

К. т. н. В. М. БАТУРКИН, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
Д. М. ГАЛЯУТДИНОВ, И. Т. ВЛАДИМИРОВ

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический ин-т»,
г. Харьков, НИИ радиотехнических измерений
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
28.04 2007 г.

Оппонент В. М. МАРКУС
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

ЭФФЕКТИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО МИКРОЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

Предложена система охлаждения модифицированного сверхвысокочастотного микроэлектронного блока с целью увеличения рабочей мощности транзистора до 51,5 Вт.

При разработке микроэлектронных блоков в герметичном исполнении по-прежнему актуальной остается проблема обеспечения нормальных тепловых режимов.

Целью настоящего исследования явилась разработка эффективной системы охлаждения мощного сверхвысокочастотного микроэлектронного блока, модификация которого привела к увеличению мощности, рассеиваемой транзистором. При этом максимально должны быть сохранены отработанные конструктивно-технологические решения и габаритные размеры базового варианта блока (см. рис. 1, а).

Основным тепловыделяющим элементом усилительного модуля, критичным в тепловом отношении, является сверхвысокочастотный транзистор типа FLL 2001В-3, который рассеивает 27 Вт потребляемой мощности. При температуре окружающей среды 40°C (313 К) температура корпуса транзистора близка к предельно допустимой. Напряженность теплового режима обусловлена тем, что теплота от основания

транзистора размерами 11×21 мм отводится к корпусу блока, а от него к корпусу изделия, в основном теплопроводностью через ряд металлических конструктивных элементов и контактных соединений, обладающих значительным термическим сопротивлением. Контактная поверхность блока с изделием имеет размеры 0,196×0,181 м. Высота блока — 0,064 м. Теплота от изделия в целом отводится излучением, конвекцией при давлении воздуха 3·10⁴ Па и контактным теплообменом на посадочное место изделия.

Разработанная система охлаждения транзистора предусматривает снижение контактных термических сопротивлений, повышение изотермичности контактной поверхности корпуса блока путем встраивания в его днище трех плоских тепловых труб (ТТ, см. рис. 1, б) и дополнительный отвод теплоты от транзистора с помощью теплопроводной шины и ТТ сложной формы (см. рис. 1, б, в). Теплопроводная шина установлена сверху корпуса транзистора с обеспечением теплового контакта. В ее отверстие запаяна зона нагрева ТТ сложной формы, конденсационные зоны которой (отогнутые концы ТТ) припаяны к внутренней поверхности корпуса блока.

Для оценки эффективности разработанной системы охлаждения было проведено расчетное и физическое моделирование процессов теплопередачи в разработанной системе.

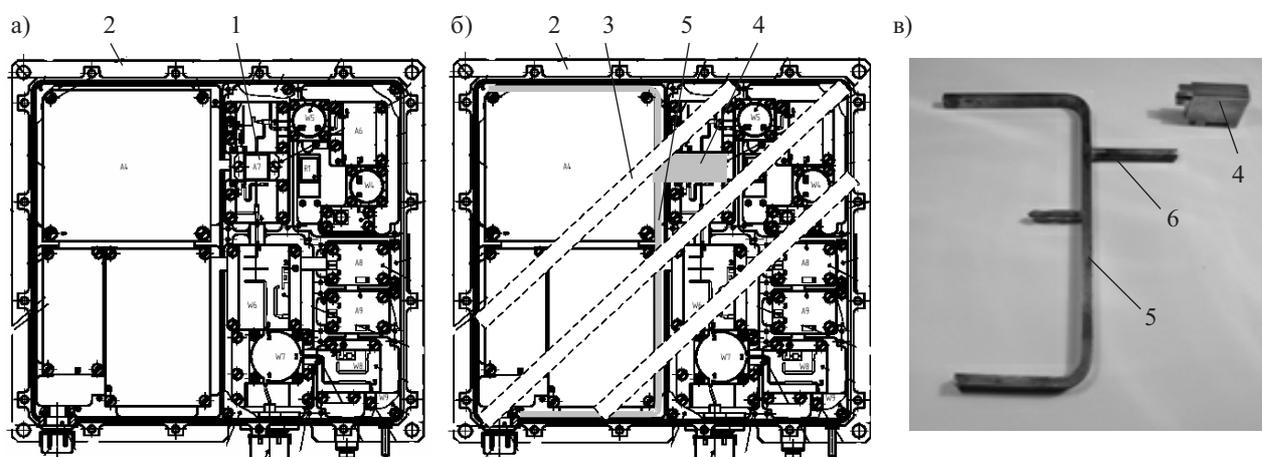


Рис. 1. Конструкция микроэлектронного блока — базовый вариант (а); модифицированный вариант (б); теплопередающие элементы блока (в):

1 — транзистор; 2 — корпус блока; 3 — плоская ТТ; 4 — теплопроводная шина; 5 — ТТ сложной формы; 6 — зона нагрева ТТ

Расчетное моделирование тепловых режимов

В состав объекта моделирования входят (рис. 2) посадочное место изделия, корпус блока, плата усилительного модуля, корпус транзистора и основание транзистора, а также остальные тепловыделяющие компоненты блока (не показаны на рисунке).

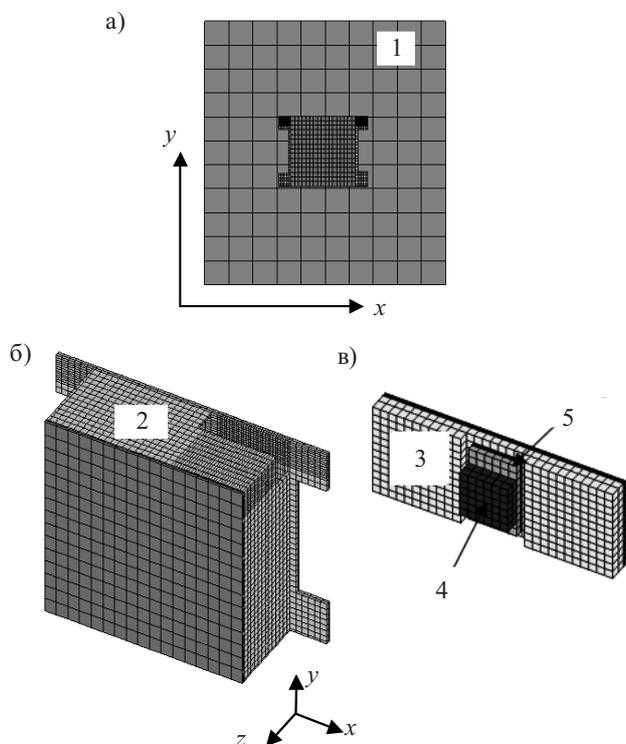


Рис. 2. Основные элементы трехмерного моделирования — установка блока на посадочном месте изделия (а); модель корпуса блока (б); плата усилительного модуля и транзистор (в):

1 — посадочное место изделия; 2 — корпус блока; 3 — плата усилительного модуля; 4 — корпус транзистора; 5 — основание (фланец) корпуса транзистора

Для каждого из элементов были составлены и решены уравнения теплопроводности. В общем случае это трехмерные уравнения. Граничными условиями в зонах контакта являлись условия контактного теплообмена, задаваемые соответствующими удельными контактными сопротивлениями.

Перенос тепла, осуществляемого каждой тепловой трубой, учитывался с помощью уравнения теплового баланса, составленного для парового потока, рассматриваемого как изотермический элемент:

$$\sum_{i=1}^N (T_i - T_{\text{пар}}) \cdot F_i / [1/(\alpha_{\text{ТТ},i} \eta_{\text{ТТ},i}) + 1/\alpha_{\text{конт},i}] = 0, \quad (1)$$

где N — количество зон присоединения ТТ к поверхности блока; $T_i, T_{\text{пар}}$ — соответственно температура i -й поверхности, контактирующей с ТТ, и температура пара в ТТ;

F — площадь поверхности контакта;

$\alpha_{\text{ТТ}}$ — коэффициент теплопередачи при фазовых переходах, происходящих внутри ТТ;

$\eta_{\text{ТТ}}$ — коэффициент, учитывающий несоответствие площадей теплообмена в ТТ и контакта, а также влияние неравномерности подвода-отвода теплоты по сечению ТТ;

$\alpha_{\text{конт}}$ — коэффициент теплопередачи в контактном теплообмене.

Условие (1) впервые было реализовано в конечно-элементном пакете HEAT-90 [1, 2].

Аналитические решения подобных задач, представляющих трехслойную композицию с неравномерными свойствами и граничными условиями, имеют ряд существенных ограничений [3—5] и поэтому малоэффективны для анализа данной конструкции. В связи с этим в нашем исследовании для количественной оценки поля температур использован численный метод, реализованный в конечно-разностном пакете TAS [6].

Тепловыделение транзистора задавалось как постоянное по объему транзистора. Отвод теплоты от поверхности блока моделировался контактными теплообменом с посадочным местом изделия (температура которого на расстоянии 0,5 м от блока принималась постоянной), а также конвекцией и излучением с поверхности блока. Теплоотвод внутри герметичного блока осуществлялся только теплопроводностью и контактными теплообменом.

Результаты моделирования показали, что улучшение контактного теплообмена между корпусом транзистора и платой усилительного модуля, а также между корпусом блока и посадочным местом изделия, имеет существенное значение. Увеличение коэффициента контактного теплообмена $\alpha_{\text{конт}}$ с 1000 до 10000 Вт/(м²·К) [7] позволяет уменьшить температуру транзистора на 110 К (при тепловой мощности 27 Вт). Использование ТТ дополнительно уменьшает температуру транзистора на 5—15 К за счет повышения изотермичности блока и увеличения поверхности теплообмена. Существенно важным фактором в этом случае является использование возможностей дополнительного теплообмена — конвективного и радиационного отвода теплоты от поверхности корпуса блока, позволяющего к концу двухчасового рабочего цикла блока уменьшить температуру транзистора дополнительно на 15—20 К (рис. 3).

Повышение изотермичности основания блока за счет встраивания в него трех плоских ТТ, как пока-

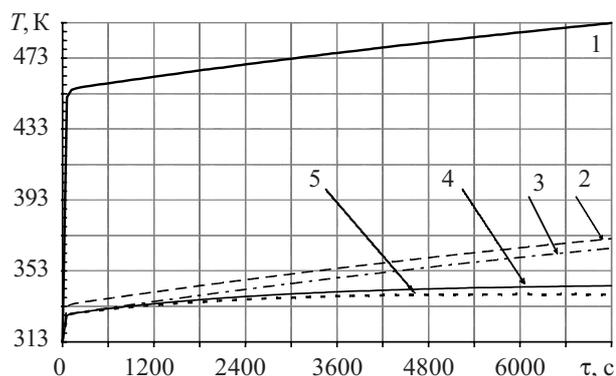


Рис. 3. Изменение температуры корпуса транзистора во времени (τ) при различных условиях охлаждения транзистора:

1 — $\alpha_{\text{конт}} = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 2 — $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 3 — $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 1 \text{ ТТ}$;
 4 — $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 1 \text{ ТТ} + \text{улучшенный внешний теплообмен}$;
 5 — $\alpha_{\text{конт}} = 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 1 \text{ ТТ} + \text{улучшенный внешний теплообмен} + 3 \text{ ТТ в основании блока}$

зывают расчеты, позволяет дополнительно снизить температуру корпуса транзистора на 5 К.

Физическое моделирование тепловых режимов

Анализ возможности использования современных средств улучшения контакта — эластичных прокладок, материалов с изменением фазового состояния, теплопроводных паст и гелей с металлическими частицами [7] показывает, что при плотности теплового потока 10^5 Вт/м^2 (10 Вт/см^2) перепад температур ΔT_k в зоне контакта между поверхностью тепловыделяющего элемента и охлаждающей поверхностью достигает 20—100 К для сухих поверхностей и может быть уменьшен до 2—7 К при использовании гелей с металлическими частицами (рис. 4).

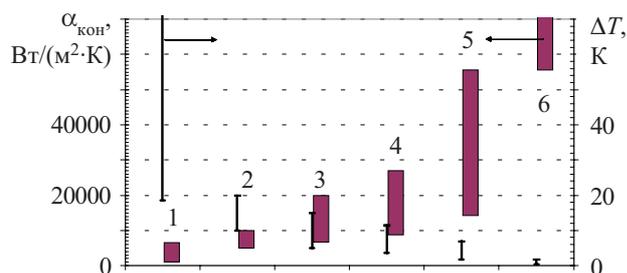


Рис. 4. Достижимые значения коэффициента контактного теплообмена для различных способов улучшения теплового контакта и ожидаемые перепады температур между соединяемыми поверхностями (плотность теплового потока 10^5 Вт/м^2):

- 1 — контакт поверхностей без наполнителей; 2 — эластичные прокладки; 3 — материалы с изменением фазового состояния; 4 — пасты; 5 — гели с металлическими частицами; 6 — эвтектическое соединение

Следует отметить, что такие способы соединения как склеивание поверхностей специальными компаундами или пайка позволяют увеличить коэффициент контактного теплообмена до 50000—200000 Вт/(м²·К) [8]. Однако в этом случае становится невозможной замена элемента. Кроме того, температурный режим и требования к типу материала поверхности существенно ограничивают применение этого типа соединений. (Вместе с тем если в результате исследований будет установлено, что неразъемное соединение пайкой даст существенный выигрыш в перепаде температур по сравнению с использованием других заполнителей и если оно в принципе допустимо в модернизируемом изделии, то его целесообразно будет использовать для снижения температуры транзистора.)

В рассматриваемом микроэлектронном блоке транзистор FLL 2001В-3 должен быть установлен с соблюдением условий минимального термического сопротивления, электропроводности и минимального газовыделения. С учетом [9, с. 819—829; 10] для дальнейших исследований были отобраны пасты Arctic Silver 5, КПТ-8, прокладки T-gon 805-A1 и др.

Для экспериментального исследования эффективности использования каждого из выбранных образцов в условиях прижима и неплоскостности, типичных для транзистора FLL 2001В-3, была создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать реальные размеры контакта (2,1×1,1 см), основ-

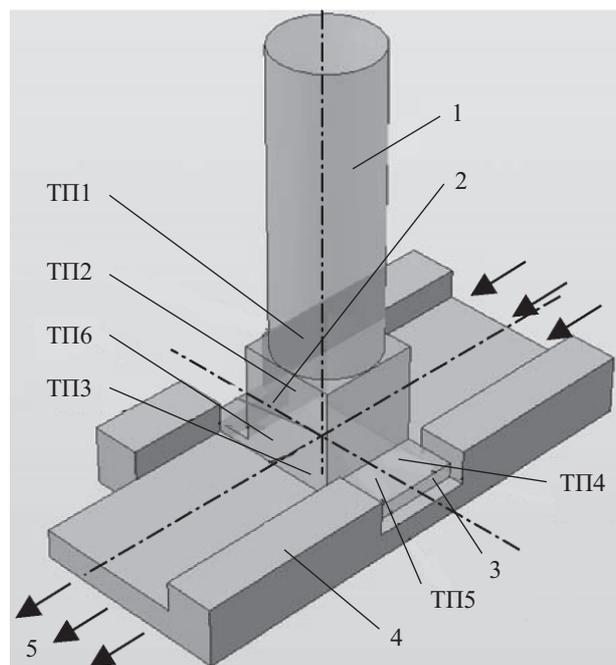


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 — нагреватель (имитатор кристалла); 2 — имитатор термического сопротивления; 3 — крепежный фланец; 4 — имитатор посадочного места на плате усилительного модуля; 5 — охлаждающая среда; ТП — термопара

ные механические свойства контактирующих поверхностей и условия прижима. Схема рабочего участка экспериментальной установки представлена на рис. 5.

Тепловой поток от нагревателя через имитатор термического сопротивления транзистора, крепежный фланец и тепловой контакт передается к имитатору посадочного места на плате усилительного модуля, охлаждаемой потоком жидкости со стабилизированной температурой и расходом. Медь-константановая (диаметр провода 0,16 мм) термопара ТП1 измеряет температуру нагревателя, ТП2 — температуру на поверхности крепежного фланца транзистора, ТП3—ТП6 — температуру в четырех точках на поверхности имитатора посадочного места. Закрепление фланца к посадочному месту осуществляется двумя винтами М3 и тарированным моментом затяжки, равным 0,50 Н·м. Перед сборкой исследуемый тип материала-заполнителя помещается между фланцем транзистора и посадочным местом в соответствии с требованиями по его установке.

Эксперименты проведены при температуре охлаждающей жидкости 40°С (313 К). Результаты обработаны в виде зависимости перепада температур от мощности тепловыделения $\Delta T_k = f(Q)$ (рис. 6), которая дает представление о достигнутом уменьшении перепада температур между кристаллом транзистора и посадочным местом транзистора (ΔT_k , группа кривых I) и фланцем транзистора и посадочным местом транзистора ($\Delta T_{1к}$, группа кривых II) за счет уменьшения контактного сопротивления. Здесь

$$\Delta T_k = T(\text{ТП1}) - T_{\text{средн}}(\text{ТП3...ТП6}),$$

$$\Delta T_{1к} = T(\text{ТП2}) - T_{\text{средн}}(\text{ТП3...ТП6}).$$

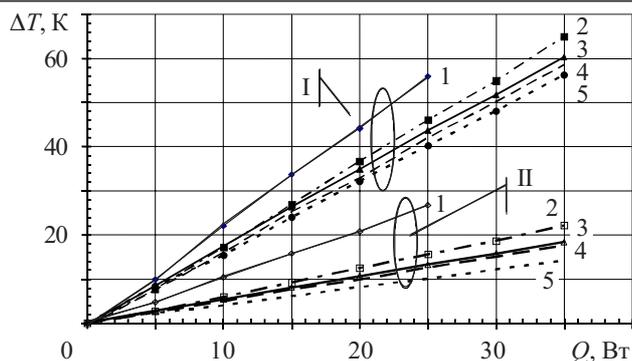


Рис. 6. Эффективность использования различных материалов для улучшения контакта транзистора и посадочного места:

1 — соединение «на сухую»; 2 — графитовая прокладка T-gon 805, толщина 0,25 мм; 3 — индиевая фольга 0,1 мм; 4 — паста КПТ-8; 5 — паста на основе серебра Arctic Silver 5

Экспериментальные данные по перепаду температур для наиболее эффективной пасты Arctic Silver 5 аппроксимируются зависимостями

$$\Delta T_{1к} = 0,4Q; \quad (2)$$

$$\Delta T_{к} = 1,61Q. \quad (3)$$

По зависимости (2) нетрудно определить, что в диапазоне мощностей тепловыделения транзистора от 27 до 51,5 Вт, характерном для модернизируемого изделия, перепад температуры в зоне контакта транзистора с шиной составляет от 11,0 до 20,8 К, соответственно. По зависимости (3) находим, что по сравнению с использованием «сухого» контакта, при максимально возможной мощности тепловыделения 51,5 Вт заполнение контактного зазора пастой Arctic Silver 5 позволяет снизить перепад температуры в зоне контакта фланца транзистора с посадочным местом на 34 К.

Увеличение момента затяжки с 0,50 до 1,0 Н·м при использовании этой пасты дает незначительное (на 0,5 К) понижение температуры транзистора, и поэтому увеличение момента затяжки винтом более 0,5 Н·м нецелесообразно.

На основании проведенных исследований с 10 видами материалов-заполнителей установлено, что для рассматриваемого случая наиболее эффективным решением является применение паст КПТ-8 и Arctic Silver 5.

Как показывают результаты исследований, фактическое уменьшение термического сопротивления "корпус транзистора—посадочное место транзистора" позволяет существенно понизить его перегрев относительно посадочного места. Однако понижение температуры посадочного места транзистора представляет не менее актуальную самостоятельную задачу. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование тепловой трубы для отвода теплоты от транзистора или его посадочного места и перенос тепловой энергии к более холодным участкам корпуса блока, удаленно расположенным от посадочного места транзистора.

Для дополнительного отвода теплоты от транзистора разработано теплопередающее устройство на ос-

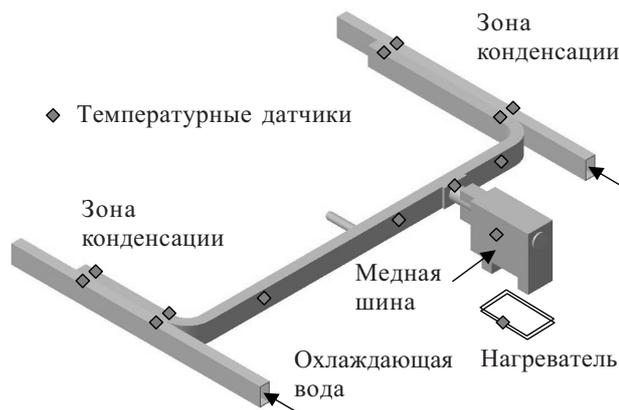


Рис. 7. Схема экспериментального участка для исследования тепловой трубы и теплопередающего устройства на ее основе

нове ТТ сложной формы (см. рис. 1, в). Корпус ТТ имеет прямоугольное сечение размером 8,3×4,5 мм и цилиндрическую часть диаметром 6 мм. Толщина стенки корпуса составляет 0,5 мм. Капиллярная структура ТТ — медный металлический войлок, изготовленный из волокон диаметром 50 мкм и длиной 3 мм. Толщина капиллярной структуры составляет 0,4 мм, пористость 86%. Теплоноситель — вода. Тепловая труба рассчитана на передачу теплового потока не менее 70 Вт в диапазоне температур 278—400 К при горизонтальной ориентации. Подсоединение ТТ к транзистору осуществляется с помощью медной шины, присоединенной к цилиндрической части ТТ.

Для экспериментального определения теплопередающих характеристик ТТ, теплопроводной шины и системы охлаждения в целом в зависимости от передаваемой тепловой мощности был создан экспериментальный участок (рис. 7). Термическое сопротивление тепловой трубы и всей тепловой цепи "нагреватель—сток" показано на рис. 8. Для ТТ определялась разность температур "зона испарения—зона конденсации ТТ", для системы охлаждения — "нагреватель—стенка водяного теплообменника". Присоединение шины к тепловой трубе и нагревателя к корпусу

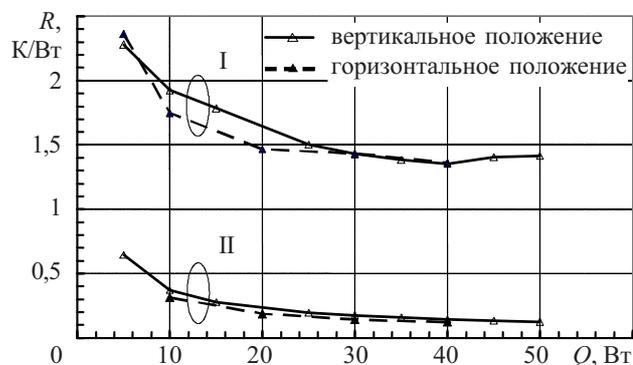


Рис. 8. Термическое сопротивление R системы «нагреватель—сток тепла» (группа кривых I) и термическое сопротивление тепловой трубы (группа кривых II) для горизонтальной и вертикальной ориентации плоскости изгиба ТТ (зона нагрева внизу)

су транзистора осуществлялось с помощью пасты Arctic Silver 5.

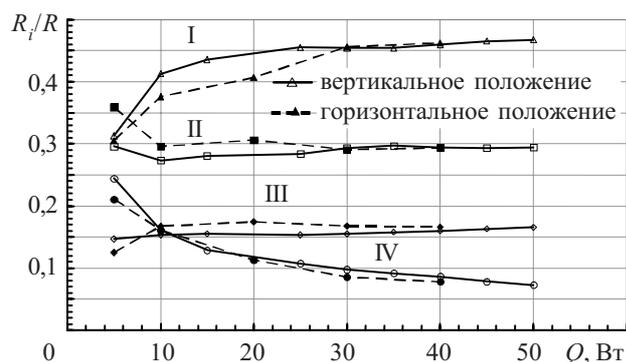


Рис. 9. Относительный вклад термических сопротивлений «нагреватель—шина» (кривые II), «шина—пар» (кривые I), «пар—стенка конденсатора» (кривые IV), «стенка конденсатора—охлаждающая среда» (кривые III) в общее термическое сопротивление «нагреватель—охлаждающая среда» для вертикальной и горизонтальной ориентации ТТ в исследованном диапазоне теплового потока

Вклад отдельных составляющих в суммарное значение перепада температуры в системе охлаждения показан на рис. 9.

Заключение

Анализ результатов экспериментального исследования свидетельствует о высокой эффективности предложенного решения: в диапазоне мощностей от 27 до 51,5 Вт (возможный диапазон увеличения мощности тепловыделения транзистора в модернизируемом изделии) термическое сопротивление ТТ изменяется от 0,2 до 0,1 К/Вт, что эквивалентно перепаду температуры по длине тепловой трубы от 5,4 до 5,15 К, соответственно.

Анализ показывает также, что основной вклад в суммарное значение перепада температуры в системе охлаждения (45%) вносит термическое сопротивление в зоне перехода «шина—пар», что обусловлено относительно высоким термическим сопротивлением в зоне контакта шины с тепловой трубой, заполненной пастой. Дальнейшие пути повышения эффективности охлаждения следует искать в уменьшении этого термического сопротивления, что может быть достигнуто, в частности, путем припаивания шины к цилиндрической части ТТ. Другим путем снижения этого сопротивления может быть оптимизация конструкции капиллярной структуры в зоне испарения ТТ для интенсификации теплопереноса при тепловых потоках до 20 Вт/см².

При условии пайки теплопроводным припоем контактных соединений в зонах «шина—ТТ» и «зона кон-

денсации ТТ—корпус блока» общий перепад температуры в системе «корпус транзистора—корпус блока» будет определяться перепадом температуры в зоне контакта «корпус транзистора—шина» и перепадом температуры по ТТ. Суммируя эти два перепада температуры, получим, что общее превышение температуры корпуса транзистора над температурой корпуса блока составит от 16,4 до 26,0 К соответственно для мощности тепловыделения от 27,0 до 51,5 Вт. Тогда при заданной температуре корпуса блока 40°С (313 К) температура корпуса транзистора будет лежать в диапазоне от 56,4 до 66,0°С (от 329 до 336 К), соответственно.

Таким образом, разработанная система теплоотвода модернизированного сверхвысокочастотного герметичного микроселектронного блока на основе тепловой трубы сложной формы, а также интенсификация теплопередачи в зоне контакта «корпус транзистора—посадочное место изделия» путем использования теплопроводной пасты и соединения тепловой трубы с шиной и корпусом блока с помощью пайки теплопроводным припоем, позволяют обеспечить температуру корпуса транзистора на уровне от 56,4 до 66,0°С при мощности тепловыделения от 27,0 до 51,5 Вт и заданной температуре корпуса блока 40°С.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Батуркин В., Шкода К., Кришук Н., Байбузенко Г. Моделирование теплопереноса в зонах подвода и отвода тепла тепловых труб сложной формы методом конечных элементов // 2-й Междунар. форум по тепло- и массообмену.— Минск, Беларусь.— 1992.— Т. VII. Теплоперенос в капиллярных системах.— С. 101—103.
2. Baturkin V., Bondar L., Shcoda K. Thermal regimes simulation of ramified heat pipes communication by finite element method // 25 ICES SAE-95.— Sun-Diego, USA.— 1995.— Report N 951553.
3. Дульнев Г. Н., Семьяшкин Э. М. Теплообмен в радиолетронных аппаратах.— Л.: Энергия, 1968.
4. Bobco R. P., Starkovs R. P. Rectangular thermal doublers of uniform thickness // AIAA Journal.— 1985.— Vol. 23 (12).— P. 1970—1977.
5. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиолетронной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1976.
6. www.HarvardThermal.com
7. Guenim W. B. Cooling solution in the past decade // Journal ElectronicsCooling.— 2006.— Vol. 11, N 4.— P. 6—20.
8. Blazej D. Thermal interface materials. www.electroniccooling\2003_November_a1.htm
9. Spacecraft thermal control handbook. Vol. 1. / Editor D. Gilmore.— El Segundo, California; Reston, Virginia: The Aerospace Press, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2002.
10. 2006 Buyer's guide // Journal ElectronicsCooling.— 2006.— Vol. 11, N 4.— P. 41—59.