систем охлаждения и полностью отказаться от громоздких и дорогих традиционных систем охлаждения.

Заключение

Разработан микронасос с обратной связью и схемой возбуждения, использующей электромеханический резонанс системы. Как показали теоретические расчеты и экспериментальные исследования, это позволило существенно (в 4 раза) повысить эффективность работы электронных устройств.

Наилучший эффект охлаждения электронных приборов с помощью таких микронасосов может достигаться при охлаждении непосредственно самого полупроводникового кристалла без дополнительных теплоотводящих материалов, что может быть использовано в дальнейшем при создании конструкции электронных приборов нового поколения с очень малыми массогабаритными характеристиками и низкими энергетическими затратами на системы охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кисеев В., Аминев Д., Черкашин В., Мурзин Р. // Полупроводниковая светотехника. Системы охлаждения. 2011. № 3. С. 27.
2. www.teplostok-plastic.ru
3. Зенин В. В., Новокрещенова Е. П., Мухин К. А., Шаранов Ю. В. // Вестник ВГТУ. 2011. Т. 7. № 12-1. С. 127.
4. Вухарев Л. // Силовая электроника. 2005. № 4. С. 54.
5. Шостаковский П. // Силовая электроника. 2009. № 12. С. 120.
6. Варламов Р. Г. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1972.

A high-performance heat sinks of a new generation for electron devices

V. I. Strel'ov¹, Yu. N. Bendryshev¹, and V. G. Kosushkin²

¹Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics",
a Branch of Shubnikov Institute of Crystallography of Russian Academy of Sciences
8 Academicheskaya ul., Kaluga, 248064, Russia
E-mail: strelovvi@kaluga.ru, jnba@mail.ru

²Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University
2 Bazhenova ul., Kaluga, 248000, Russia
E-mail: kosushkin@gmail.ru

Received August 24, 2016

Efficiency of a micropump with an integrated disk driving circuit has been investigated. The electromechanical resonance is used for active (with feedback) cooling of high-density microelectronic components of semiconductor devices. It is shown that such micropumps without optional heat sinks having very small mass and size and low power consumption can be located directly on semiconductor crystal together with microelectronic device. As this take place, cooling of semiconductor devices substantially (up to fourfold) improves the efficiency of their operation. The feedback yields an optimal temperature for operating conditions of electron instrument.

PACS: 85.85.+j; 44.24.+f; 44.27.+g

Keywords: microelectronics, micropump, feedback, heat sink, electron device, driving circuit, cooling system, ultrasonic vibrator.

REFERENCES

1. V. Kiseev, D. Aminev, V. Cherkashin, and R. Murzin, Poluprovodnikovaya Svetotekhnika. Sistemy Okhlazhdeniya, No. 3, 27 (2011).
2. www.teplstok-plastic.ru
3. V. V. Zenin, E. P. Novokreshchenova, K. A. Mukhin, and Yu. V. Sharapov, Vestnik VGTU 7 (12-1), 127 (2011).
4. L. Vikharev, Silovaya Elektronika, No. 4, 54 (2005).
5. P. Shostavovskiy, Silovaya Elektronika, No. 12, 120 (2009).
6. R. G. Varlamov, *Short Handbook on Radio-Electronic Devices* (Sovetskoye Radio, Moscow, 1972) [in Russian].