

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРИБОРЫ

УДК 621.362

*Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А.*

### ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ОТ КРИСТАЛЛА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ К ТЕПЛОТВОДУ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОПЛЕНОЧНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

*Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A.*

### INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER FROM THE IC CHIP TO THE HEAT SINK THROUGH THE USE OF NANOFILM THERMOELECTRIC HEAT PUMP

*В статье рассмотрена возможность повышения эффективности термоэлектрического теплового насоса за счет изготовления полупроводниковых ветвей р- и n-типа в виде нанопленок и создания условий для возникновения дополнительного термоэффекта между горячими и холодными спаями, изготовленных из разных металлов, что позволит создать тепловые насосы большей эффективности при малых габаритах.*

**Ключевые слова:** *нанопленочный термоэлектрический тепловой насос, полупроводниковые ветви, теплоперенос, сверхбольшая интегральная схема.*

*The article considers the to enhance the efficiency the thermoelectric heat pump by making the branches of semiconductor p- and n-type as nanofilms and creating conditions for the emergence of additional thermoeffect between the hot and cold junctions of dissimilar metals that will create a more efficient heat pumps with small dimensions.*

**Key words:** *nanofilm thermoelectric heat pump, semiconductor branch, heat transfer, very large scale integration.*

Применение современных высокопроизводительных сверхбольших интегральных схем, составляющих основу компьютеров, сопровождается значительным тепловыделением, особенно при эксплуатации их в форсированных режимах разгона. Надежная работа таких компонентов требует адекватных средств термостатирования, обеспечивающих необходимые тепловые режимы их работы. Такими средствами поддержки

оптимальных температурных режимов являются кулеры, основой которых являются традиционные радиаторы и вентиляторы.

Эффективность и производительность кулеров непрерывно повышаются за счет совершенствования их конструкции, использования новейших технологий и применения в их составе разнообразных датчиков и средств контроля. Это позволяет интегрировать подобные средства в состав компьютерных систем, обеспечивая диагностику и управление их работой с целью достижения наибольшей эффективности при обеспечении оптимальных температурных режимов эксплуатации сверхбольших интегральных схем, что повышает надежность и удлиняет сроки их безаварийной работы [1].

Наиболее вероятной причиной выхода из строя большинства сверхбольших интегральных схем является тепловой удар, так как электрический пробой маловероятен благодаря высокому качеству изготовления современных сверхбольших интегральных схем. Статистика отказов сверхбольших интегральных схем согласно данным, полученным в ремонтных мастерских фирм, занимающихся поставкой и обслуживанием компьютеров («Teen», «Nixx», «Sunrize»), показывает, что 50% компьютеров, поступающих на ремонт, выходят из строя в момент включения компьютера. Сюда входят и случаи отказов сверхбольших интегральных схем (в среднем 8 % от общего числа отказов). При этом 5 % отказов приходится на случаи нарушений в работе процессора в режиме включения компьютера, а 3 % - на случаи нарушений в установленном режиме работы компьютера.

Обеспечение эффективного охлаждения процессора - актуальная проблема. Очевидно, что обеспечение необходимого теплового режима в момент включения и выключения компьютера, когда процессор испытывает сильнейшие тепловые перегрузки, – одна из составляющих этой проблемы. Другая составляющая этой проблемы – обеспечение теплового режима работы процессора во время работы компьютера. Проведенные в дальнейшем испытания подтвердили, что плавный нагрев и охлаждение однозначно устраняют тепловой удар процессора [2].

Традиционные кулеры на основе радиаторов и вентиляторов не обеспечивают достаточно эффективное охлаждение и термостатирование сверхбольших интегральных схем. Поэтому требуется принятие дополнительных мер по совершенствованию существующих систем охлаждения и термостатирования.

Параметры традиционных кулеров непрерывно улучшаются, тем не менее, в последние годы на компьютерном рынке появились и вскоре стали популярными такие специфические средства охлаждения электронных элементов, как полупроводниковые кулеры Пельтье [1].

Кулеры Пельтье, содержащие специальные полупроводниковые термоэлектрические модули, работа которых основана на эффекте

Пельтье, открытом в 1834 г., являются наиболее перспективными устройствами охлаждения. Подобные средства уже много лет успешно применяются в различных областях науки и техники [2].

В последние годы данные модули стали активно использовать для охлаждения разнообразных электронных компонентов компьютеров и, в частности, для охлаждения современных мощных сверхбольших интегральных схем, работа которых сопровождается высоким уровнем тепловыделения.

Благодаря своим уникальным тепловым и эксплуатационным свойствам, устройства, созданные на основе термоэлектрических модулей – модулей Пельтье, позволяют достичь необходимого уровня охлаждения компьютерных элементов без особых технических трудностей и финансовых затрат. Как кулеры электронных компонентов, данные средства поддержки необходимых температурных режимов их эксплуатации являются чрезвычайно перспективными. Они компактны, удобны, надежны и обладают очень высокой эффективностью работы [1].

Наибольший интерес полупроводниковые кулеры представляют в качестве средств, обеспечивающих интенсивное охлаждение в компьютерных системах, элементы которых, установлены и эксплуатируются в жестких форсированных режимах. Использование таких режимов – режимов разгона - часто обеспечивает значительный прирост производительности применяемых электронных компонентов, а, следовательно, как правило, и всей системы компьютера. Однако работа компьютерных компонентов в подобных режимах отличается значительным тепловыделением и нередко находится на пределе возможностей компьютерных архитектур, а также существующих и используемых микроэлектронных технологий. Такими компьютерными компонентами, работа которых сопровождается высоким тепловыделением, являются не только высокопроизводительные процессоры, но и элементы современных высокопроизводительных видеоадаптеров, а в некоторых случаях и микросхемы модулей памяти. Подобные мощные сверхбольшие интегральные схемы требуют для своей корректной работы интенсивного охлаждения даже в штатных режимах и, тем более, в режимах разгона.

Использование термомодулей в активных кулерах делает их существенно более эффективными по сравнению со стандартными типами кулеров на основе традиционных радиаторов и вентиляторов [5,7,9]. Однако в процессе конструирования и использования кулеров с термомодулями необходимо учитывать ряд специфических особенностей, вытекающих из конструкции модулей, их принципа работы, архитектуры современных аппаратных средств компьютеров и функциональных возможностей системного и прикладного программного обеспечения [2].

Существенное значение имеет мощность термомодуля, которая, как правило, зависит от его размера [6,8]. Модуль малой мощности не обеспечивает необходимый уровень охлаждения, что может привести к нарушению работоспособности сверхбольшой интегральной схемы. Но применение модулей слишком большой мощности может вызвать понижение температуры охлаждающего радиатора до уровня конденсации влаги из воздуха, что опасно для электронных цепей. Это связано с тем, что вода, непрерывно получаемая в результате конденсации, может привести к коротким замыканиям в электронных цепях компьютера.

На рис.1 представлен внешний вид активного кулера, в составе которого использован двухкаскадный термомодуль.



**Рисунок 1** - Внешний вид кулера с двухкаскадным термомодулем

Главным недостатком традиционных кулеров, даже с применением термомодулей, является сохранение существенных препятствий теплопереносу тепла от нагретых электронных компонентов в кристалле интегральной схемы через подложку и корпус к теплоотводу. Инерционность тепловых процессов может привести к локальному перегреву и тепловому пробоем электронных компонентов.

Для устранения этой проблемы целесообразно интенсифицировать процесс переноса тепла за счет применения термоэлектрических тепловых насосов. Существует термоэлектрический тепловой насос [1], у которого горячие и холодные спаи изготовлены из одинаковых металлов и высота полупроводниковых ветвей больше их ширины и длины. Однако протекание электрического тока по полупроводниковым ветвям р- и n-типа приводит к выделениям паразитного тепла Джоуля. Причем количество выделенного тепла пропорционально квадрату величины протекающего тока [1]. Кроме того, дополнительные паразитные тепловыделения происходят на границах между металлическими спаями и полупроводниковыми ветвями р- и n-типа.

Повысить эффективность термоэлектрического теплового насоса за счет уменьшения выделения паразитного тепла Джоуля в полупроводниковых ветвях и создание условий для возникновения дополнительного термоэффекта между горячими и холодными спаями,

изготовленных из разных металлов, [3] можно, изготовив полупроводниковые ветви р- и n-типа в виде нанополенок с практически нулевым сопротивлением протекающему току за счет большого соотношения поперечного сечения к высоте ветви. Уменьшение высоты ветвей приводит к возрастанию паразитного кондуктивного обратного теплопереноса, но это не играет большой роли, так как большинство режимов работы тепловых насосов по интенсифицированию процессов переноса тепла от одного объекта к другому соответствует равенству температуры на обоих спаях [4].

Высота полупроводниковых ветвей задается соразмерной длине свободного пробега электронов в полупроводниках р- и n-типа. Так как количество соударений электронов с кристаллической решеткой полупроводников р- и n-типа будет уменьшено на несколько порядков, а также часть электронов вообще беспрепятственно проникнут сквозь ветвь в противоположный спай, то это позволит практически устранить паразитные выделения тепла Джоуля. С увеличением тока возрастает количество тепла от термоэлектрического эффекта Пельтье [1]. Ограничением служит возрастание тепловых выделений Джоуля. Так как эффект Пельтье линейно зависит от величины электрического тока, а теплота Джоуля квадратична по отношению к току, то существует оптимальное значение тока, при котором можно отводить тепло с максимальной эффективностью. При исключении паразитных выделений тепла Джоуля из уравнения теплового баланса [1], величину тока можно существенно увеличить, получив большую эффективность теплового насоса, до новых оптимальных значений, ограниченных процессами кондукции между объектом охлаждения, тепловым насосом и системой теплоотвода.

Уравнение теплового баланса для охлаждающего спая имеет следующий вид:

$$Q = -PI + \frac{1}{2}I^2R. \quad (1)$$

Так как тонкопленочные полупроводниковые ветви имеют величину сопротивления  $R$ , практически равную нулю, то и доля джоулевых тепловыделений также будет практически нулевой, и уравнение примет вид:

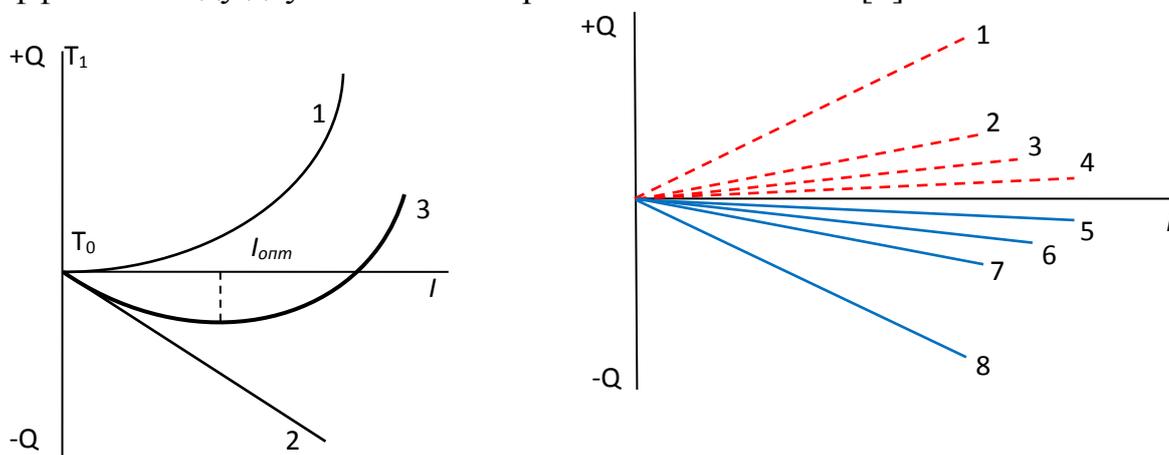
$$Q = -PI. \quad (2)$$

Причем, эффект Пельтье будет наблюдаться в трех различных видах:

$$Q = -P_1I - P_2I - P_3I, \quad (3)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  – соответствуют охлаждающему термоэлектрическому эффекту Пельтье для контакта полупроводников р- и n-типа, контакта двух металлов и контакта металлов с полупроводниками р- и n-типа.

Дополнительным преимуществом является возможность изготовления горячего и холодного спаев из двух металлов с различными термоэлектрическими характеристиками [5]. Это приведет к тому, что электроны, беспрепятственно проникшие через полупроводниковые ветви р- и n-типа к противоположному спаю, сформируют термоэлектрический эффект с выделением или поглощением тепла, как в обычном термоэлектрическом устройстве, состоящем только из металлических ветвей. Низкая добротность металлических термоэлектрических устройств была обусловлена высокой электропроводностью металлических ветвей, но если металлические спаи разделены полупроводниками р- и n-типа, то это затруднит обратный перенос зарядов и повысит добротность термоэффекта между двумя спаями из различных металлов [4].



а) б)

**Рисунок 2** - Зависимость величины теплопереноса от тока: *а* - в обычном термоэлектрическом насосе, *б* - в нанопленочном термоэлектрическом насосе

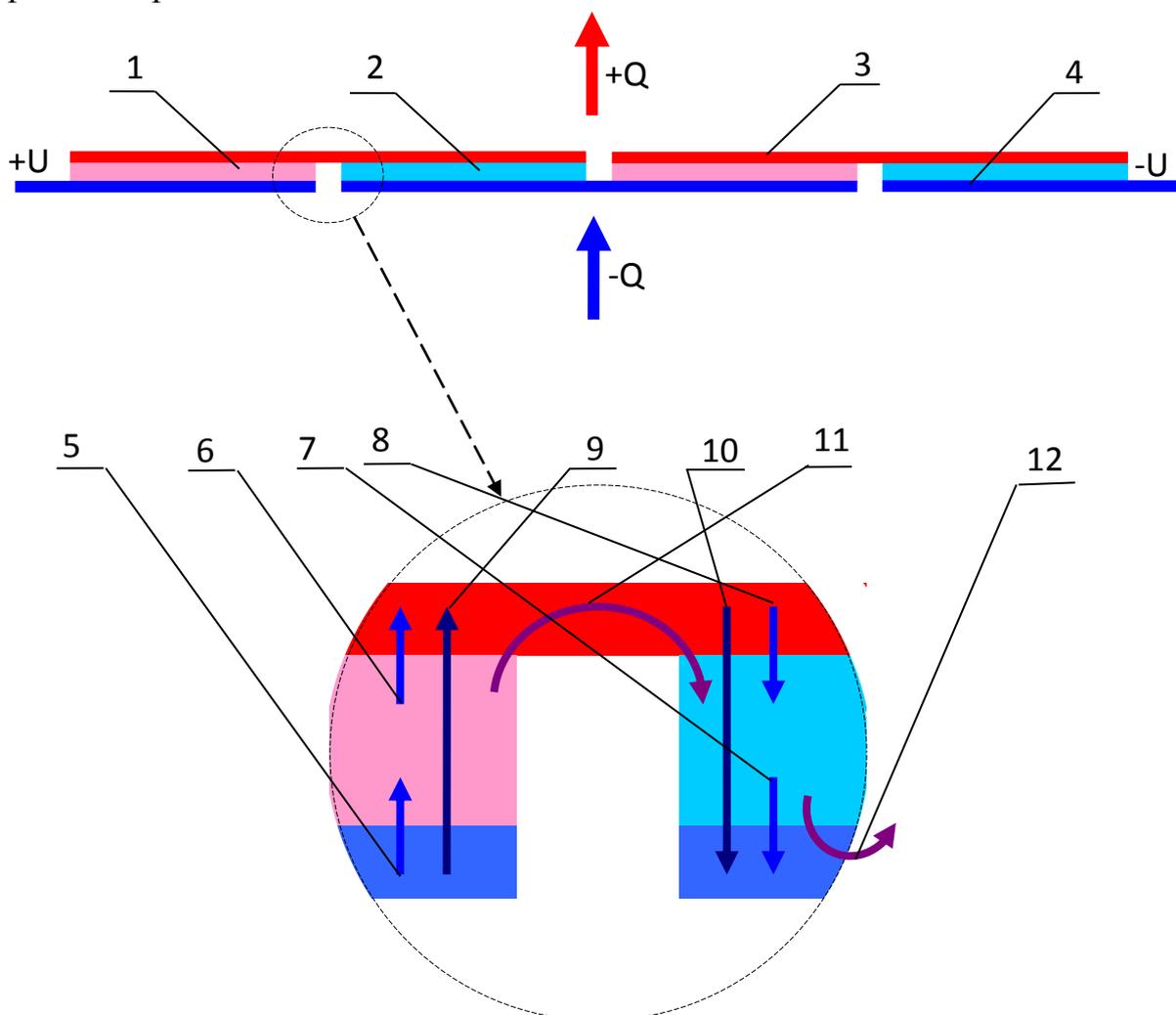
При выборе термоэлектрических характеристик металлов для спаев целесообразно также учитывать термоэлектрические явления на границе металлических спаев и полупроводниковых ветвей р- и n-типа.

Таким образом, в одном тепловом насосе будут одновременно присутствовать термоэлектрические эффекты для контакта полупроводников р- и n-типа, контакта двух металлов и контакта металлов с полупроводниками р- и n-типа. На рис. 2,а приведены графики зависимости величины теплопереноса от тока для обычного термоэлектрического теплового насоса, а на рис. 2,б - нанопленочного термоэлектрического теплового насоса.

На рис. 2,*а* парабола 1 соответствует джоулевым тепловыделениям на охлаждающем спае, линия 2 соответствует охлаждающему эффекту Пельтье, а зависимость 3 соответствует результирующему теплопереносу. На горячем спае и джоулевы тепловыделения, и нагревающий эффект Пельтье нейтрализуются теплоотводом.

На рис. 2,*б* парабола асимптотически стремится к оси абсцисс за счет практически нулевого сопротивления полупроводниковых ветвей и отсутствия джоулевых тепловыделений. Прямая 1 соответствует интегральной совокупности прямых 2, 3 и 4, которые, в свою очередь, соответствуют нагревающему эффекту Пельтье для переходов металл-полупроводник, металл-металл и полупроводник (р-типа) – полупроводник (n-типа). За счет теплоотвода эти значения практически не повлияют на охлаждающий спай, обозначенный на графике как прямая 8, что соответствует интегральной совокупности прямых 5, 6 и 7, аналогичных пар для охлаждающего эффекта Пельтье.

На рис. 3 представлена структура нанопленочного термоэлектрического теплового насоса.



**Рисунок 3** - Структура нанопленочного термоэлектрического теплового насоса.

Структура нанопленочного термоэлектрического теплового насоса представляет собой полупроводниковые ветви р-типа 1 и n-типа 2, а также металлические спаи 3 и 4, состоящие из двух металлов с различными термоэлектрическими характеристиками. Причем металлический спай 3 имеет полную энергию зарядов, меньшую, чем в полупроводниках р- и n-типа, а металлический спай 4 имеет полную энергию зарядов, большую, чем в полупроводнике n-типа, но меньшую, чем в полупроводнике р-типа.

Это позволяет при прохождении зарядов 5 от металлического спае 4 к полупроводнику р-типа получить охлаждающий термоэффект за счет изменения полной энергии зарядов в большую сторону. При прохождении зарядов 6 от полупроводника р-типа к металлическому спае 3 возникает нагревающий термоэффект за счет изменения полной энергии зарядов в меньшую сторону. При прохождении зарядов 7 от полупроводника n-типа к металлическому спае 4 возникает охлаждающий термоэффект за счет изменения полной энергии зарядов в большую сторону. При прохождении зарядов 8 от металлического спае 3 к полупроводнику n-типа возникает охлаждающий термоэффект за счет изменения полной энергии зарядов в большую сторону.

Заряды 9 проникают без взаимодействия с полупроводниковой ветвью р-типа от 4 металлического спае к 3 и создают нагревающий термоэффект за счет изменения полной энергии зарядов в меньшую сторону, так как в металлическом спае 3 энергия электронов больше, чем в металлическом спае 4. Заряды 10 проникают без взаимодействия с полупроводниковой ветвью n-типа от металлического спае 3 к 4 и создают охлаждающий термоэффект за счет изменения полной энергии зарядов в большую сторону, так как в металлическом спае 4 энергия электронов меньше, чем в металлическом спае 3.

Заряды 11 проникают через металлический спай 3 от полупроводника р-типа к n-типу, создавая нагревающий термоэффект. Заряды 12 проникают через металлический спай 4 от полупроводника n-типа к р-типу, создавая охлаждающий термоэффект.

Таким образом, заряды 5, 7, 8, 10 и 12 интегрально создают охлаждающий термоэффект, как с одной, так и с другой стороны теплового насоса, что при незначительной толщине нанопленки позволяет эффективно тепловому насосу отводить энергию от объекта охлаждения за счет кондукции. Заряды 6, 9 и 11 создают нагревающий термоэффект со стороны металлического спае 3, что позволяет с высокой эффективностью отвести тепловую энергию при помощи кондукции или конвекции с применением охлаждающих жидкостей или газов.

Использование представленного устройства позволит создать тепловые насосы большей эффективности при малых габаритах, причем перспективным направлением является создание многослойных тепловых насосов, состоящих из нескольких каскадов.

**Библиографический список:**

1. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
2. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. - Москва: «Академия», 2012. – 136 с.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А. Математическая модель биметаллических электродов в полупроводниковых приборах для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов/ Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - Махачкала: ФГБОУ ВПО ДГТУ, 2012. - №3. – с.16-23.
4. Патент РФ №2449417. Способ охлаждения полупроводниковых тепловыделяющих электронных компонентов через биметаллические термоэлектрические электроды/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.
5. Патент РФ №2369894. Термоэлектрическое устройство термостабилизации компонентов вычислительных систем с высокими тепловыделениями/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д.
6. Патент РФ, № 2360380. Устройство для термостатирования компьютерного процессора/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д.
7. Патент РФ №2208830. Терморегулирующее устройство для обеспечения минимальных тепловых напряжений в режимах включения и выключения ЭВМ/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д.
8. Патент РФ №2335825. Термоэлектрическое устройство с высоким градиентом температур/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М.
9. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Применение многокаскадных термоэлектрических модулей для охлаждения процессора компьютера/ Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2004. Т. 47 - №7. – с.25-29.