

Література

1. Лунтовский А.О. Основы проектирования и оптимизации беспроводных сетей // Монография. – К.: ДУИКТ, 2010. – 202 с.
2. J. Grönkvist, A. Hansson and J. Nilsson, A Comparison of Access Methods for Multi-hop Ad Hoc Radio Networks, Proceedings of the 51st IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1435-1439, 2000.

Abstract

The modern tendencies of telecommunications development are connected with the appearance of the new services, which are more particular to the wireless dynamic systems characteristics. However, network resources could not keep pace with telecommunications. The channel resource optimization of ad-hoc networks was given little attention. This article analyses the shortest route approach for the first time. It is used to solve the problems of the optimization. The linear programming approach with the column method is suggested to determine the necessary transmission group, which helps to determine upper and lower limits of the optimal solution. The article suggests two ways of solution of the stated problems. The first way is based on the approximation method, and the second represents the iteration algorithm

Keywords: *wireless dynamic system, communication unit, time interval, iteration*

Основною метою роботи є поповнення арсеналу елементної бази термоелектрики елементами, які раніше були невідомі, з одного боку, а з іншого - вивчення фізичних процесів, що протікають у відомих термоелементах при граничних умовах, які раніше не використовувалися

Ключові слова: термоелементи, фізичні процеси, розподіл температури, термо-ЕРС

Основной целью работы является пополнение арсенала элементной базы термоэлектричества элементами, которые ранее были неизвестны, с одной стороны, а с другой – изучение физических процессов, протекающих в известных термоэлементах при граничных условиях, которые ранее не использовались

Ключевые слова: термоэлементы, физические процессы, распределение температуры, термо-ЭДС

УДК 62-714.9:537.322

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

О.Г. Даналакий

Соискатель

Кафедра информационных систем

Черновицкий факультет

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Головная, 203А, г. Черновцы, Украина, 58018

Контактный тел.: 066-793-21-32

E-mail: OGDanalaki@gmail.com

Актуальность темы

Обзор литературы по энергосберегающим технологиям и оборудованию показывает, что на сегодняшний день в этой области накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, разработано и внедрено большое количество разнообразных аппаратов, устройств и приборов. Показано, что наиболее целесообразно применение термоэлектрических способов охлаждения [1].

Однако следует отметить, что недостаточно рассмотрены вопросы, касающиеся возможности эффективного применения охлаждающих термоэлектрических устройств для новых полупроводниковых материалов, успешно применяемых в других полупроводниковых приборах, например, в светодиодах. Для решения указанных задач, не решенных в настоящее время в полной мере, в работе предложена схема охлаждения сверхбольших интегральных схемы (СБИС) на базе охлаждающих биметаллических электродов, выпол-

ненных в едином технологическом процессе при производстве интегральной схемы, причем охлаждающие спаи поглощают тепло непосредственно внутри СБИС в зонах тепловыделения, а выделение тепла происходит во внешних независимых источниках питания, причем работа системы охлаждения как в стационарном, так и в нестационарном режимах практически не создает никаких помех в работе самой СБИС [2].

Для повышения эффективности систем охлаждения полупроводниковых кристаллов целесообразно применить новые методики на основе принципиально новых конструкций электродов в интегральных схемах и охлаждающих модулях.

Суть предлагаемой методики охлаждения состоит в том, что нагретый кристалл полупроводникового прибора будет охлаждаться при помощи дополнительного поглощения тепла в виде биметаллического электрода, причем через электрод протекает ток из дополнительного источника питания от одного металла к другому таким образом, что спай биметаллического электрода, находящийся в электрическом и кондуктивном контакте с нагретым полупроводниковым кристаллом, будет охлаждаться и отбирать тепло непосредственно от нагретой зоны наружу в источник питания. При такой методике охлаждения можно эффективно управлять процессом теплопереноса с малой инерционностью [3]. В современных сверхбольших интегральных схемах каждый переключающий элемент на основе полупроводниковых приборов обладает металлическими выводами, и если их заменить на биметаллические, то от каждого работающего или не работающего транзистора можно отвести часть тепла, что повышает быстродействие процессов теплопереноса, уменьшает количество тепловых барьеров, а также позволяет в широких пределах осуществить регулирование процесса охлаждения за счет изменения величины тока в биметаллических электродах. Таким образом, тепло изнутри СБИС от участков кристалла критичных к высоким температурам и термическим ударам будет перенесено электронами во внешний источник питания практически не критичный к увеличению тепловых нагрузок.

С учетом проведенного обзора сформулирована цель работы.

Целью работы является разработка и исследование охлаждающих ТЭУ для современных сверхбольших интегральных схем.

В соответствии с целью исследования в работе поставлены и решены следующие задачи:

Разработка математических моделей (ММ) биметаллических электродов в полупроводниковых приборах для термоэлектрического охлаждения.

Предметом исследования являются энергосберегающие технологии и электрофизические процессы, происходящие в охлаждающих ТЭУ в стационарных и нестационарных режимах работы.

Математические модели термоэлектрических полупроводниковых устройств, функционирующих в стационарных режимах

Рассмотрим ММ охлаждающих биметаллических электродов СБИС для излучающих ТЭУ.

Одним из достоинств термоэлектрического охлаждения является независимость эффективности процессов от масштабного фактора. Поэтому величина холодильного коэффициента термоэлектрического холодильника может быть получена при рассмотрении единичного биметаллического термоэлемента, т.е. простой пары разнородных проводников. Ток I проходит через термоэлемент, один из спаев которого находится в контакте с тепловой нагрузкой, а с другого отводится тепло [4]. Биметаллический термоэлемент должен состоять из проводников, имеющих соответственно положительный и отрицательный абсолютные коэффициенты Зеебека. Температура холодного спаи уменьшается по сравнению с температурой горячего спаи на величину ΔT . Полное сопротивление R охлаждающего биметаллического термоэлемента:

$$R = \frac{l_1}{S_1 \sigma_1} + \frac{l_2}{S_2 \sigma_2}, \quad (1)$$

где l означает длину, S – площадь поперечного сечения и σ – электропроводность ветвей охлаждающего биметаллического термоэлемента. Общая теплопроводность K двух параллельных ветвей термоэлемента

$$K = \frac{S_1 k_1}{l_1} + \frac{S_2 k_2}{l_2}, \quad (2)$$

где k – удельная теплопроводность. Величина охлаждения на холодном спае в результате эффекта Пельтье равна $\pi_{21} I$. Из первого соотношения Томсона она равна $\alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I$, где α_{21} – дифференциальная термо-э.д.с., T_M – средняя абсолютная температура. Эффекту охлаждения препятствует Джоулево тепло (для металлических выводов оно незначительно) в ветвях и тепло, подводимое от горячего спаи (спай расположен вне БИС внутри независимых источников питания). Половина всего Джоулева тепла переходит к каждому из спаев. Количество тепла (пренебрежем Джоулевым теплом), поглощаемого холодным спаем от источника в единицу времени, равно

$$Q = \alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - K \Delta T. \quad (3)$$

Эффектом Томсона можно пренебречь.

Часть разности потенциалов, приложенной к биметаллическому термоэлементу, приходится на сопротивление ветвей, а часть компенсируется напряжением, возникающим в результате наличия разности температур между спаи, в соответствии с эффектом Зеебека.

Итак, мощность W , потребляемая термоэлементом, равна

$$W = \alpha_{21} \Delta T \cdot I. \quad (4)$$

Характеристика эффективности охлаждающего ТЭУ определяется как соотношение $\frac{Q}{W}$. Следовательно,

$$\phi = \frac{\alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - K \Delta T}{\alpha_{21} \Delta T} \tag{5}$$

Для данной пары термоэлектрических материалов холодильный коэффициент охлаждающего биметаллического термоэлемента является функцией тока I, а также сопротивления R и теплопроводности K. Однако, две последние величины не являются независимыми, они весьма просто связаны через размеры элементов.

Для заданной холодопроизводительности отношение длины к площади поперечного сечения элемента должно возрасти с ростом электропроводности. ϕ достигает максимума, когда размеры элементов подчиняются следующему соотношению:

$$\frac{l_1 S_2}{l_2 S_1} = \left(\frac{\sigma_1 k_1}{\sigma_2 k_2} \right)^{1/2} \tag{6}$$

Тогда

$$KR = \left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2 \tag{7}$$

$$\phi = \frac{\alpha_{21} \left(T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) (IR) - \Delta T \left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2}{\alpha_{21} \Delta T (IR)} \tag{8}$$

Дифференцированием ϕ можно найти оптимальный ток для заданной разности температур

$$(IR)_{opt} = \frac{\alpha_{21} \Delta T}{\sqrt{1 + Z T_M} - 1} \quad \text{где: } Z = \frac{\alpha_{21}^2}{\left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2} \tag{9}$$

Подставляя оптимальную величину из выражения (6) в уравнение (7), находим, что максимальная характеристика эффективности выражается как

$$\phi_{\text{макс}} = \frac{T_M \left(\sqrt{1 + Z T_M} - 1 \right)}{\Delta T \left(\sqrt{1 + Z T_M} + 1 \right)} - \frac{1}{2} \tag{10}$$

Очевидно, когда заданы величины T_M и ΔT , характеристика эффективности возрастает с увеличением Z. Поэтому Z является критерием эффективности или добротности для биметаллического термоэлемента [5].

Следует заметить, что когда Z стремится к бесконечности, то величина ϕ , получающаяся из уравнения (10), приближается к $(T_M - \Delta T/2)/\Delta T$. Уравнение (10) может быть использовано для определения максимального значения разности температур на охлаждающем биметаллическом термоэлементе, находящемся в адиабатическом режиме.

Рис. 1 показывает, как изменяется величина холодильного коэффициента в зависимости от разности температур для возможного диапазона изменения величины Z.

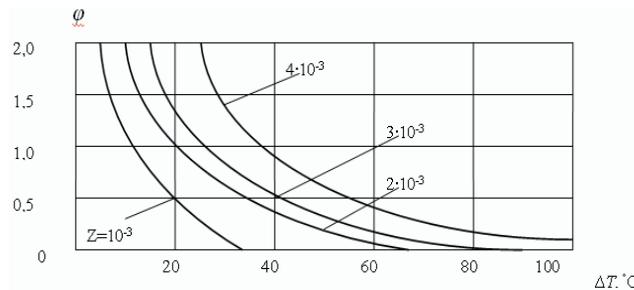


Рис. 1. Зависимость холодильного коэффициента биметаллического ТЭУ от разности температур для средней температуры 290°K

Обобщенная тепловая модель охлаждающего ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения, представленная на рис. 2, включает целый ряд практических задач расчета температурных полей в монослойных многослойных светоизлучающих структурах (МСС) [6].

Рассматриваемая область V шириной L и толщиной Δ состоит из n слоев, причем i-й слой характеризуется толщиной δ_i , коэффициентом теплопроводности λ_i . Источниками теплового поля являются внутренние источники теплоты с удельной мощностью q_i и внешние тепловые потоки на поверхности структуры с плотностью Q_i . Модель, изображенная на рис. 3, состоит из однородных параллельных слоев и не содержит аномальных границ раздела сред, так как все границы слоев совпадают с одноименным семейством координатных поверхностей $y = \text{const}$; теплопроводность слоев λ_i не изменяется вдоль указанных границ.

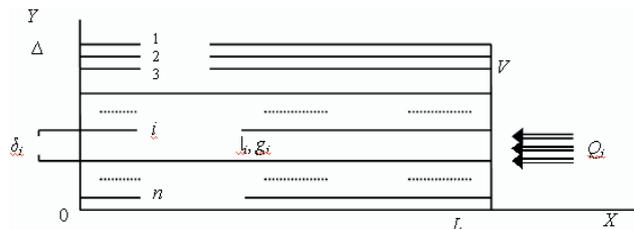


Рис. 2. Обобщенная тепловая модель МСС без аномальных границ раздела сред

В наиболее общем виде температурное поле в МСС, обобщенные тепловые модели ТЭУ, которых представлены на рис. 2, определяется из уравнения теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + q \tag{11}$$

при граничных условиях:

$$T = T_s \text{ на } S_1, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_2, \tag{12}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_0) = 0 \text{ на } S_3 \tag{13}$$

и начальном условии: $T = T^*$ при

$$t = t_0. \tag{14}$$

Кроме этого, температурное поле в МСС удовлетворяет условиям сопряжения на границах раздела слоев i и j :

$$T_i = T_j, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_i} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_j}, \quad (15)$$

где T - температура; ρ - плотность материала; c - теплоемкость; λ - коэффициент теплопроводности; q - удельная мощность источников теплоты, которая считается положительной, если теплота подводится к структуре; Q - поток теплоты на части границы S , который считается положительным, если теплота теряется структурой; α - коэффициент теплообмена с окружающей средой с температурой T_0 ; T_S - температура на части границы S ; T^* - начальное распределение температуры; $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ - полная граница многослойной области V ; n - внешняя нормаль к границе S [7].

Модель (12) - (15) является ММ для расчета температурных полей в МСС ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения. При расчете температурных полей в МСС целесообразно пользоваться частными моделями, соответствующими общей. Отметим также, что в ряде практических случаев на боковых поверхностях тепловых моделей, представленных на рис. 2, имеет место условие адиабатичности.

Поэтому вместо граничного условия (13) можно использовать граничное условие

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (16)$$

Если температурное поле в МСС стационарно, т.е. процесс установившийся, то уравнение (11) преобразуется к виду

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q = 0. \quad (17)$$

В случае, когда теплофизические характеристики являются только функциями декартовых координат, из (18) получаем

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = 0. \quad (18)$$

Это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = 0. \quad (19)$$

Уравнение (19) применяется для решения двумерных задач расчета температурных полей в МСС ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения с плоскостной симметрией при следующих граничных условиях:

$$T = T_S \text{ на } S_1; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_2; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_3 \quad (20)$$

и условиях сопряжения на границе раздела слоев i и j (15).

В основу методики решения краевой задачи (19) - (20), (15) положен метод конечных элементов. Решение этой задачи эквивалентно минимизации функционала

$$F = \int_V \frac{1}{2} \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2qT \right] dV + \int_{S_2} QT dS. \quad (21)$$

Для упрощения дальнейших преобразований введены матрицы

$$[b] = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial S} & \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}^T, \quad [c] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (22)$$

С учетом обозначений (22) функционал (21) после преобразований примет вид:

$$F = \int_V \frac{1}{2} \{ [b]^T [c] [b] - 2qT \} dV + \int_{S_2} QT dS. \quad (23)$$

Область V разбита на непересекающиеся конечные элементы с системой базисных функций N_i , $i=1, 2, 3$. Введем в рассмотрение функции $T^{(i)}$, определенные на отдельных конечных элементах. Элементарный вклад конечного элемента $V^{(i)}$ в общие значения функционала (23) определяется равенством

$$F^{(i)} = \int_{V^{(i)}} \frac{1}{2} [b^{(i)}]^T [c^{(i)}] [b^{(i)}] dV - \int_{V^{(i)}} q^{(i)} T^{(i)} dV + \int_{S_2^{(i)}} Q^{(i)} T^{(i)} dS. \quad (24)$$

С учетом (24) выражение (25) примет вид:

$$F = \sum_{i=1}^N F^{(i)}, \quad (25)$$

где N - общее число элементов, на которые разбита многослойная область V .

Для того чтобы минимизировать функционал F , необходимо продифференцировать выражение (24) по $\{T\}$ и результат приравнять нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial \{T\}} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F^{(i)}}{\partial \{T\}} = 0, \quad (26)$$

где $\{T\}$ - узловые значения искомой функции T . Искомая функция T определена для каждого конечного элемента через базисные функции N_i следующим образом: $T^{(i)} = [N^{(i)}] \{T\}$.

Таким образом,

$$[b] = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial x} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_2^{(i)}}{\partial y} & \frac{\partial N_3^{(i)}}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} = [D^{(i)}] \{T\}. \quad (27)$$

После дифференцирования выражения (25) по $\{T\}$ с учетом выражений (24) и (27) и приравнивания результата нулю получим систему уравнений

$$[G] \{T\} = [F]; \quad [G] = \sum_{i=1}^N [g^{(i)}]; \quad [F] = \sum_{i=1}^N [f^{(i)}];$$

$$F^{(i)} = \int_{V^{(i)}} [D^{(i)}]^T [C^{(i)}] [D^{(i)}] dV;$$

$$[f^{(i)}] = - \int_{V^{(i)}} q^{(i)} [N^{(i)}] dV - \int_{S_2^{(i)}} [N^{(i)}] Q^{(i)} dS. \quad (28)$$

Для учета граничных условий Дирихле (20) систему уравнений (28) преобразуем с помощью метода Джордано-Гаусса.

Расчет проводился для матричного охлаждающего ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения с размером кристалла светодиодной матрицы 7x7 мм и размером кристалла кремниевой интегральной схемы 10x10 мм. Высота полупроводниковых межсоединений составляла 10 мкм при площади их сечений 50x50 мкм. Решалось уравнение теплопроводности (19) с граничными условиями

$$T=77 \text{ К на } S_1; \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + Q = 0 \text{ на } S_4 \text{ и } S_5; \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2, S_3, S_6, \dots, S_k \quad (29)$$

и условиях сопряжения границ раздела слоев i и j (16).

В результате расчетов получены зависимости максимальной температуры рабочего слоя от тепловыделений в кремниевой интегральной схеме, от теплопроводности клея, от теплопритоков через проволочные межсоединения кремниевой интегральной схемы с

выводами корпуса и от рассогласования полупроводниковых столбиков-контактов [8].

Результаты расчетов показали, что рассогласование полупроводниковых столбиков-контактов при сборке гибридных многослойных ТЭУ со стационарным отводом тепла в виде излучения не должно превышать 3 мкм.

Выводы

В процессе решения задач, поставленных в работе, получены следующие результаты:

1. Разработана схема полупроводникового ТЭУ для охлаждения тепловыделяющих компонентов на основе биметаллических электродов СБИС и со стационарным отводом тепла в виде излучения, позволяющие получить конкретные рекомендации по их использованию.

2. Разработано ММ биметаллических электродов СБИС для термоэлектрического охлаждения тепловыделяющих компонентов в МЭТ.

3. Доказана адекватность разработанных ММ экспериментальным путем; сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что их расхождение не превысило допустимых значений.

Литература

1. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц: Пер. с англ.- М.: Мир, 1997. - 385 с.
2. Матієга В. М., Даналакій О. Г. Термоелементи на об'ємних ефектах Пельтьє і Бріджмена // Одеська Державна Академія Холоду Український філіал Міжнародної академії холоду «Холодильна техніка і технологія» Науково – технічний журнал. – 2009. – № 4 (120). – С. 65–68.
3. Goldsmid H. J. Thermomagnetic energy convertors // Electr. Rev. - 2005.- Vol.176 - P. 513 - 518.
4. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления.-М.: Физматгиз, 2003. - Т. 3.- 656 с.
5. Goldsmid H.J. Thermomagnetic energy conversion // G.-E.C. Journal.- 2004.- Vol. 31.- P. 110 - 113.
6. Ленюк М. П., Даналакій О. Г. Математическая модель полупроводникового термоэлектрического устройства для охлаждения компьютерного процессора // «Электронное моделирование» Институт проблем моделирование в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. – 2010. Т. 32. № 3.– С. 53 – 66.
7. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: Пер. с нем.- М.: Наука, 2001. - 576 с.
8. O'Brien B.J., Wallace C.S. Ettingshausen Effect and thermomagnetic cooling // J.Appl. Phys.- 2008. - Vol. 29, № 7.- P. 101 - 112.

Abstract

One of the structural restrictions for the typical thermoelectric devices was the modulus thickness, i. e. spacing between hot and cold junction. When the spacing is small, the conducted heat transfer prevents great temperature drop. When the spacing is big Joule heat release in arms limited the productivity of the thermoelectric device. Suggested radiating thermoelectric device lack such deficiency as there is no hot junction and parasitic conducted heat transfer on the cold junction. Radiating thermoelectric device may be produced as a thin transparent multilayer structure. The usage of few stages at the absence of Joule heat release for the account of ohmic resistance of p-n branches, which look like thin film, allows achieving of extremely low temperatures applied in cryoelectronics. Additional advantage is the maintenance of operability of radiating thermoelectric device even in superconductivity mode, as there is no destabilizing heat release at cooling Peltier effect for the account of various energy levels of electrons in dissimilar materials in superconductivity mode

Keywords: *thermoelements, physical processes, temperature distribution, thermal e.m.f*