

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, А. А. ЦЫГАНСКИЙ

Украина, г. Киев, Министерство промышленной политики Украины;
г. Львов, Научно-производственное предприятие "Карат"
E-mail: tim_mail@ukr.net

Дата поступления в редакцию
23.07 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КОЛЛЕКТОРНЫХ ТЕРМОСИФОНАХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ

Экспериментально показано, что встраивание коллекторных термосифонов на основе щелевых каналов в коммутационную плату позволяет в два раза снизить температуру в зоне теплоподвода.

При конструировании вычислительных систем широко используются керамические коммутационные платы с микропроцессорами. При существующих размерах теплоотводящего основания микропроцессоров плотность теплового потока на его поверхности лежит в пределах от 25 до 100 Вт/см², что требует применения эффективных систем охлаждения. Традиционное выполнение керамических коммутационных плат из алюмооксидной керамики типа ВК-94 при использовании воздушного охлаждения уже не может обеспечить нормальный тепловой режим полупроводниковых кристаллов.

Более эффективной системой охлаждения керамических плат является комбинированная система охлаждения. Внутри подложки платы встроен коллекторный термосифон со щелевыми испарительными каналами [1]. Здесь тепло передается теплоносителем с замкнутым испарительно-конденсационным циклом. Снаружи от верхней зоны подложки (зоны конденсации) тепло отводится через тепловой разъем водяным теплообменником базовой несущей конструкции.

Теоретическое обоснование использования щелевых каналов для интенсификации процессов теплообмена в замкнутых испарительно-конденсационных системах можно найти в [2, 3]. Однако экспериментальных данных по исследованию процессов теплообмена в щелевых коллекторных термосифонах, которые можно было бы использовать при проектировании керамических коммутационных плат с повышенным тепловыделением, найти в доступных источниках не удалось.

В данной работе приводятся результаты исследования процессов теплообмена и гидродинамики теплоносителя в каналах коммутационной керамической платы с различной геометрией каналов. Результаты получены методом физического моделирования на одном стеклянном и шести стеклокерамических макетах коммутационной платы [4, 5].

Экспериментальное исследование стеклянного макета проводилось на установке, внешний вид ко-

торой показан на **рис. 1**. В качестве рабочего участка использовался макет коллекторного термосифона с семью вертикальными испарительными каналами, изготовленный из боросиликатного стекла.

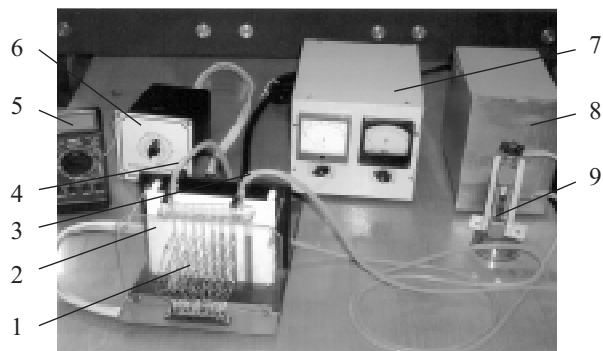


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — контактное приспособление для крепления термопар; 2 — рабочий участок (стеклянный макет коллекторного термосифона); 3, 4 — шланги для подвода и отвода охлаждающей воды, соответственно; 5 — цифровой измеритель температуры; 6 — переключатель термопар; 7 — блок регулирования и контроля мощности; 8 — блок питания; 9 — ротаметр

Схема макета с указанием мест установки термопар приведена на **рис. 2**, а его внешний вид — на **рис. 3**. Внутренний диаметр испарительных каналов составлял: 2,0 мм (1-й и 2-й каналы), 3 мм (3-й и 4-й каналы), 4 мм (5-й канал), 5 мм (6-й канал), 6 мм (7-й канал). Внутренний диаметр возвратного канала и питающего коллектора — 8 мм. Теплоноситель — дистиллированная вода, подкрашенная родамином для лучшей визуализации происходящих процессов.

В качестве источников тепла, подводимого к испарительным каналам, использовались омические нагреватели — нихромовая проволока, намотанная непосредственно на стеклянные трубки коллекторного термосифона, представляющие собой испарительные каналы.

Измерение температурного поля макета осуществлялось с помощью хромель-копелевых термопар, смонтированных в контактное приспособление, обеспечивающем надежный механический контакт спаев термопар с внешней поверхностью стенок испарительных каналов термосифона, в трех точках на каждом канале (см. **рис. 2**). Одна термопара была введена в паровое пространство с помощью стеклянной гильзы.

Визуальное наблюдение процессов гидродинамики теплоносителя внутри испарительных каналов при подводе к ним тепла осуществлялось с помощью цифровых фотокамер фирмы Olympus и Samsung, кинокамеры Sony CCD-TRV35E и Веб-камеры Logitech Quick Cam Messenger. Наблюдение процессов производилось при поочередном обогреве одного из каналов и необогреваемых остальных, а также при одновременном обогреве всех семи испарительных каналов.

Мощность на нагреватели подавалась ступенчато (пока не наступал процесс кипения в канале) и фиксировалось изменение температурного поля во

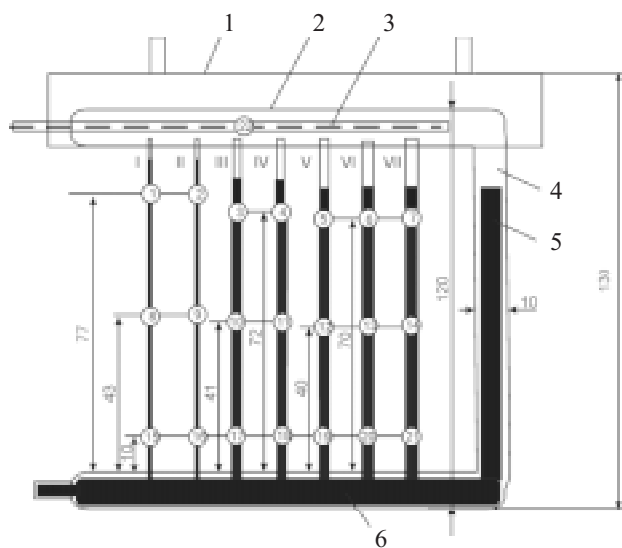


Рис. 2. Схема макета коллекторного термосифона с термомпарами:

1 — водяной теплообменник; 2 — собирающий коллектор; 3 — линия перемещения термомпары внутри гильзы в паровом пространстве; 4 — возвратный канал; 5 — уровень жидкого теплоносителя в возвратном канале; 6 — раздающий коллектор; I—VII — номера испарительных каналов термосифона, 1—22 — номера термомпар

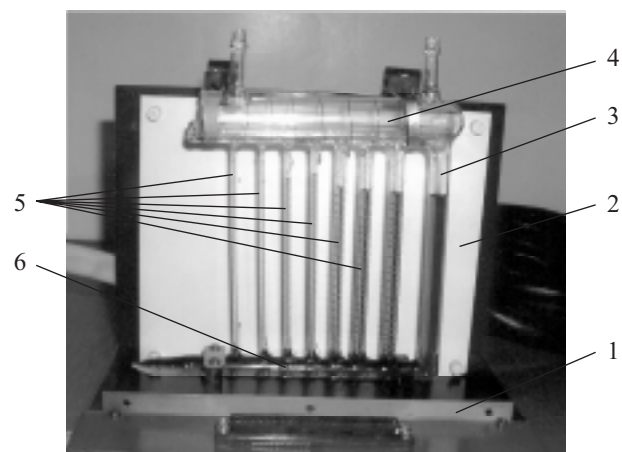
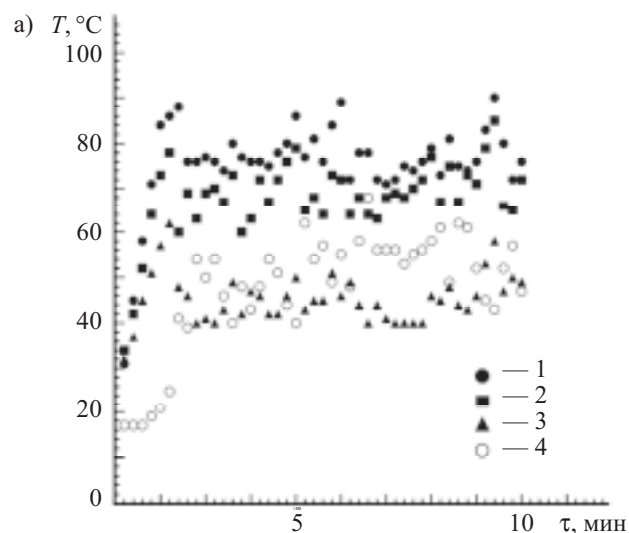


Рис. 3. Стеклянный макет коллекторного термосифона: 1 — основание; 2 — несущая плата; 3 — возвратный канал; 4 — конденсатор; 5 — испарительные участки с намотанными нагревателями; 6 — питающий коллектор

времени. Полученные типичные зависимости температуры в испарительных каналах (вверху, посредине и внизу) при разных вариантах обогрева каналов приведены на рис. 4. Наблюдаемые пульсации температуры стенок каналов во времени объясняются периодичностью процесса образования и разрушения паровых пузырей.

В результате визуальных наблюдений было установлено, что по мере увеличения тепловой нагрузки в каналах диаметром 2 мм наблюдалось быстрое выкипание жидкого теплоносителя, после чего канал осушался. С увеличением диаметра канала возрастала и плотность теплового потока, при которой начиналось устойчивое кипение. Наиболее стабильно режим кипения поддерживается в каналах диаметром от 4 до 6 мм. Однако выполнение внутри керамической платы каналов круглого сечения таких размеров неизбежно привело бы к увеличению ее толщины, которая в типичных радиоэлектронных

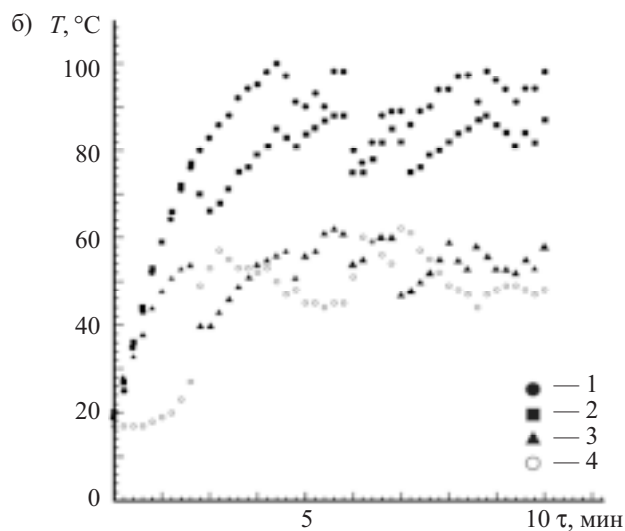


Рис. 4. Зависимость температуры T испарительных каналов во времени τ при подводе теплоты к одному из каналов (а) и ко всем каналам одновременно (б):

1 — верхняя часть канала; 2 — середина; 3 — нижняя часть канала; 4 — температура пара в области конденсатора

устройствах не должна превышать 3,5—4,0 мм. Поэтому были проведены исследования с каналами иной формы поперечного сечения.

Была разработана конструкция стеклокерамического макета платы с каналами прямоугольной и треугольной формы поперечного сечения. Были изготовлены и экспериментально исследованы 6 таких макетов, отличающихся между собой только геометрией испарительных каналов.

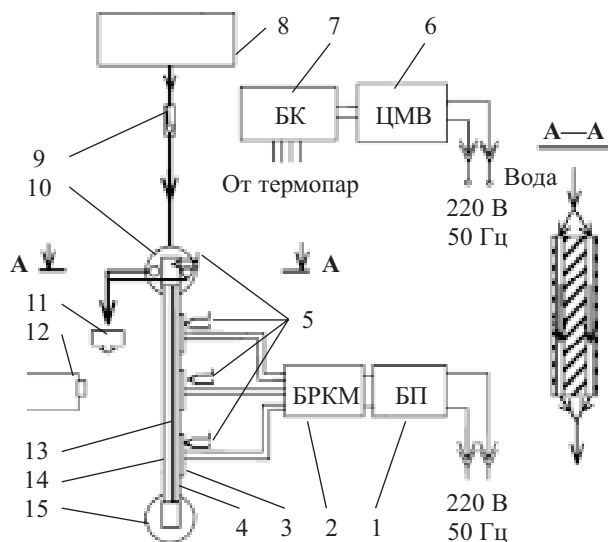


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для исследования стеклокерамических макетов коммутационной платы со встроенным щелевым коллекторным термосифоном: 1 — блок питания; 2 — блок регулирования и контроля мощности; 3 — имитатор тепловыделяющих элементов; 4 — керамическое основание макета платы; 5 — термопары; 6 — цифровой милливольтметр; 7 — блок коммутации термопар; 8 — емкость с водой; 9 — ротаметр; 10 — теплообменник; 11 — слив; 12 — видеокамера; 13 — испарительные каналы; 14 — стеклянная пластина; 15 — питающий коллектор

Схема экспериментальной установки показана на рис. 5. Основное ее отличие от установки, используемой при исследовании стеклянного макета, состоит в конструкции рабочего участка (см. рис. 6), в качестве которого использовались поочередно шесть



Рис. 6. Вид рабочего участка с испарительными каналами прямоугольного сечения

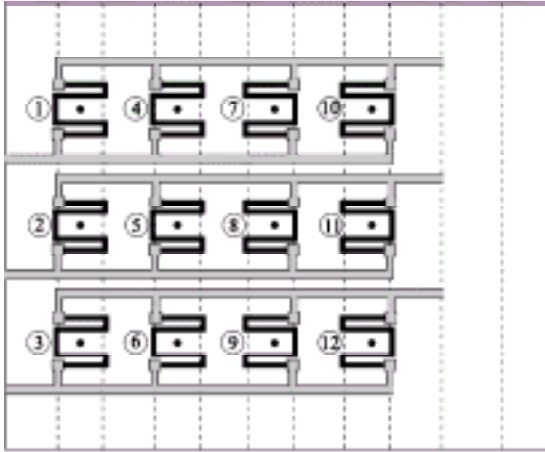
Каналы прямоугольного поперечного сечения	
1	2
3	4
Каналы треугольного поперечного сечения	
5	6
7	8

Рис. 7. Геометрические характеристики исследованных щелевых каналов

стеклокерамических макетов платы. В керамическом основании платы, имеющем размеры 100×120×2,5 мм, вдоль меньшей стороны платы на ее поверхности были прорезаны щелевые вертикальные каналы прямоугольного или треугольного сечения (размер наименьшей стороны канала — от 0,5 до 1,5 мм) и один возвратный канал размерами 90×10×1,5 мм. Щелевые вертикальные каналы на каждой плате были сгруппированы в 4 ряда шириной 10 мм каждый, расположенные на расстоянии 11 мм друг от друга и от возвратного канала. В одном ряду выполнялись каналы только одной формы и определенных размеров. На 6 макетах исследовались 8 разновидностей групп испарительных каналов (см. рис. 7).

В качестве имитаторов теплового потока, подводимого к каждому ряду испарительных каналов, использовались нагреватели (по 3 нагревателя в каждом ряду), изготовленные нанесением резистивной пасты на противоположную (относительно каналов) сплошную поверхность керамического основания платы. Топология нагревателей приведена на рис. 8.

Со стороны каналов керамическое основание по всей поверхности плотно закрывалось пластиной из стекла. Снизу устанавливались медный питающий коллектор, а сверху — медный собирающий коллектор с блоком водяного охлаждения. После вакуумно-плотной герметизации всех швов и вакуумирования все каналы и питающий коллектор заполнялись дистиллированной водой.



Каналы: 1 2 3 4 Возвратный
Рис. 8. Схема размещения имитаторов теплового потока и термопар на плате (вид со стороны каналов на просвет платы)

На керамическом основании платы в области имитаторов теплового потока было установлено 12 хромель-копелевых термопар с диаметром электродов 0,45 мм. (На рис. 8 места установки термопар показаны точками, а соответствующие им номера термопар указаны рядом в кружочках.) Одна термопара с электродом диаметром 0,3 мм была установлена в паровом пространстве собирающего коллектора.

В результате исследования было установлено (см. рис. 9), что наиболее интенсивно и стабильно процессы парообразования и теплообмена протекают в рядах с четырьмя испарительными щелевыми каналами прямоугольной формы шириной 1,43 мм, глубиной 0,72 мм, расположенными на расстоянии 1,43 мм друг от друга и объединенными дополнительным общим щелевым каналом с сечением прямоугольной формы 10×0,78 мм (см. канал 4 на рис. 7). Эквивалентный гидравлический диаметр такого канала составляет 1,74 мм.

Визуальное наблюдение процесса кипения в группе отдельных щелевых каналов прямоугольной фор-

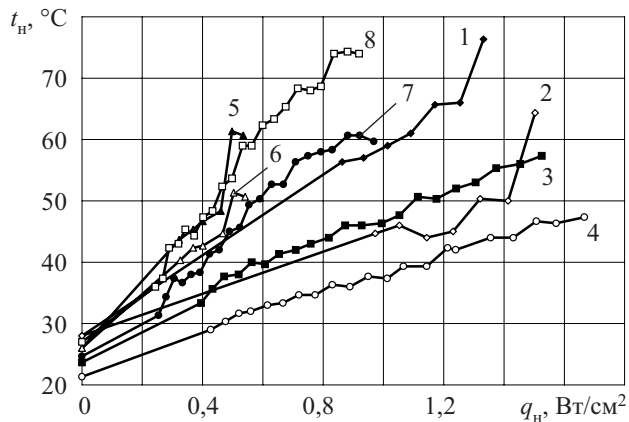


Рис. 9. Изменение температуры t_n в зоне нагрева платы в зависимости от плотности теплового потока q_n для каналов различной геометрии (номера каналов соответствуют указанным на рис. 7)

мы на макетах плат № 2 и № 4 (4 канала размерами 1,43×1,5 на расстоянии 1,43 мм друг от друга) и в канале сложной формы на макетах № 5 и № 6 (канал 4 на рис. 7) показало различие в гидродинамической картине происходящих процессов. В группе отдельных каналов зарождение, рост и разрушение паровых образований происходило в каждом смежном канале в различные моменты времени, не совпадающие между собой. В канале сложной формы в прилегающих к поверхности нагрева прямоугольных смежных углублениях происходит интенсивный процесс парообразования с периодическим осушением части поверхности. Здесь паровые образования объединяются в общей щели в один паровой «снаряд», который выбрасывается в паровое пространство зоны конденсации. Одновременно в этих углублениях канала осуществлялась интенсивная подпитка жидкости к зоне нагрева из возвратного канала термосифона, постоянно заполненного жидкостью и не обогреваемого нагревателями. Быстрая подпитка осушенных участков испарительных каналов стабилизирует процесс кипения и отодвигает кризис кипения в область более высоких значений плотности теплового потока.

Графики распределения среднего значения температуры по высоте каждого из четырех рядов испарительных каналов в зависимости от величины подводимого теплового потока для макета № 5 (см. рис. 10) свидетельствуют о высокой эффективности охлаждения керамического основания платы. Так, при суммарной мощности теплоподвода к плате 160 Вт (по 40 Вт на каждый ряд каналов) максимальная тем-

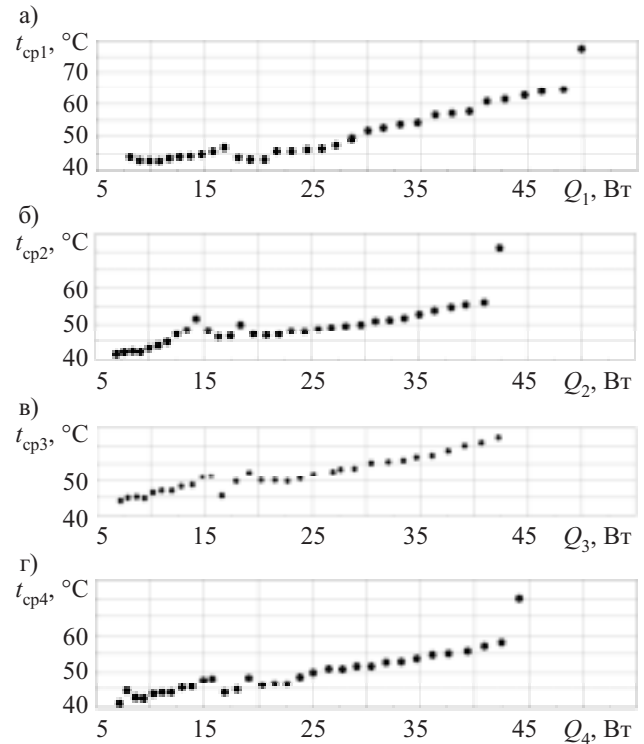


Рис. 10. Зависимость среднего значения температуры t_{cp} испарительных каналов макета № 5 от подводимого теплового потока Q для первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (г) рядов каналов

пература на поверхности платы не превышала 60°C (1-й ряд 58°C, 2-й ряд 56°C, 3-й ряд 60°C, 4-й ряд 57°C) при температуре воды на входе в блок водяного охлаждения 19°C и расходе воды через водяной теплообменник 2,1 л/мин. При превышении 42 Вт во 2-м и 4-м рядах щелевых каналов происходило запаривание испарительных каналов и начинался резкий рост температуры поверхности платы в области тепловых имитаторов.

Для макета № 6 (см. рис. 11) при суммарной мощности подводимого теплового потока 120 Вт (по 30 Вт на каждый ряд каналов) максимальная температура на поверхности платы не превышала 64°C (1-й ряд 55°C, 2-й ряд 56°C, 3-й ряд 64°C, 4-й ряд 62°C) при температуре воды на входе в блок водяного охлаждения 21°C (расход воды 4,8 л/мин).

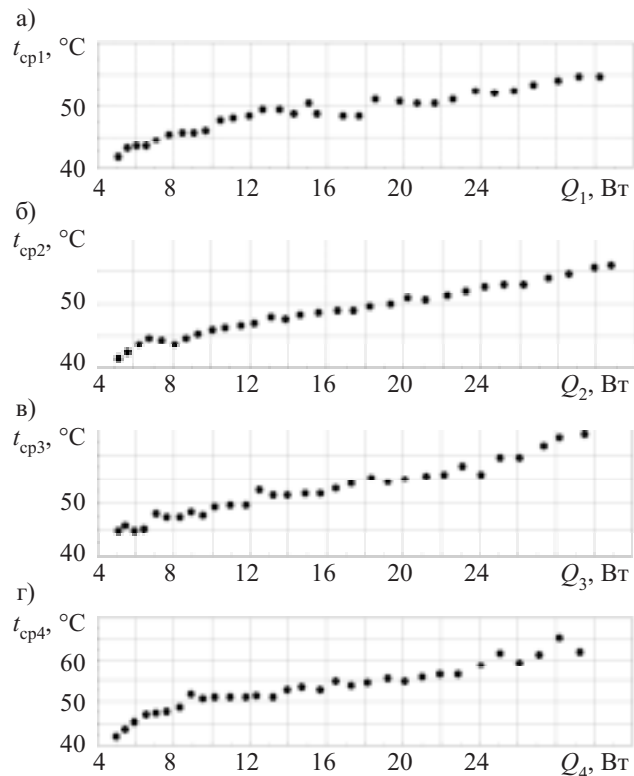


Рис. 11. Зависимость среднего значения температуры t_{cp} испарительных каналов макета № 6 от подводимого теплового потока Q для первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (г) рядов каналов

Как видно из рис. 10 и 11, интенсивность теплообмена в испарительных каналах макета № 5 выше, чем в таких же каналах макета № 6 (максимальное значение средней температуры керамической подложки каналов при тепловом потоке 120 Вт в макете № 5 не превышала 55°C). Последнее обстоятельство можно объяснить неоднозначностью характеристик шероховатости поверхности испарительных каналов, получаемых механическим способом в подложках керамических плат, и, возможно, различной степенью вакуумирования полости макетов плат.

Для сравнения разработанной системы теплоотвода с традиционной системой охлаждения (теплопроводностью вдоль подложки) были проведены

экспериментальные исследования на стеклокерамическом макете № 3 со щелевыми каналами треугольной формы, первый ряд которых (см. рис. 7) составляли каналы 8, второй ряд — каналы 7, третий ряд — каналы 5 и четвертый ряд — каналы 6.

В первой серии экспериментов передача тепла по плате осуществлялась теплопроводностью керамической подложки, поскольку каналы макета не были заполнены теплоносителем. Во второй серии передача тепла осуществлялась с помощью замкнутого испарительно-конденсационного цикла во встроенном коллекторном термосифоне со щелевыми каналами, заполненными дистиллированной водой.

Экспериментальные исследования показали (см. рис. 12), что уже сразу после включения тепловых имитаторов начинается опережающий рост температуры в плате без теплоносителя по сравнению с платой, охлаждаемой с помощью коллекторного термосифона. Через 135 с среднее значение температуры t_{cp} поверхности платы без теплоносителя в зоне расположения каналов в 1,97—2,15 раза превышало среднее значение температуры платы с внутренним замкнутым испарительно-конденсационным циклом. При этом максимальное значение темпера-

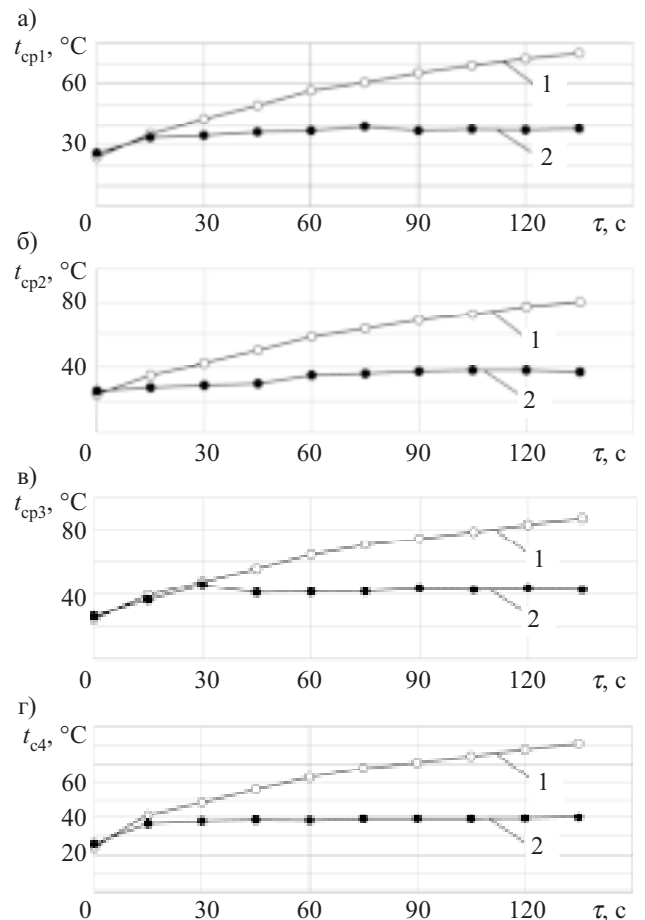


Рис. 12. Сравнительные тепловые характеристики макетов коммутационных керамических плат с отводом тепла теплопроводностью (1) и с помощью встроенного коллекторного термосифона со щелевыми каналами (2): а — 1-й ряд каналов, $Q=6,93 \text{ Вт}$; б — 2-й ряд каналов, $Q=6,57 \text{ Вт}$; в — 3-й ряд каналов, $Q=7,2 \text{ Вт}$; г — 4-й ряд каналов, $Q=7,3 \text{ Вт}$

туры платы с работающим коллекторным термосифоном не превышало 41°C, в то время как в плате без теплоносителя оно составляло 88°C и продолжало расти. (Во избежание разрушения макета тепловые имитаторы при достижении температуры платы 88°C отключались, и испытания прекращались.)

Следует отметить, что подводимая мощность тепловых имитаторов была относительно невысокой и составляла для первого ряда каналов 6,93 Вт, для второго — 6,57 Вт, для третьего — 7,2 Вт и для четвертого ряда — 7,3 Вт. При более высоких значениях подводимого теплового потока эффективность предложенной системы охлаждения будет еще выше.

Таким образом, результаты экспериментального исследования тепловых характеристик стеклокерамических макетов керамических коммутационных плат на основе встроенных коллекторных термосифонов со щелевыми испарительными каналами свидетельствуют о высокой эффективности разработанной системы теплоотвода.

Полученные результаты физического моделирования могут быть использованы в практике конструирования функциональных модулей ЭВМ с повышенным тепловыделением. По полученным экспе-

риментальным зависимостям в пределах исследованного диапазона подводимых тепловых потоков можно определить среднее значение температуры на поверхности керамической платы в зоне каждого ряда каналов при любой заданной тепловой мощности электронных компонентов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 45075 А України. Мікроборка електронного блока / Ю. Є. Ніколаєнко.— 2002.— Бюл. № 3.
2. Смирнов Г. Ф., Цой А. Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах.— М.: Изд-во МЭИ, 1999.
3. Безродный М. К., Пиоро И. Л., Костюк Т. О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика.— К.: Факт, 2005.
4. Николаенко Ю. Е., Цыганский А. А. Исследование гидродинамики теплоносителя в коллекторных термосифонах // Тр. Шестой междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии».— Одесса.— 2005.— С. 223.
5. Николаенко Ю. Е., Цыганский А. А. Моделирование керамических плат с повышенным тепловыделением на основе щелевых коллекторных термосифонов // Тр. Седьмой междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии». Т. 2.— Одесса.— 2006.— С. 42.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Динамика радиоэлектроники / Под общей редакцией Ю. И. Борисова.— М.: Техносфера, 2007.— 400 с.+ цв. вклейка.

Книга содержит материал о динамике развития радиоэлектроники — одной из наиболее важных составляющих научно-технического прогресса общества, во многом определяющей его социальные и оборонные возможности. Материалы книги подготовлены группой ученых и инженеров, непосредственно принимавших участие в исследованиях, разработках, испытаниях и применении изделий электронной техники и радиотехнической аппаратуры.

Для читателей, интересующихся созданием и развитием отечественной радиоэлектроники и условиями, в которых проходило ее становление в СССР.

НОВЫЕ КНИГИ



Антипенский Р. В., Фадин А. Г. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств.— М.: Техносфера, 2007.— 128 с.

В учебном пособии рассматриваются основные понятия схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств и математические основы их моделирования с использованием средств автоматизации.

Излагаются основы практического применения программ системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0 (OrCAD) для построения и моделирования принципиальных схем пассивных РЭУ в режиме анализа временных и частотных характеристик, а также для моделирования активных аналоговых и цифровых устройств. На сопровождающем книгу компакт-диске находятся: демо-версия системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0, модели фильтров, резистивного и резонансного усилителей, делителя частоты, преобразователя кода, а также необходимые для их исследования источники цифровых и аналоговых сигналов.

Учебное пособие предназначено студентам, занимающимся изучением и проектированием РЭУ, а также может быть полезно аспирантам, преподавателям и научным работникам, применяющим средства автоматизированного проектирования РЭУ.