

УДК 621.391

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА НАДЕЖНОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРИБОРОВ

А. АТАЕВ

Туркменский государственный институт транспорта и связи  
Махтымкули, 68, Ашгабат, 744000, Туркменистан

Поступила в редакцию 21 сентября 2016

Предложены системы охлаждения полупроводниковых интегральных схем с высокой степенью интеграции и микроэлектронных схем с высокой плотностью выделяемой тепловой мощности на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб.

*Ключевые слова:* тепловой режим, интегральная схема, электронный прибор, система охлаждения.

### Надежность электронных приборов

Под надежностью подразумевается свойство электронных приборов сохранять во времени значения всех параметров и выполнять требуемые функции в заданных условиях применения [1]. Надежность является составным понятием. Оно может включать в себя понятия безотказности, долговечности и сохраняемости. В электронной технике для количественной оценки надежности чаще всего используется параметр «интенсивность отказов» [1]:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{n(t)} \cdot \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{1}{n(t)} \cdot \frac{dn(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $n(t)$  и  $n(t + \Delta t)$  – количество годных приборов в моменты времени  $t$  и  $(t + \Delta t)$  соответственно. Следовательно, разность  $n(t) - n(t + \Delta t)$  характеризует количество приборов, вышедших из строя в процессе испытаний на надежность за промежуток времени  $\Delta t$ .

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  быстро уменьшается в начале эксплуатации приборов (период приработки), затем длительное время остается постоянной  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  и после исчерпания срока службы резко возрастает [2].

Одним из основных факторов, отрицательно влияющих на надежности приборов, является температура. Это хорошо согласуется с физической теорией надежности, согласно которой эксплуатация любого технического устройства является необратимым процессом. Из-за наличия различного рода дефектов, образовавшихся на пути от исходного сырья до готового изделия, любое внешнее воздействие (электрическое, магнитное, тепловое, механическое и т.д.) вызывает ответную реакцию, которая сопровождается необратимым переходом всего объекта в иное предельное состояние (ухудшение выходных параметров или отказ). В соответствии с принципами термодинамики, такой переход связан с преобразованием энергии активации дефектов, средняя скорость рассеяния которой определяется соотношением Аррениуса [2]:

$$V = a \frac{kT}{h} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $a$  – масштабный коэффициент;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $h$  – постоянная Планка;  $\Delta W$  – энергия активации процесса.

Исходя из этого, время, протекающее от начала эксплуатации до разрушения или достижения иного предельного состояния любого технического объекта, должно удовлетворять условию [2]:

$$t = \tau_0 \exp\left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta W_i}{T_i}\right), \quad (3)$$

где  $\tau_0$  – масштаб времени;  $\Delta W_i$  – величина активационного барьера или запас энергии до разрушения  $i$ -й области;  $T_i$  – ее температура.

Величина активационного барьера  $\Delta W_i$  может иметь различную природу. В связи с этим, для конкретного прибора динамика процессов разрушения различных областей может отличаться на несколько порядков. Поскольку определяющее значение имеет ресурс наиболее теплонапряженной области, то уравнение (1) можно свести к выражению [3]:

$$t = \tau_0 \exp\left(\frac{b}{T}\right), \quad (4)$$

где  $b$  – некоторый постоянный коэффициент, величина которого устанавливается путем статистической обработки опытных данных.

Справедливость выражения (4) хорошо подтверждается многими экспериментальными исследованиями по долговечности различных радиотехнических устройств [3].

Основным источником проблем, связанных с обеспечением высокой надежности радиоэлектронного оборудования, является внутренний фактор. Из анализа энергетических показателей электронной аппаратуры [4] следует, что в среднем только 5÷10 % подводимой мощности отводится в виде полезных сигналов. Остальная мощность рассеивается в виде тепла. Поэтому важно, чтобы тепловой режим работы приборов и оборудования соответствовал тем условиям, на которые они рассчитаны. Так, например, невыполнение этих условий для электровакуумных приборов вызывает интенсивное газоотделение с анода, «отравляющее» катод.

Превышение температуры сеточного блока электронных ламп приводит к возникновению остаточных деформаций в витках и траверсах и, как следствие, к изменению формы блока с нарушением условий формирования электронного потока [4]. Перегрев катода вызывает интенсивное испарение оксидного покрытия, что, в свою очередь, приводит к снижению электрической прочности прибора и увеличивает термоэмиссионную составляющую обратного тока [5]. Не менее жестким тепловым режимом характеризуется работа СВЧ-приборов [6]. В частности долговечности ЛБВ ограничена несколькими тысячами часов, что обусловлено расплавлением спирали, а также напылением ее материала на керамические стержни при перегреве [7].

В газоразрядных приборах нарушение теплового режима водородного генератора сопровождается изменением рабочего давления газа. Это ухудшает стабильность управления разрядом, снижает электрическую прочность прибора и в отдельных случаях приводит к росту мощности, выделяющейся на его электродах [8].

Неравномерное распределение температуры по элементам электронных приборов может вызывать значительное отклонение важных геометрических размеров. В ряде случаев эта проблема представляет собой сложную задачу, как, например, при разработке электронных пушек, фокусирующих систем и резонаторов оптических квантовых генераторов [6, 9, 10].

Что касается дискретных полупроводниковых приборов, то их тепловой режим лимитируется не только свойствами полупроводниковых структур, но и температурой плавления припоев, применяемых при их изготовлении [6]. Тем не менее, основным результатом воздействия повышенных температур является тепловой пробой  $p$ - $n$ -переходов [8]. В случае интегральных микросхем и процессоров помимо теплового пробоя  $p$ - $n$ -переходов, среди возможных результатов воздействия повышенных температур,

отмечаются также пробой диэлектриков тонкопленочных конденсаторов, нестабильность и деградация электрических параметров, обрывы и короткие замыкания металлизации [8].

В целом же, применение полупроводниковых приборов значительно улучшает энергетические соотношения в радиоаппаратуре малой мощности [5], однако для них свойственна более сильная зависимость выходных параметров от температуры [7–11].

### **Современное состояние проблемы надежности электронных приборов**

Современное развитие электроники направлено на миниатюризацию электронных схем за счет увеличения вычислительных мощностей на единицу объема. Эта тенденция основывается на увеличении степени интеграции, что в свою очередь неизбежно приводит к увеличению плотности выделяемой тепловой мощности и, как следствие, к проблемам отвода тепла.

Мировой лидер по производству процессоров компания Intel в 2015 году выпустила в продажу процессор Core i7-6700K, основанный на 14 нм техпроцессе. Исследования по изучению характеристик процессора показали значительное увеличение выделяемой плотности теплового потока в сравнении с предыдущими версиями процессоров [12]. При площади процессора 14 см<sup>2</sup> выделяемая тепловая мощность равна 91 Вт. В соответствии с планами Intel во втором полугодие 2017 г. ожидается выпуск процессора, основанного на 10 нм технологическом процессе. Учитывая устоявшееся соотношение вычислительной мощности на потребляемую, предполагается увеличение тепловыделения ожидаемого процессора. Это подтверждает актуальность проводимых исследований, направленных на разработку новых, высокоэффективных систем охлаждения микроэлектронных приборов.

В настоящее время в плане повышения надежности работы и стабильности выходных параметров электронных приборов большое внимание уделяется не только совершенствованию традиционных способов охлаждения, но и поиску новых технических решений, обеспечивающих отвод и эффективное рассеяние тепловой энергии при минимальных энергетических и масса-габаритных показателях устройств в целом.

В последние годы широкое использование получили системы жидкостного охлаждения электронных приборов, в том числе процессоров. Наряду с жидкостным охлаждением все большую актуальность приобретают тепловые трубы как высокоэффективный способ терморегулирования электронных приборов [12]. Не смотря на то, что этим вопросам посвящено большое количество работ, следует отметить, что в этой области еще много не изученных аспектов. Это дает возможность предполагать о не полном использовании потенциала жидкостного охлаждения и охлаждения тепловыми трубами электронных схем. В частности, для жидкостных систем охлаждения не решенным остается вопрос оптимизации параметров с целью использования этого способа для поддержания температурных норм сверхбольших интегральных схем (СБИС) с высокой степенью интеграции. В целом же этот подход ограничен отсутствием критериальных уравнений, описывающих теплоотдачу при граничных условиях и форме каналов, аналогичных принятым в проектируемой системе.

Использование тепловых труб как высокоэффективных теплопередающих элементов ограничено тем, что современные микроэлектронные схемы содержат в себе большое количество тепловыделяющих элементов, разнесенных в пространстве. Следовательно, для проектирования систем охлаждения на основе тепловых труб для таких микроэлектронных схем приходится рассчитывать параметры тепловых труб для каждого отдельного тепловыделяющего элемента схемы. Применение такой системы охлаждения, сконструированной подобным методом, отрицательно сказывается на масса-габаритных показателях системы в целом.

### **Комбинированная система охлаждения на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб**

Для решения рассмотренных выше проблем разработана комбинированная система охлаждения СБИС на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб [13].

Техническая задача создания способа охлаждения заключается в создании пассивной (без энергопотребления) системы охлаждения для поддержания температурных норм полупроводниковых интегральных схем с высокой степенью интеграции. Как пример реализации данного способа создана система охлаждения (система жидкостного охлаждения на основе тепловых трубок) и математическая модель, позволяющая проектировать данную

систему для интегральных схем с различными техническими параметрами. Экспериментальным методом доказано, что данная система способна поддерживать температурные нормы интегральных схем без энергопотребления.

Разработанный способ охлаждения (способ жидкостного охлаждения на основе тепловых трубок) реализован в виде резервуара (рис. 1) с внешним радиатором (1), наполненного диэлектрической жидкостью (3) (количество жидкости рассчитывается по созданной математической модели), в которую помещается вся охлаждаемая СБИС. В резервуар опускается испарительная зона тепловых трубок (2) (количество и технические параметры тепловых трубок рассчитываются по созданной математической модели). Диэлектрическая жидкость на основе конвекции устраняет температурный дисбаланс между элементами интегральной схемы и служит тепловым проводником между нагреваемыми элементами платы и тепловыми трубками, что позволяет при проектировании тепловых труб рассматривать все тепловыделяющие элементы как общий источник тепла. В резервуар с диэлектрической жидкостью размещается СБИС. Затем в этот же резервуар в вертикальном положении опускаются испарители тепловых трубок, конденсационная зона которых выходит за область резервуара. К этой части для лучшей теплоотдачи приспособлены радиаторы. Процесс охлаждения проходит следующим образом. Нагреваясь, СБИС отдает тепло жидкости, которая выравнивает температуру во всем объеме и нагревает дно тепловой трубки. Рабочая жидкость внутри тепловой трубки испаряется и конденсируется на ее вершине, после чего охлажденный конденсат стекает обратно, тем самым охлаждая систему.

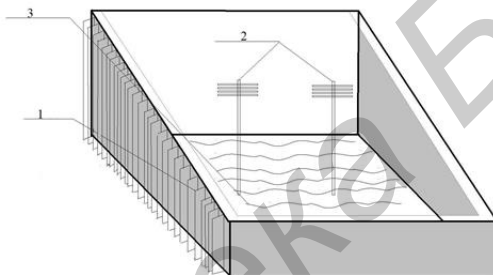


Рис. 1. Пассивная система охлаждения на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб

Разработанная система охлаждения была спроектирована и применена на персональном компьютере «OPTIPLEX GX520» компании Dell (рис. 2). Технические характеристики персонального компьютера «OPTIPLEX GX520»: процессор Intel(R) Pentium (R) D, CPU 2.0GHz, 1,038,412KB RAM. Процессор разработан на 92 нм. техпроцессе; площадь процессора: 12,5 см<sup>2</sup>; максимально допустимая температура процессора  $T_{max} = 60$  °C. Характеристики системы охлаждения (промышленная система): размер радиатора: 125×110×80 мм; материал радиатора: алюминий; диаметр лопастей вентилятора: 125 мм; расходуемая энергомощность: 19,2 Вт. Размер системного блока: 430×405×190 мм. Размер материнской платы: 265×270×40 мм. Тепловые характеристики: материнская плата – 20 Вт; видеокарта – 40 Вт; процессор – 130 Вт; оперативная память – 15 Вт. Суммарная мощность – 205 Вт.

Технические характеристики разработанной системы охлаждения (высокоэффективная система жидкостного охлаждения на основе тепловых трубок) для персонального компьютера «OPTIPLEX GX520»: материал резервуара – алюминий (размер: 270×272×45 мм); количество диэлектрической жидкости, залитой в систему – 0,75 л. Параметры тепловых трубок: количество – 2 шт; материал – медь; высота – 15 см; диаметр внешний – 10 мм; диаметр внутренний – 9 мм; количество радиаторных ребер – 7; диаметр радиаторных ребер – 70 мм; рабочая жидкость – вода; термическое сопротивление – 0,09 К/Вт.

Эксперимент проводился в следующей последовательности: предварительно с помощью программного обеспечения «Spedd Fan 4.43» была зафиксирована температура процессора персонального компьютера с заводской системой охлаждения (см. выше технические характеристики) «OPTIPLEX GX520» при минимальных и максимальных вычислительных нагрузках, которая составила 64 °C. В этой же последовательности эксперимент был проведен с применением спроектированной системой охлаждения, в этом случае температура процессора при максимальных нагрузках составила 52 °C. Проведенный эксперимент показал что спроектированная система охлаждения превосходит общепринятую систему охлаждения (таблица).



Рис. 2. Разработанная система охлаждения персонального компьютера на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб

#### Результаты эксперимента

Характеристики	Промышленная система охлаждения	Разработанная система охлаждения
Температура процессора без вычислительной нагрузки (температура в помещении 26 °С)	46 °С	37 °С
Температура процессора с максимальной вычислительной нагрузкой (температура в помещении 26 °С)	64 °С	52 °С
Средняя производительность процессора (benchmark)	1700	1900
Потребляемая мощность системой охлаждения	19,2	–
Размеры корпуса системного блока	430×405×190 мм	270×272×45мм
Шум производимый системой охлаждения, дБ	34	–

Полученные экспериментальным путем данные подтвердили высокую эффективность предлагаемой системы охлаждения. Разработанная система охлаждения превосходит стандартную промышленную систему охлаждения (радиатор с вентилятором) в среднем на 10 °С. При этом система не потребляет электроэнергию, бесшумна, позволяет уменьшить габариты устройства. Для высокоэффективного охлаждения микросхем с высокой (< 150 Вт/см<sup>2</sup>) плотностью выделяемой тепловой мощности представляет интерес метод охлаждения микросхем на основе испарения в вакуумной среде [14]. Цель создания данного способа охлаждения заключается в поддержании температурных норм полупроводниковых интегральных схем с высокой степенью интеграции. Способ относится к области электроники, в частности к охлаждению теплонапряженных компонентов электронных приборов, включая компьютеры, а также к области теплотехники, в частности к тепловым трубам. Технический результат – повышение эффективности системы охлаждения за счет снижения термического сопротивления ее элементов при уменьшении ее массогабаритных размеров. Он достигается тем, что охлаждаемая микросхемная схема или ее отдельные сильно нагреваемые элементы размещаются в вакуумном корпусе, содержащем испаряемую жидкость. Верхняя часть корпуса является зоной конденсации и оснащается радиатором, выполненным в виде оребрения. Рабочая жидкость, используемая в корпусе, диэлектрическая. Способ охлаждения микросхемных схем (рис. 3) работает следующим образом. Тепловыделяющий элемент микросхемы (или вся микросхема) (2), размещенная в вакуумном корпусе (1), нагреваясь, отдает тепло рабочей жидкости (3), которая испаряется и конденсируется в конденсационной зоне (4), радиаторы в виде оребрения обеспечивают рассеивание тепла во внешнюю среду путем естественной конвекции.

Разработана математическая модель, позволяющая проектировать данную систему для интегральных схем с различными техническими параметрами. Экспериментально доказано, что данная система способна поддерживать температурные нормы интегральных схем без энергопотребления [14]. На основе статистических данных, полученных в результате многократных экспериментов, доказано эффективное воздействие рассмотренных систем охлаждения [13, 14] на надежность микросхемных схем по показателям (1)–(4).

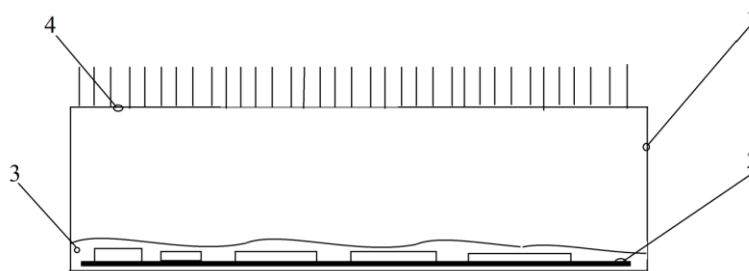


Рис. 3. Система охлаждения на основе испарения в вакуумной среде

### Заключение

Разработаны системы охлаждения полупроводниковых интегральных схем с высокой степенью интеграции и микросхем с высокой (< 150 Вт/см<sup>2</sup>) плотностью выделяемой тепловой мощности на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб. Системы обеспечивают высокую эффективность охлаждения за счет снижения термического сопротивления элементов системы охлаждения при уменьшении ее массогабаритных размеров. Экспериментально доказано, что разработанные пассивные системы охлаждения способны поддерживать температурные нормы микросхем с высокой степенью интеграции.

## INFLUENCE OF THERMAL CONDITIONS ON THE RELIABILITY AND PARAMETERS OF DEVICES

A. ATAEV

### Abstract

The cooling systems for semiconductor integrated circuits with high degree of integration of microelectronic circuits and electronic devices with high density thermal power based on dielectric fluid and heat pipes are proposed.

*Keywords:* thermal mode, integrated circuit, electronic device, cooling system.

### Список литературы

- ГОСТ 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения.
- Жарких А.П. // Диагностические методы оценки качества и надежности полупроводниковых приборов с использованием низкочастотного шума: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Воронеж, 2005.
- Шехмейстер Е.И. Технология производства электровакуумных и полупроводниковых приборов. М., 1992.
- Савенченко В.П. Методы и модели исследования остаточного ресурса изделий радиоэлектронной техники: Дис. ... докт. техн. наук. Фрязино, 1999.
- Алямовский А.А. Инженерные расчеты в Solidworks Simulation. М., 2010.
- Улитенко А.И., Прадед В.В., Пушкин В.А. // ПТЭ. 2003. № 5. С. 156–159.
- Улитенко А.И., Прадед В.В., Пушкин В.А. // Холодильная техника, 2003, № 11. С. 14–16.
- Улитенко А.И. // Электроника. Межвуз. сб. науч. трудов. Рязань, 2003. С. 15–16.
- Ткаченко Ф.А. Электронные приборы. М., 2011.
- Прадед В.В., Пушкин В.А. // ПТЭ. 2003. № 5. С. 156–159.
- Обзор процессоров Intel Core 6-го поколения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intel.ru/content/www/ru/ru/pc-upgrades/6th-gen-core-processor-family.html>. – Дата доступа: 21.09.2016.
- Electronics-review. Система водяного охлаждения компьютера. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electronics-review.ru/sistema-vodyanogo-oxlazhdeniya-kompyutera>. – Дата доступа: 21.09.2016.
- Аширбаев М.Х., Кулиев Н.А., Атаев А.М. Охлаждающее устройство на основе диэлектрической жидкости и тепловых труб / Патент Республики Туркменистан № 562.
- Аширбаев М.Х., Кулиев Н.А., Атаев А.М. Способ охлаждения микросхем на основе испарения в вакуумных средах / Патент Республики Туркменистан № 630.