

Ю.Е. Николаенко

Керамические коммутационные платы для функциональных модулей ЭВМ с повышенным тепловыделением

Проанализированы известные пути повышения эффективности отвода теплоты от керамических коммутационных плат и предложены новые перспективные схемные и конструктивно-технологические решения на основе встроенного в тело платы щелевого коллекторного термосифона. Приведены результаты экспериментального исследования стеклокерамического макета такой платы, позволяющие определить температуру ее поверхности в зависимости от теплового потока.

The analysis of the known trajectories of the pinch of efficiency of a tap of heat from ceramic switching boards is given and the new perspective circuit and structurally-technological solutions are suggested on the basis of slot-hole collector of thermosyphon built in a body of a board. The results of experimental examination of a glassceramic experimental model of such board are given which make it possible to spot a temperature of the surface of the board depending on a heat flow.

Проаналізовано відомі шляхи підвищення ефективності відведення теплоти від керамічних комутаційних плат та запропоновано нові перспективні схемні і конструктивно-технологічні рішення на основі вбудованого в тіло плати щілинного колекторного термосифону. Наведено результати експериментального дослідження склокерамічного макета такої плати, які дозволяють визначити температуру її поверхні залежно від теплового потоку.

Введение. При конструировании функциональных модулей высокопроизводительных ЭВМ широко используются керамические многослойные коммутационные платы с установленными на них микропроцессорами и многокристальные керамические модули сверхбольших и больших интегральных схем. Мощность, рассеиваемая современными микропроцессорами, уже достигает значений 130 Вт [1, 2], а в недалеком будущем ожидается ее рост до 200 Вт [2]. При существующих размерах теплоотводящего основания микропроцессоров плотность теплового потока на теплоотдающей поверхности находится в пределах от 25 до 100 Вт/см². Удельная тепловая мощность, которую рассеивают кристаллы сверхбольших интегральных схем, превышает 10 Вт/см², что соответствует, например, мощности кристалла 8 Вт при его размере 8 × 8 мм [3]. Повышенные значения плотности теплового потока, рассеиваемого микропроцессорами и сверхбольшими интегральными схемами керамических плат и модулей, требуют высокоэффективного охлаждения кристаллов для обеспечения их нормального теплового режима.

Постановка проблемы и ее связь с практическими задачами

Традиционное выполнение керамических коммутационных плат для функциональных

модулей с повышенным тепловыделением из алюмооксидной керамики типа ВК-94 при использовании воздушного охлаждения уже не может обеспечить нормальный тепловой режим полупроводниковых кристаллов. Некоторое выравнивание температуры кристаллов в пределах платы или модуля может дать использование в качестве подложки специального теплопроводного материала с алюминиевым или медным внутренним слоем [4], однако это не решает радикально проблему охлаждения кристаллов. В связи с этим отвод теплоты от электронных элементов функциональных модулей ЭВМ становится одним из определяющих при конструировании высокопроизводительных вычислительных систем.

Анализ известных путей повышения эффективности отвода теплоты от керамических коммутационных плат и нерешенные вопросы. Наиболее эффективный отвод теплоты от керамических коммутационных плат и многокристальных модулей достигается применением жидкостного охлаждения [5–7]. В одной из известных конструкций многослойных коммутационных плат [5] охлаждающая жидкость прокачивается по каналам платы, состоящей из двух керамических подложек, которые покрыты с обеих сторон слоем металлической фольги и соединены между собой слоем стекла, на их внешних поверхно-

стях установлены кристаллы интегральных схем, а на внутренних (в металлической фольге) – каналы охлаждения. Каналы платы соединены с жидкостной системой охлаждения электронного блока тонкими металлическими трубками. Другая конструкция [6] многослойной керамической платы размерами 85×105 мм содержит размещенную внутри платы систему из 29 микроканалов охлаждения сложной конфигурации сечением $0,4 \times 0,8$ мм, соединенных коллекторами с подводящим и отводящим трубопроводами. Аналогично выполнена и конструкция многослойной керамической платы [7].

Общими недостатками известных конструкций керамических плат с жидкостным охлаждением являются значительное гидравлическое сопротивление микроканалов, что требует значительных энергозатрат на прокачку жидкого теплоносителя, неравномерность и недостаточная эффективность охлаждения кристаллов интегральных схем, установленных на плате, вследствие нагрева теплоносителя по мере прохождения его по длине микроканалов и низкая ремонтпригодность, поскольку быстрое извлечение платы из электронного блока и ее замена затруднены из-за наличия присоединенных трубопроводов.

Цель настоящей статьи – разработка и исследование перспективных схемных и конструктивно-технологических решений построения керамических коммутационных плат и многокристальных модулей с жидкостным охлаждением с уменьшенным гидравлическим сопротивлением жидкостного тракта при одновременном повышении равномерности температурного поля и обеспечении возможности быстрой замены в условиях эксплуатации.

Предлагаемые новые схемные и конструктивно-технологические решения

Устранить указанные недостатки известных конструкций керамических плат с жидкостным охлаждением [5–7] можно путем построения керамических коммутационных плат и многокристальных модулей по схеме теплоотвода с помощью коллекторных термосифо-

нов с отдельным движением потоков пара и конденсата по различным каналам [8, 9]. Высокие значения коэффициента теплоотдачи, полученные при кипении теплоносителей в щелевых каналах [10, 11], дают основания предположить, что использование коллекторных термосифонов со щелевыми испарительными каналами в керамических платах и модулях вычислительной техники может оказаться достаточно перспективным для интенсификации процессов теплопередачи в них. Широкому внедрению в практику конструирования таких конструкций препятствует недостаточная изученность процессов гидродинамики и теплообмена в коллекторных термосифонах с испарительными каналами малых размеров, а также отсутствие конкретных конструкторско-технологических разработок для реализации такой технологии в функциональных модулях.

Одним из возможных перспективных путей практической реализации технологии отвода теплоты по предложенной схеме можно рекомендовать изготовление испарительных и возвратных каналов, питающего и собирающего коллекторов термосифона непосредственно в теле многослойной керамической печатной платы или многокристального модуля в процессе их изготовления [12].

На рис. 1 показана разработанная конструкция многослойной керамической коммутационной платы с выполненными внутри вертикальными испарительными каналами, питающими и собирающими коллекторами, образующими по сути встроенный внутрь платы коллекторный термосифон. С одной или двух сторон основания платы нанесен рисунок контактных площадок под установку микропроцессоров и электрических соединителей. Коммутация электрических связей между контактными площадками осуществляется проводящим рисунком на внутренних слоях платы. Между коммутационными слоями, прилегающими к каждой стороне платы, размещена керамическая подложка, в которой сформированы вертикальные щелевые испарительные те-

плототводящие каналы, проходящие под посадочными местами микропроцессоров. Форма поперечного сечения теплоотводящих каналов может быть любая (прямоугольная, круглая, треугольная, комбинированная и т.д.).

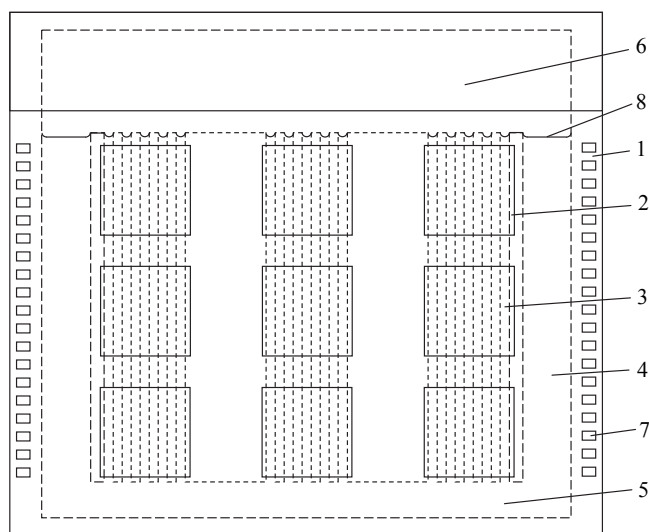


Рис. 1. Конструктивная схема многослойной керамической коммутационной платы с микропроцессорами, совмещенной с коллекторным термосифоном: 1 – основание платы; 2 – микропроцессор; 3 – испарительный теплоотводящий канал; 4 – возвратный канал; 5 – питающий коллектор; 6 – собирающий коллектор; 7 – контактная площадка для электрического соединителя; 8 – уровень жидкого теплоносителя

Наиболее рациональная форма сечения и размеры каналов определяются в результате физического моделирования. Нижние концы вертикальных щелевых каналов объединены питающим коллектором, сформированным в нижней части платы, верхние – собирающим коллектором, который может быть сформирован как в теле платы, в верхней ее части, так и путем установки сверху платы внешнего металлического обхватывающего полого элемента. Верхний собирающий коллектор соединен с нижним питающим коллектором с помощью одного или двух возвратных каналов, поперечное сечение которых превышает поперечное сечение теплоотводящего канала. Возвратные каналы располагаются вне зоны установки микропроцессоров, преимущественно в зоне вертикальных боковых краев платы. Теплоотводящие и возвратные каналы, питающий

коллектор полностью заполнены жидким теплоносителем, в качестве которого может использоваться дистиллированная вода, этиловый спирт и другие жидкости.

Конструктивная схема многокристального керамического модуля принципиально не отличается от описанной выше конструкции платы. На рис. 2 показан общий вид многокристального керамического модуля вычислительного устройства с частичным вертикальным разрезом и разрез модуля по линии А–А.

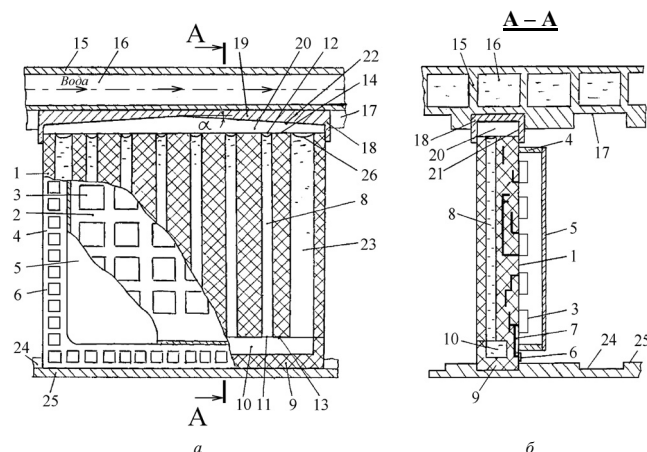


Рис. 2. Конструктивная схема многокристального керамического модуля интегральных схем с выполненным внутри него коллекторным термосифоном: а – общий вид с продольным разрезом; б – поперечный разрез

Схема движения потоков жидкости и пара в каналах модуля, поясняющая процесс отвода теплоты от тепловыделяющих полупроводниковых кристаллов интегральных схем, приведена на рис. 3. Такая же схема теплоотвода осуществляется и в многослойной керамической коммутационной плате, приведенной на рис. 1. Рассмотрим более подробно основные конструктивно-технологические решения и процессы теплопередачи в описанных конструкциях на примере многокристального керамического модуля.

Многокристальный керамический модуль (см. рис. 2, а) содержит многослойную керамическую плату 1 с зоной 2 на ее поверхности для расположения тепловыделяющих кристаллов 3 сверхбольших и больших интегральных схем. Рамка 4 с крышкой 5 обеспечивают гер-

метизацию модуля. С помощью электрических контактов 6 осуществляется электрическое соединение многокристального модуля с другими элементами вычислительного устройства. Электрическое соединение кристаллов 3 интегральных схем с электрическими контактами 6 выполнено с помощью печатных проводников 7 (см. рис. 2, б), размещенных на верхнем слое многослойной керамической платы. Внутри многослойной керамической платы расположена система щелевых испарительных теплоотводящих каналов 8, а также питающий коллектор 9 с полостью 10. Соответственно входные и выходные концы 11 и 12 теплоотводящих каналов размещены на двух противоположных торцах 13 и 14 платы. Тепловое соединение многокристального модуля с системой охлаждения вычислительного устройства, выполненной, например, в виде несущей плиты 15 с каналами 16 для прокачки воды и пазами 17 для установки модулей, осуществляется с помощью теплового разъема. Тепловой разъем модуля представляет собой металлический полый элемент 18, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда без одной боковой грани с полкой 19, установленный на верхнем торце 14 платы с обеспечением его обхвата. Плость 20 полого элемента 18 сообщается с полостями испарительных каналов 8. Входные концы 11 каналов 8 открыты в полость 10 питающего коллектора 9. Корпус полого элемента 18 герметичен и состоит из полки 19 и боковых стенок 21. Внутренняя поверхность 22 полки 19 корпуса полого элемента 18 расположена под углом α к горизонту. Возвратный канал 23 платы имеет эквивалентный диаметр больший, чем эквивалентный диаметр любого теплоотводящего канала платы, и размещен в пределах платы вне зоны установки кристаллов интегральных схем. Наклон внутренней поверхности полки 19 полого элемента 18 направлен к возвратному каналу. Плость 10 питающего коллектора 9 и все каналы платы доверху заполнены жидким теплоносителем, например дистиллированной водой (на рис. 2 уровень жидкого теплоноси-

теля показан позицией 26). В представленном на рис. 2 варианте исполнения питающий коллектор 9 с полостью 10 выполнен в теле многослойной керамической платы как ее продолжение. В другом варианте исполнения (на рис. 2 не показан) питающий коллектор может быть представлен в виде металлического полого элемента с герметичными стенками, аналогичного полному элементу 18, но без наклона внутренней поверхности его полки к горизонту, с обхватом нижнего торца платы.

Площи всех каналов платы, питающего коллектора и полого элемента 18 сообщаются между собой с образованием вакуумно-плотной жидкостно-паровой камеры.

Связь теплового разъема многокристального модуля с водяной системой охлаждения вычислительного устройства осуществляется путем установки теплового разъема модуля (полого элемента 18) с обеспечением теплового контакта (например, через слой теплопроводной пасты) в паз 17 охлаждающей плиты 15 базовой несущей конструкции вычислительного устройства. Низ модуля при этом размещен в направляющем пазу 24 опорного основания 25.

Предложенный многокристальный модуль может быть изготовлен по технологии, аналогичной описанной в [7]. Многослойную керамическую плату изготавливают методом обжига пакета металлизированных необожженных керамических заготовок. Для этого используют алюмооксидную керамику ВК 94-1 (АЯ0.027.002 ТУ). Проводники наносят с помощью метода трафаретной печати вольфрамомолибденовой пасты В-1 (ЩИ0.028.002 ТУ). Щелевые каналы 8 выполняют прямоугольного, треугольного или круглого сечения с эквивалентным диаметром от 1,0 до 2,0 мм, а возвратный канал 23 – прямоугольного сечения с эквивалентным диаметром, большим, чем каналы 8, например от 5 до 10 мм, путем набора в полупакет керамических заготовок. Потом их прессуют и обрабатывают с помощью лазерного луча, чтобы получить нужную конфигурацию каналов.

Металлизированные заготовки с рисунком проводников, полупакет керамических заготовок с рисунком каналов, неметаллизированные керамические заготовки набирают в пакет в последовательности, которая определяется топологией схемы. Потом осуществляют прессование и обжиг изделия. Таким образом получают многослойную керамическую плату 1, на внешней поверхности которой размещены проводниковые элементы и контактные площадки для присоединения кристаллов интегральных схем, электрических соединителей или внешних выводов, рамки и полового элемента.

Далее к плате методом пайки твердым пропоем присоединяют к электрическим контактам внешние выводы или электрические соединители (на рис. 2 не показаны), рамку и полый элемент теплового разъема. В случае выполнения питающего коллектора в виде нижнего полового элемента (второй вариант исполнения) его также присоединяют к плате с обхватом ее нижнего торца. Далее осуществляют пайку или сварку выводов кристаллов интегральных схем и присоединяют крышку к рамке с помощью роликовой сварки.

Принцип работы предложенных конструкций. Принцип работы многослойной керамической коммутационной платы с установленными на ней микропроцессорами и многокристального керамического модуля с установленными кристаллами сверхбольших и больших интегральных схем одинаков, рассмотрим его на примере работы многокристального модуля интегральных схем (см. рис. 3). Во время работы вычислительного устройства, в которое входит многокристальный модуль, расположенные на нем кристаллы интегральных схем выделяют теплоту. Под ее влиянием жидкий теплоноситель в теплоотводящих каналах начинает испаряться и кипеть, поглощая значительное количество теплоты от кристаллов интегральных схем и охлаждая их. На внутренней поверхности теплоотводящих каналов появляются паровые пузыри, размер которых растет по мере поглощения теплоты.

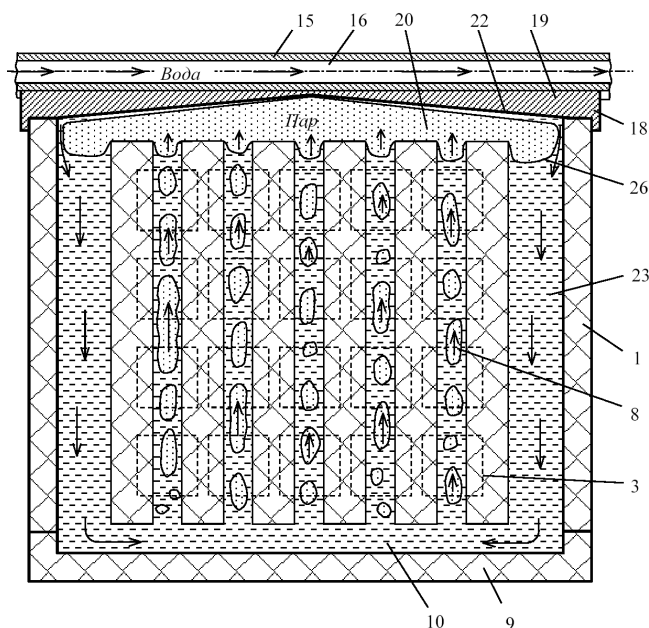


Рис. 3. Схема работы платы со встроенным внутри коллекторным термосифоном. Обозначения те же, что и на рис. 2

Температура насыщенного пара и давление в паровых пузырях повышаются и превышают температуру и давление насыщенного пара в полости 20 полового элемента 18, находящегося в тепловом контакте с холодной плитой 15 несущей конструкции. Под влиянием возрастающей разности давлений паровые пузыри и жидкий теплоноситель двигаются вверх вдоль охлаждающих каналов (на рис. 3 движение жидкого теплоносителя и пара в каналах показано стрелками). При достижении открытого верхнего торца канала пузыри разрушаются и насыщенный пар выходит в паровое пространство над каналами и конденсируется на внутренней поверхности стенок и полки 19 корпуса полового элемента 18. При этом выделяется поглощенная теплота парообразования, которая путем теплопередачи через корпус полового элемента 18, слой теплопроводящей пасты в пазу 17 и стенку плиты 15 передается потоку воды в каналах 16 (на рис. 2 поток воды в каналах 16 показан стрелками) охлаждающей плиты 15 базовой несущей конструкции устройства и отводится ею. Конденсат с наклонной поверхности 22 полки 19 под действием силы тяжести возвращается в

возвратный жидкостный канал 23. Вследствие действия силы тяжести, закона сообщающихся сосудов и капиллярных сил жидкий теплоноситель из возвратного канала поступает через полость 10 питающего коллектора 9 в зону нагрева теплоотводящих каналов 8 платы. Цикл передачи теплоты в теле керамического модуля путем кипения-конденсации повторяется.

Обоснование эффективности разработанной конструкции. Благодаря тому, что эквивалентный диаметр охлаждающих каналов в плате 15 базовой несущей конструкции (порядка 5–8 мм) значительно больше по сравнению с эквивалентным диаметром микроканалов в известных устройствах [6, 7] (порядка 1 мм), гидравлическое сопротивление жидкостной магистрали, а соответственно и энергозатраты на прокачку теплоносителя по каналам охлаждения вычислительного устройства значительно уменьшаются [13].

Поскольку в установленном тепловом режиме температура пара и жидкого теплоносителя в теплоотводящих каналах практически приближается к температуре насыщенного пара в общей для всех каналов полости 20 этого элемента 18, то в разработанном устройстве обеспечивается одинаковый температурный режим для всех идентичных кристаллов интегральных схем независимо от места размещения их на плате, в отличие от известных керамических многокристальных модулей [6, 7] с микроканальным охлаждением конвекцией жидкости, в которых температурный режим кристаллов интегральных схем, размещенных на плате вдоль одного и того же канала, различный вследствие нагрева жидкости по мере прохождения ее вдоль каналов.

Благодаря высоким значениям коэффициентов теплоотдачи при кипении и конденсации, передаче теплоты от кристаллов интегральных схем по плате путем высокоэффективного замкнутого испарительно-конденсационного цикла обеспечивается более эффективный по сравнению с известными техниче-

скими решениями отвод теплоты от кристаллов сверхбольших и больших интегральных схем многокристального модуля, более равномерный и более низкий уровень температуры полупроводниковых кристаллов, что повышает их надежность и помехозащищенность вычислительного устройства.

Для быстрого извлечения и замены многослойной керамической коммутационной платы или многокристального модуля в условиях эксплуатации достаточно выдвинуть их из направляющих пазов охлаждающей плиты базовой несущей конструкции и вставить вместо них новую плату или модуль. При этом не разрывается водяная магистраль и не нарушается герметичность каналов внутри керамической платы или модуля, значительно сокращается время замены последних, что существенно повышает ремонтпригодность вычислительного устройства.

Экспериментальное исследование предложенной схемы организации теплоотвода в керамических платах с коллекторным термосифоном и полученные результаты. С целью изучения процессов гидродинамики и теплообмена в коллекторных термосифонах с внутренним диаметром испарительных каналов от 1,5 до 6,0 мм было разработано две конструкции стеклянных макетов таких теплопередающих устройств [9], одна из которых приведена на рис. 4. Теплоноситель – дистиллированная вода, подкрашенная родамином для лучшей визуализации происходящих процессов. Визуальное наблюдение процессов гидродинамики теплоносителя внутри испарительных каналов при их наружном обогреве электрическим нагревателем из нихромовой проволоки осуществлялось с помощью цифровых фотокамер фирмы *Olympus* и *Samsung*, кинокамеры *Sony CCD-TRV35E* и *Veb*-камеры *Logitech Quick Cam Messenger*. Наблюдение процессов проводилось при обогреваемом одном (поочередно) испарительном канале и необогреваемых остальных, а также при одновременно обогреваемых всех семи испарительных каналах.

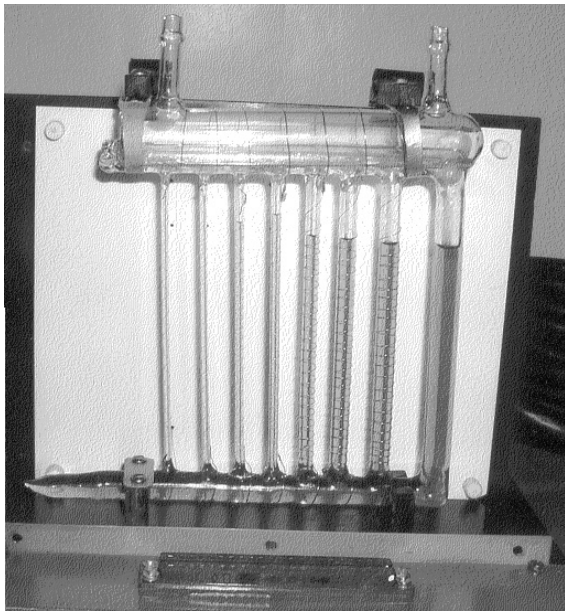
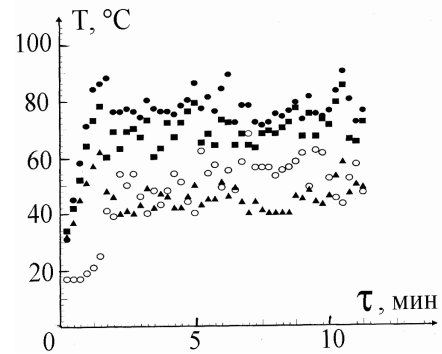


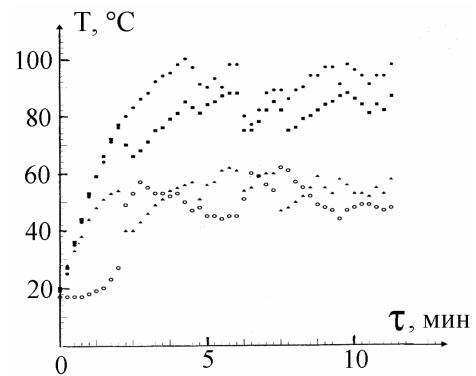
Рис. 4. Общий вид стеклянного макета коллекторного термосифона

Полученные типичные зависимости температуры вверху (черные кружочки), посередине (квадраты) и внизу (треугольники) испарительных каналов при обогреваемом четвертом канале и необогреваемых остальных приведены на рис. 5, *а*, при всех обогреваемых каналах – на рис. 5, *б*. Незачерненными кружочками показаны значения температуры в паровой области конденсатора. Наблюдаемые пульсации температуры каналов во времени объясняются периодичностью процесса образования и разрушения паровых пузырей. В результате визуальных наблюдений было установлено, что наиболее стабильно режим кипения поддерживается в каналах диаметром от 3,0 до 6,0 мм. С увеличением диаметра канала возрастали и плотности теплового потока, при которых начиналось устойчивое кипение. В каналах диаметром 1,5 и 2,0 мм наблюдалось быстрое выкипание жидкого теплоносителя, после чего наступало их осушение. Однако, учитывая стремление к уменьшению толщины керамической платы, на основании проведенных наблюдений было решено провести экспериментальное моделирование теплопередающих характеристик керамической платы с каналами как можно меньшего эквивалентного диамет-

ра. При этом для создания благоприятных условий для подпитки жидкостью периодически осушаемых каналов было предусмотрено исследование группы щелевых каналов, объединенных более широким общим.



а



б

Рис. 5. Зависимость температуры испарительных теплоотводящих каналов во времени при подводе тепловой нагрузки: *а* – к одному из каналов; *б* – ко всем каналам одновременно

Исследование процессов гидродинамики теплоносителя в каналах керамической платы с различной геометрией каналов и ее теплопередающих характеристик было проведено методом физического моделирования на пяти стеклокерамических макетах платы [14]. Внешний вид одного из них представлен на рис. 6. В керамическом основании, имеющем размеры 100 × 120 мм и толщину 2,5 мм, вдоль меньшей стороны платы на ее поверхности выполнялись щелевые вертикальные каналы треугольного и прямоугольного сечения (размер наименьшей стороны канала – от 0,3 до 1,5 мм) и один возвратный канал. Размеры возвратно-

го канала $90 \times 12 \times 1,5$ 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 были каналы только одной формы и размеров.

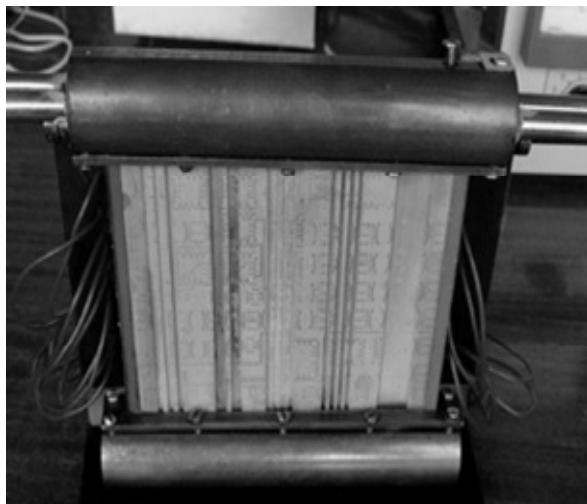


Рис. 6. Общий вид стеклокерамического макета платы с внутренним щелевым коллекторным термосифоном

В пределах 5 макетов исследовалось 12 разновидностей групп испарительных каналов. В качестве имитаторов теплового потока использовались омические нагреватели (по 3 штуки в каждом ряду), которые наносились резистивной пастой на противоположную сплошную поверхность керамического основания. Со стороны каналов керамическое основание по всей поверхности плотно закрывалось пластиной из стекла, снизу и сверху устанавливались медный питающий коллектор и медный собирающий коллектор с блоком водяного охлаждения. После этого осуществлялась вакуумно-плотная герметизация всех швов, вакуумирование и заполнение всех каналов и питающего коллектора дистиллированной водой.

На керамическом основании платы в области имитаторов теплового потока было установлено 12 хромель-копелевых термопар с диаметром электродов 0,45 мм, а в паровом пространстве собирающего коллектора одна термопара с диаметром электродов 0,3 мм. В

результате измерений температурного поля и визуального наблюдения установлено, что наиболее стабильно протекают процессы парообразования и теплообмена в рядах с 4 испарительными щелевыми каналами прямоугольной формы шириной 1,43 мм, глубиной 0,78 мм, расстоянием между ними 1,43 мм, объединенными дополнительным общим щелевым каналом сечением $10 \times 0,72$ мм. При мощности теплоподвода 82 Вт максимальная температура на поверхности платы не превышала $+46^\circ\text{C}$ (1-й ряд $+45^\circ\text{C}$, 2-й ряд $+44^\circ\text{C}$, 3-й ряд $+46^\circ\text{C}$, 4-й ряд $+41^\circ\text{C}$) при температуре воды на входе в блок водяного охлаждения $+12^\circ\text{C}$ и расходе воды 0,84 л/мин. При увеличении мощности теплоподвода 115 Вт максимальная температура на поверхности платы не превышала $+58^\circ\text{C}$ (1-й ряд $+54^\circ\text{C}$, 2-й ряд $+56^\circ\text{C}$, 3-й ряд $+55^\circ\text{C}$, 4-й ряд $+58^\circ\text{C}$) при тех же параметрах водяного охлаждения.

Увеличение расхода воды в теплообменнике, охлаждающем стенки собирающего коллектора, до 4,5 л/мин позволило устойчиво отводить от тепловых имитаторов платы тепловой поток 160 Вт (по 40 Вт от каждого ряда щелевых каналов) при максимальной температуре поверхности платы $+68^\circ\text{C}$ (1-й ряд $+65^\circ\text{C}$, 2-й ряд $+59^\circ\text{C}$, 3-й ряд $+68^\circ\text{C}$, 4-й ряд $+60^\circ\text{C}$). При этом температура воды на входе в теплообменник составляла $+24^\circ\text{C}$. На рис. 7 приведено распределение температуры в трех точках платы вдоль одного из рядов (первого) теплоотводящих каналов в зависимости от величины подводимого теплового потока. Аналогичный характер имеют температурные зависимости и для остальных трех рядов щелевых каналов. В пределах исследованного диапазона подводимых тепловых потоков по полученным зависимостям можно определить максимальную температуру на поверхности платы в зоне каждого теплового имитатора при любой заданной тепловой мощности.

Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенная система охлаждения обеспечивает эффективный от-

вод теплоты, снижение гидравлического сопротивления водяной магистрали и энергозатрат на прокачку теплоносителя благодаря увеличению диаметра охлаждающих каналов до 8–10 мм.

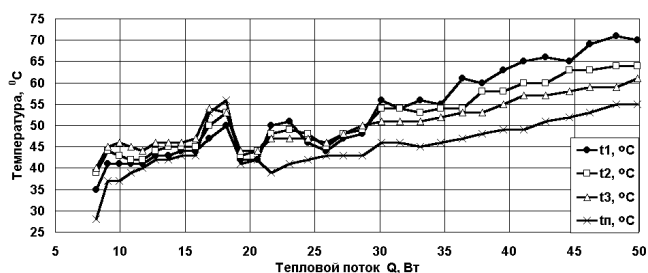


Рис. 7. Типичная зависимость температуры поверхности платы вдоль одного (первого) ряда щелевых каналов от подводимого теплового потока: t_1 , t_2 , t_3 – температура в верхней части ряда, посередине и в нижней части ряда соответственно, t_n – температура пара

Заключение. Предложен новый принцип построения многослойных керамических коммутационных плат и многокристалльных керамических модулей для функциональных модулей ЭВМ с повышенным тепловыделением, основанный на технологии выполнения коллекторного термосифона непосредственно в теле керамической подложки, что позволяет, в отличие от известного принципа использования технологии микроканального жидкостного охлаждения, снизить гидравлическое сопротивление жидкостной магистрали и энергозатраты на прокачку охлаждающей воды по базовым несущим конструкциям системы, увеличить помехозащищенность сложных вычислительных систем вследствие повышения равномерности температурного поля платы, а также улучшить ремонтпригодность в условиях эксплуатации.

Полученные результаты экспериментального исследования теплопередающих характеристик макета керамической платы с внутренним щелевым коллекторным термосифоном свидетельствуют о высокой эффективности отвода теплоты благодаря реализованному внутри платы замкнутому испарительно-конденсационному циклу. В частности, при мощности тепловыделения 115 Вт максималь-

ная температура на поверхности платы не превышала $+58^{\circ}\text{C}$ при температуре воды на входе в теплообменник $+12^{\circ}\text{C}$ и расходе воды 0,84 л/мин. При этом неравномерность температурного поля платы находилась в пределах 5°C . Увеличение расхода воды в теплообменнике, охлаждающем стенки собирающего коллектора, до 4,5 л/мин позволило отводить от платы тепловой поток 160 Вт при температуре поверхности платы не выше $+68^{\circ}\text{C}$ (температура воды на входе $+24^{\circ}\text{C}$). Максимальный перепад температур между поверхностью платы и охлаждающей жидкостью остался практически неизменным (44°C вместо 46°C), а термическое сопротивление платы, определенное относительно общего передаваемого теплового потока, снизилось с 0,4 до $0,28^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Полученные результаты могут быть использованы в практике конструирования функциональных модулей ЭВМ с повышенным тепловыделением.

С целью ускорения внедрения предложенных конструкций в практику конструирования средств вычислительной техники дальнейшие исследования необходимо сосредоточить на отработке технологических процессов изготовления в промышленных условиях технологичных конструкций предложенных керамических плат со встроенным коллекторным щелевым термосифоном.

1. Валентинова М. 64-бит процессоры дают плотно упакованные решения // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2004. – № 3. – С. 30–37.
2. Вербицкий В.Г. Ионные нанотехнологии в электронике. – К.: «МП Леся», 2002. – 376 с.
3. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
4. Коснырев В. Компания Bergquist: теплопроводные материалы настоящего и будущего // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2005. – № 5. – С. 32–35.
5. Пат. № 4739443 США, МПК H05K7/20. Термически проводящий модуль / Olin Corporation, Narendra N. – № 75700; 19.04.1988. – 7 р.
6. Джерри Лаймен. Многокристалльные модули с охлаждающими микроканалами // Электроника. – 1986. – № 10. – С. 20–21.

7. Пат. № 3247, МПК H05K7/20, Украина. Микрозборка электронного блока / В.К. Агруч, В.С. Овчаренко, Т.І. Вільховік, В.П. Дехтярьова. – Оpubл. 26.12.94. Бюл. № 5–1. – 1994. – 3 с.
8. Николаенко Ю.Е. Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов и устройств // УСиМ. – 2005. – № 2. – С. 29–36.
9. Николаенко Ю.Е., Цыганский А.А. Исследование гидродинамики теплоносителя в коллекторных термосифонах // Труды Шестой Междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии», 23–27 мая 2005 г., Одесса. – Одесса: ДП «Нептун-Технология». – С. 223.
10. Смирнов Г.Ф., Цой А.Д. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 440 с.
11. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – К.: Факт, 2005. – 704 с.
12. Деклараційний патент України на винахід № 45075 А, МПК Н 05К 7/20. Микрозборка електронного блока / Ю.Є. Ніколаєнко. – Оpubл. 15.03.2002. Бюл. № 3. – 2002. – 5 с.
13. Николаенко Ю.Е. Аппаратное построение высокопроизводительных вычислительных систем с повышенной эффективностью теплоотвода // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 5. – С. 31–34.
14. Николаенко Ю.Е., Цыганский А.А. Моделирование керамических плат с повышенным тепловыделением на основе щелевых коллекторных термосифонов // Труды Седьмой Междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии», 22–26 мая 2006 г. Одесса. – Одесса: ДП «Нептун-Технология», 2006. – Т. 2. – С. 42.

Поступила 19.06.2006
Тел. для справок: (044) 246-3238 (Киев)
E-mail: nikol@industry.gov.ua
© Ю.Е. Николаенко, 2006

Внимание !

**Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Подписной индекс 71008