

К. т. н. В. И. ГНИЛИЧЕНКО,
д. т. н. Г. Ф. СМЕРНОВ, к. т. н. В. Б. ТКАЧЕНКО

Дата поступления в редакцию
23.04 1999 г.
Оппонент к. т. н. С. Ф. ГОРЫКИН

Украина, г. Одесса, Гос. академия холода, ОАО «Нептун»

ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Освоение технологии тепловых труб и рациональное ее применение могут способствовать созданию конкурентоспособной отечественной продукции.

The learning to handle heat pipes technology and its efficient application can promote creation of competitive home production.

Первые конструкции тепловых труб (ТТ), изобретенные в 1970-х годах для применения в системах обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры (СОТР РЭА), вызвали повышенный интерес у специалистов. Последовавший за этим своеобразный бум в исследованиях и разработках в этой области применения ТТ сопровождался многочисленными публикациями, число которых измерялось сотнями и тысячами в год. Основные результаты были обобщены в ряде монографий, наиболее содержательными из которых представляются [1–6]. Существенное внимание перспективным конструктивным решениям в СОТР ЭВМ, основанным на передовых достижениях в технологии ТТ, уделено в [7].

Интерес к применению ТТ в различных сферах электронной техники не ослабевает и до настоящего времени. Из перечня докладов [8–15], представленных на последней международной конференции по ТТ в Германии, можно составить представление как о тех элементах электронной техники, организация теплоотвода от которых на основе технологии ТТ вызывает особый интерес у специалистов (силовая техника, микроэлектроника, персональные компьютеры и т. д.), так и о странах, в которых проводятся соответствующие исследования и разработки (Япония, Китай, Южная Корея, Франция и др.).

В отечественных исследованиях и разработках, выполненных в 1970–1980 годы в области применения технологии ТТ, содержится значимая информация, не потерявшая своей актуальности и до настоящего времени. К сожалению, эта информация оказывается зачастую неизвестной не только для зарубежных, но и для отечественных специалистов, продолжающих работать в таких областях, как электроника, электротехника, промсвязь и т. п. Между тем освоение технологии ТТ и рациональное ее применение в различных областях техники могут спо-

собствовать созданию конкурентоспособной отечественной продукции, что представляется особенно актуальным в настоящее время.

Анализируя обзор работ зарубежных фирм по применению ТТ, проведенный в [16], можно отметить, что основными объектами охлаждения, в которых используются ТТ, являются узлы и блоки РЭА, включающие в себя элементы повышенной мощности (полупроводниковые приборы, БИС и другие). При этом ТТ применяются для отвода тепла как от отдельных элементов, так и от групп элементов.

Принципиально применение тепловых труб возможно в следующих случаях:

а) из конструктивных соображений необходимо развести на некоторое расстояние участки теплоподвода и теплосброса (например, при отводе тепла из герметичных блоков; при плотной компоновке тепловыделяющих элементов, расположенных вблизи воздухопроводов централизованной системы охлаждения, и др.);

б) необходимо улучшить массо-энергетические характеристики системы охлаждения. В этом случае потенциал возможного выигрыша от применения тепловых труб заключен в увеличении теплорассеивающей поверхности за счет использования свойства ТТ трансформировать тепловой поток. При этом появляется возможность выполнить теплорассеивающую поверхность с наибольшей теплоотдающей эффективностью.

Внедрение ТТ в РЭА предполагает разработку новых СОТР, более эффективных по сравнению с существующими, и вопрос применения ТТ должен решаться на этапе разработки СОТР. Отсутствие опыта внедрения ТТ в РЭА не позволяет сегодня выдать набор унифицированных рекомендаций по применению ТТ. Остановимся только на общих положениях, которые необходимо учитывать разработчику при использовании ТТ в СОТР.

В общем случае при включении ТТ в какую-либо СОТР в расчет принимается термическое сопротивление тепловой трубы (оно обычно компенсируется увеличением интенсивности теплосброса в охлаждающую среду). Нужно отметить, что ТТ увеличивает эффективность теплообменника — например, при установке на конденсационном (изотермичном) участке ТТ радиатора обеспечивается изотер-

мичность оснований ребер радиатора, что увеличивает теплоотвод. Кроме того, применение ТТ позволяет (за счет увеличения длины конденсационного участка) либо значительно развить поверхность теплообменника, не снижая его эффективности, либо использовать эффективный теплообменник меньших размеров.

1. Наилучшим условием эффективности применения ТТ является возможность устанавливать охлаждаемые элементы непосредственно на корпусе ТТ. В этом случае условие эффективного использования ТТ выглядит следующим образом:

$$R_0 - R_1 > R_{\text{ТТ}}, \quad (1)$$

где R_0 — термическое сопротивление внешнего теплоотвода СОТР без ТТ;

R_1 — термическое сопротивление внешнего теплоотвода СОТР с ТТ;

$R_{\text{ТТ}}$ — термическое сопротивление ТТ.

То есть увеличение интенсивности внешнего теплоотвода (уменьшение его термического сопротивления) превышает термическое сопротивление ТТ.

2. Большинство элементов РЭА невозможно укрепить непосредственно на корпусе ТТ правильной геометрической формы. Это вызвано либо конструктивными соображениями, либо тем, что удельные мощности тепловыделения элементов РЭА превышают границу “запаривания” ТТ. В этих случаях необходимо использование теплопереходов от тепловыделяющих элементов к испарительному участку ТТ. Условие эффективного применения ТТ здесь имеет вид

$$R_0 - R_1 > R_{\text{ТТ}} + R_{\text{к}} + R_{\text{ТТ}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{к}}$ — термическое сопротивление контакта между теплопереходом и ТТ;

$R_{\text{ТТ}}$ — термическое сопротивление теплоперехода.

Для увеличения эффективности теплоотвода в этом случае можно применить две или более ТТ, подсоединив их к теплопереходу. Для параллельной установки двух ТТ условие (1) имеет вид

$$R_0 - R_1 > 0,5(R_{\text{ТТ}} + R_{\text{к}} + R_{\text{ТТ}}), \quad (3)$$

т. е. становится менее жестким.

Нужно отметить, что вышеперечисленные условия эффективного применения ТТ определены при сравнении СОТР с ТТ и СОТР, состоящей из элемента, укрепленного на теплообменнике. (В обеих СОТР не учитывалось термическое сопротивление контакта элемента РЭА с поверхностью ($R_{\text{ТТ}}^0$), на которой он установлен.) Когда же мы говорим о СОТР, включающей, кроме теплообменника, еще и теплопереход, для эффективного использования ТТ нужно выполнение условия

$$R_0 + R_{\text{ТТ}}^0 > R_{\text{ТТ}} + R_1 \quad (4)$$

при непосредственном креплении элементов на корпусе ТТ и

$$R_0 + R_{\text{ТТ}}^0 > R_{\text{ТТ}} + R_{\text{ТТ}} + R_1 \quad (5)$$

при использовании теплоперехода в СОТР с ТТ.

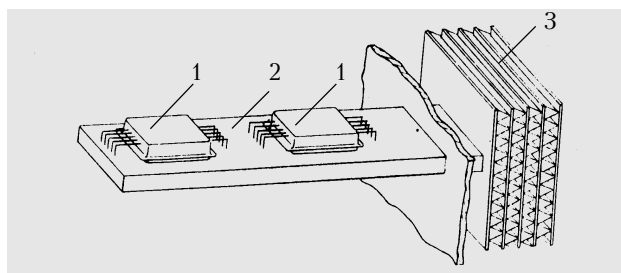


Рис. 1. Плоская тепловая труба с установленными на корпусе элементами:

1 — микросхемы; 2 — испарительный участок ТТ; 3 — радиатор

3. Известно, что такая важная характеристика ТТ, как предельный передаваемый тепловой поток, зависит от ориентации ТТ в пространстве. Поэтому при разработке СОТР с ТТ для элементов РЭА, предназначенных для работы при любой ориентации, необходимо исходить из характеристик ТТ при наилучших условиях работы, т. е. при расположении испарительного участка над конденсационным.

Рассмотрим некоторые конкретные примеры использования ТТ для отвода тепла от элементов РЭА.

1. Элементы РЭА крепятся на корпусе ТТ.

Как уже говорилось, лучшим условием для эффективного применения ТТ является возможность устанавливать охлаждаемые элементы непосредственно на корпусе ТТ.

1. Для эффективного теплоотвода от БИС может быть использована плоская тепловая труба базовой конструкции (рис. 1). Для электрической изоляции на испарительном участке ТТ наносится специальное покрытие, на которое устанавливаются БИС. В свою очередь, на покрытие может быть нанесен электрический монтаж. В этом случае ТТ выполняет роль не только теплоотвода, но и монтажной платы.

2. При необходимости разъемного соединения ТТ с активными элементами может быть использована конструкция теплоотвода, показанная на рис. 2. Плоские ТТ устанавливаются в блоке между платами с микросхемами (МС). Конденсационные участки ТТ с укрепленными на них теплообменниками находятся за пределами блока. МС укреплены на платах

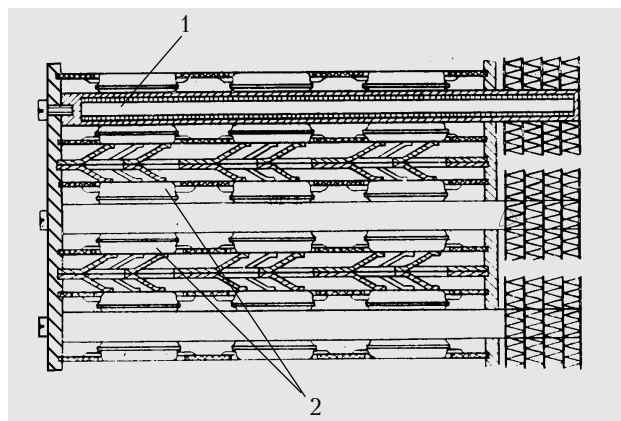


Рис. 2. Плоские ТТ (1), установленные в блоке между платами с микросхемами (2)

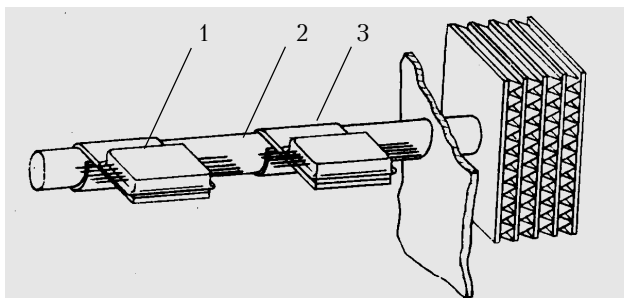


Рис. 3. Соединение элементов (1) с тепловой трубой (2) при помощи пластинчатых теплопереходов (3)

таким образом, что их тепловыделяющая поверхность обращена к поверхности ТТ. С помощью специальных прижимных устройств платы с МС прижимаются к стенкам ТТ.

II. Элементы РЭА подсоединяются к ТТ через теплопереход.

Теплопереходы необходимы, в основном, при использовании цилиндрических ТТ или же в тех случаях, когда удельная мощность тепловыделения превышает максимально допустимые нагрузки на испарительном участке ТТ. Конструкции теплопереходов могут быть самыми различными в зависимости от мощности тепловыделения, формы охлаждаемых элементов, их расположения в пространстве и т. д.

1. Стыковка малоомощных элементов с цилиндрической ТТ может осуществляться через металлические пластинчатые теплопереходы [17–19]. Металлическая пластина прогнутой частью плотно облегает ТТ, а на плоском участке можно устанавливать охлаждаемые элементы. Такие теплопереходы наиболее просты и удобны, особенно при охлаждении одиночных элементов. На рис. 3 показаны варианты использования пластинчатых теплопереходов при охлаждении полупроводникового элемента и МС. Некоторые зарубежные фирмы выпускают цилиндрические ТТ со сплюсненным концом, который выполняет роль теплоперехода [20].

2. При охлаждении мощных элементов РЭА теплопереходы в виде пластинчатых хомутов малоэффективны ввиду резкого возрастания их термического сопротивления. В этих случаях мощные элементы устанавливаются на массивную металлическую плату, к которой подсоединена ТТ. Для увеличения эффективности теплоотвода можно также применить не одну, а две и более ТТ. На рис. 4 пред-

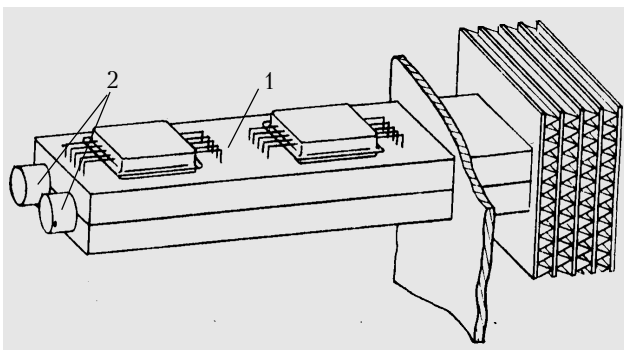


Рис. 4. Плата (1) с двумя цилиндрическими ТТ (2)

ставлена конструкция теплоотвода от группы мощных полупроводниковых элементов. К плате подсоединены две цилиндрические ТТ. На конденсационных участках ТТ установлен радиатор. Аналогичные теплопереходы использованы при разработках, описанных в [20, 21].

При использовании теплопереходов нужно добиваться по возможности наименьшего контактного сопротивления между теплопереходом и ТТ. Для его уменьшения разъемные теплопереходы необходимо укреплять на корпусе ТТ через пасту КПТ-8 либо теплопроводный компаунд КТЭ-2. Неразъемные теплопереходы лучше припаивать или приваривать к корпусу ТТ.

Технологию разработки конструктивных решений с применением тепловых труб рассмотрим на конкретном примере разработки теплоотвода для транзисторного модуля.

Разработка возможных конструктивных вариантов теплоотвода

Субблок представляет собой каркас, в котором расположены радиоэлементы. На одной из торцевых сторон каркаса находится электрический разъем и направляющие для ориентации и фиксации субблока в шкафу; на другой торцевой стороне каркаса расположена ручка, предназначенная для облегчения работ, связанных с установкой субблока в шкафу. Одна из боковых сторон каркаса представляет собой пластинчато-ребристый радиатор, на основании которого расположено 8 транзисторов типа КТ 922А либо 4 транзистора типа «Посейдон, Причал В» с общей рабочей мощностью 240–250 Вт. На рис. 5 показано рабочее положение субблока в шкафу с радиоаппаратурой и направление воздушного потока, с помощью которого производится съем тепла с радиатора.

Рассмотрим варианты компоновки субблока с применением теплоотвода на основе тепловых труб. Возможны следующие варианты компоновки теплоотвода в корпусе субблока:

- вынос радиатора в сторону электрического разъема;
- вынос радиатора в сторону вспомогательной ручки;

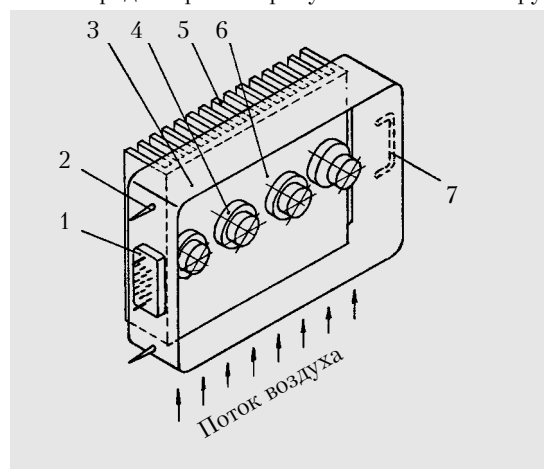


Рис. 5. Схема субблока:
1 – электрический разъем; 2 – направляющие; 3 – каркас; 4 – транзистор; 5 – пластинчато-ребристый радиатор; 6 – основание радиатора; 7 – ручка

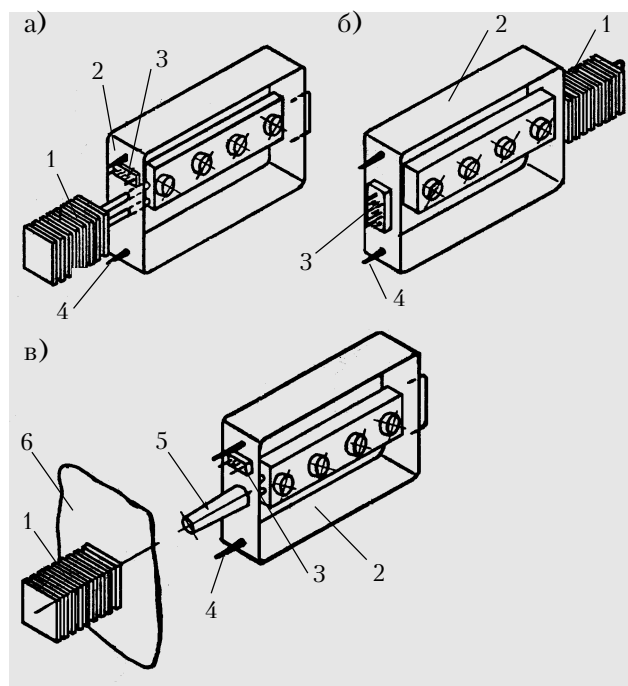


Рис. 6. Схемы компоновки субблока:

a – радиатор теплоотвода вынесен в сторону электрического разъема; *б* – радиатор теплоотвода вынесен в сторону вспомогательной ручки; *в* – радиатор вынесен на стенку шкафа и стыкуется с теплоотводом посредством конического перехода
 1 – радиатор; 2 – корпус субблока; 3 – электрический разъем; 4 – направляющие; 5 – конический переход; 6 – стенки шкафа

- вынос радиатора на заднюю стенку шкафа и стыковка с ним при помощи конического перехода, расположенного на конденсационном участке теплопровода.

На рис. 6 приведены схемы предполагаемых вариантов компоновки субблока с теплоотводом на основе тепловых труб. Вынос радиатора в сторону электрического разъема связан с перекомпоновкой субблока и шкафа. Вынос радиатора на заднюю стенку шкафа не только вызывает упомянутую выше перекомпоновку, но и значительно усложняет конструкцию теплоотвода, а также снижает его эффективность. Наиболее удобная компоновка – это вынос радиатора в сторону вспомогательной ручки, т. к. этот вариант не изменяет существующей компоновки субблока и незначительно изменяет конструкцию шкафа (в части переноса воздуховода на лицевую сторону).

Наиболее важным в конструировании теплоотвода является выбор схемы установки транзистора на тепло-распределяющую плату и ее конструкция. Рассмотрим несколько возможных вариантов.

а) Теплоотвод выполнен на основе двух цилиндрических тепловых труб.

Рассматриваемый вариант характеризуется простотой конструкции и технологичностью. Тепло-распределяющая плата, охватывающая обе тепловые трубы, равномерно распределяет тепло между ними. Удобна также и стыковка транзисторов с тепло-распределяющей платой.

б) Теплоотвод выполнен на основе прямоугольных тепловых труб.

Применение прямоугольной ТТ ведет к неполному использованию боковых поверхностей корпуса и усложнению стыковки ТТ с тепло-распределяющей платой.

в) Теплоотвод выполнен на основе одной плоской тепловой трубы.

Этот вариант характеризуется односторонней работой ТТ (вторая сторона полностью не работает), что снижает эффективность теплоотвода и приводит к повышению температуры транзисторов. Стыковка ТТ с тепло-распределяющей платой производится пайкой, что приводит к значительному снижению технологичности изделия, т. к. обеспечить пайку конструкции по плоскости больших размеров достаточно трудно.

Исходя из анализа перечисленных особенностей вариантов конструкций теплоотвода был принят более технологичный вариант, обеспечивающий работу транзисторов в заданном режиме: теплоотвод на основе двух цилиндрических труб.

Выбор параметров конструкции теплоотвода на основе тепловой трубы для транзисторного модуля

Выбор и расчет конструкции теплоотвода, включающего ТТ, производился с учетом существующей конструкции и геометрических размеров блока аппаратуры с транзисторным модулем (ТМ). ТМ состоит из четырех высокочастотных транзисторов типа «Посейдон, Причал В», расположенных в линию.

Исходные данные:

- суммарная мощность рассеяния 250 Вт;
- мощность рассеяния одного транзистора 62,5 Вт;
- температура окружающей среды может изменяться в пределах $-10...+45^{\circ}\text{C}$;
- общее термическое сопротивление теплоотвода $0,26^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
- положение ТТ в ТМ горизонтальное.

Стендовые испытания показали, что в предложенном виде конструкция теплоотвода ТМ имеет высокую работоспособность при изменении температуры окружающей среды в пределах $-10...+45^{\circ}\text{C}$. При этом целесообразно радиатор выносить за пределы блока, а отвод тепла в окружающую среду осуществлять при принудительном движении воздуха.

В заключение можно отметить следующее:

- наибольшую эффективность от применения ТТ можно получить при комплексном подходе к разработке всей СОТР с ТТ – нужно помнить, что ТТ является лишь элементом СОТР;

- перспективными являются работы, направленные как на разработку специальных ТТ, приспособленных для крепления непосредственно на их корпусе элементов РЭА, так и на разработку конструкций элементов РЭА, предусматривающих возможность установки их на корпусе ТТ базовых конструкций;

- возможные способы контактирования ТТ с РЭА и конструктивное выполнение теплопереходов определяют в основном реальные условия работы РЭА;

— обработка конструктивно-технологических решений по теплоотводам и СОТР на основе ТТ предполагает в качестве главного элемента экспериментальное моделирование типичных тепловых режимов. Технология постановки, проведения и использования результатов такого моделирования имеет свои особенности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алексеев В. А., Арефьев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования РЭА. — М. : Энергия, 1979.
2. Воронин В. Г., Ревакин А. В., Сасин В. Я., Тарасов В. С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М. : Машиностроение, 1976.
3. Семена М. Г., Гершун А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металло-волоконными капиллярными структурами. — Киев : Вища школа, 1984.
4. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Ягодкин И. В. Физические основы тепловых труб. — М. : Атомиздат, 1978.
5. Дан П. Д., Рэй Д. А. Тепловые трубы. — М. : Энергия, 1979.
6. Шекриладзе И. Г., Авалишвили И. Г., Гогишвили Г. Б. и др. Тепловые трубы для систем термостабилизации. — М. : Энергоатомиздат, 1991.
7. Резников Г. В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. — М. : Радио и связь, 1988.
8. Bricard A. et al. Transient modelling of heat pipes heat sink for insulated gate pipobar transistor (IGBT) cooling. — Proceedings of the X JNPC. Stuttgart, Germany. — 1997, September. — Paper E-2.

9. Kim K. S., Kim W. T. and Sec K. B. Experimental study on the cooling characteristics of heat pipe for high power electronic components. — Ibid. — Paper E-3.
10. Chantong L., Jhengchang S. Investigation cooling equipment of high-power thyristors in explosion — proof shell. — Ibid. — Paper E-4.
11. Vijay R., Shivkumar A., Sarma B. Application of heat pipes for critical equipment in telephone exchanges. — Ibid. — Paper E-5.
12. Mochizuki M. et al. The application for personal computer using heat pipe technology. — Ibid. — Paper E-6.
13. Kojima Y. et al. The cooling method for notebook PC with heat pipes. — Ibid. — Paper E-7.
14. Jtoh A., Jtoh S. High performances spiraled supermicro flexible heat pipe for cooling electronic systems. — Ibid. — Paper E-8.
15. Mou K., Mou O. Theoretical and experimental investigation of flat plate heat pipe for electronic cooling. — Ibid. — Paper E-9.
16. Технический отчет по теме «Трубка». № гос. регистр. 2244130. — Одесса, НИИ «Шторм».
17. Тепловые трубы фирмы Jermuny // Electronic Components. — 1973. — Рекламн. просп. № 2.
18. Тепловые трубы фирмы Redpoint // Ibid. — 1972. — Рекламн. просп. №19.
19. Отвод тепла от электронных схем с помощью тепловых труб // Electronic Engineering. — 1973. — Vol. 12. — P. 34—38.
20. Охлаждение радиоаппаратуры с помощью тепловых труб // Electronic Packaging and Production. — 1971. — Vol. II, N 12. — P. 16—23.
21. Тепловые трубы для охлаждения полупроводниковых приборов // Electronic World. — 1971. — N 6.

Издательство «Электронные компоненты» выпускает

**ЭЛЕКТРОННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ**

Журнал (ЭК) издается с 1995 г.
Подписной индекс 72209, 47547.

**Н О В Ы Е
КОМПОНЕНТЫ**

(приложение к ЭК)

Издается с 1997 г.
Подписной индекс
47298, 47546.

**Ж И В А Я
электроника
Р О С С И И**

специальный выпуск журнала
"ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ"
Издается с 1997 г.

**Р Е М О Н Т
ЭЛЕКТРОННОЙ
Т Е Х Н И К И**

Издается с 1999 г.

Почтовый адрес: Россия, 109044,
Москва, а/я 19.
Тел.: (095) 925-60-47, 921-17-25.
Факс: (095) 923-64-42, 937-41-01.
E-mail: elekom@compel.co.ru