

Матюшин В. М., Жавжаров Е. Л.

ВОЗДЕЙСТВИЕ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА НА СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены результаты экспериментального исследования действия атомарного водорода на гетероструктуры на основе Si и Ge. Показано, что обработка сопровождается изменениями вида ВАХ. Доминирующими процессами являются хемосорбция водорода на поверхности, модификация гетерограницы и диффузия атомов пленки в приповерхностные слои полупроводника.

Ключевые слова: тонкие пленки, полупроводник, кремний, атомарный водород, рекомбинация, адгезия, диффузия.

Matyushin V. M., Zhavzharov E. L.

THE INFLUENCE OF ATOMIC HYDROGEN ON METAL-SEMICONDUCTOR STRUCTURES. VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS

The authors present the results of experimental investigation of atomic hydrogen effect on heterostructures based on Si and Ge. It is shown that treatment is accompanied by changes of V-C characteristics. Dominant processes are hydrogen chemisorption on the surface, modification of heteroboundary and diffusion of film atoms in the semiconductor near-surface layers.

Key words: thin films, semiconductor, silicon, atomic hydrogen, recombination, adhesion, diffusion.

УДК 621.396.6.017:004.942

Шило Г. Н.¹, Огренич Е. В.², Филобок А. В.³, Гапоненко Н. П.¹

¹Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

²Аспирант Запорожского национального технического университета

³Студент Запорожского национального технического университета

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕБРИСТЫХ ТЕПЛОТВОДОВ МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ

Сформированы модели элементов конструкций теплоотводов в виде тепловых линий с нагрузкой на конце. Рассмотрены режимы работы тепловых линий. Для теплоотводов минимальной массы получены соотношения, связывающие размеры элементов конструкций с параметрами границ области работоспособности. Анализируется зависимость массы теплоотводов от количества ребер.

Ключевые слова: теплоотвод, тепловая линия, минимальная масса, алгоритм оптимизации, область работоспособности, технологическое ограничение.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой режим теплонагруженных элементов в радиоэлектронной аппаратуре в большинстве случаев обеспечивается применением теплоотводящих устройств или вынужденным охлаждением. Оба эти пути требуют затрат материалов и влияют на массогабаритные показатели радиоаппаратуры. Одним из наиболее распространенных теплоотводящих устройств является радиатор. Существует большое количество конструкций радиаторов [1, 2], что не позволяет в общем виде решить задачу оптимизации их массогабаритных показателей. Исследованы только простые элементы конструкций [3], для которых показана возможность уменьшения массы в несколько раз.

Оптимизация теплоотводящих элементов при использовании комплексных массогабаритных показателей рассмотрена в [4], где показано, что процедура оптимизации в большинстве случаев приводила к увеличению площади, которую занимают теплоотво-

дящие элементы на печатных платах. Уменьшение этой площади осуществляется переходом к пространственным формам теплоотводящих элементов с развитыми поверхностями. Для увеличения площади теплоотвода чаще всего используются ребристые и штыревые элементы. Поскольку параметры этих элементов влияют на процессы отвода тепла конвекцией и излучением, целесообразно провести исследование влияния параметров элементов конструкций теплоотводов на их массогабаритные показатели.

Целью работы является разработка алгоритма проектирования ребристых теплоотводов минимальной массы. Для решения поставленной задачи необходимо:

- сформировать модели процессов теплопередачи в элементах конструкций теплоотводов с ребристыми поверхностями;
- разработать алгоритм оптимизации массы ребристых теплоотводов;

© Шило Г. Н., Огренич Е. В., Филобок А. В., Гапоненко Н. П., 2010

– рассмотреть особенности оптимизации массы теплоотводов при учете технологических ограничений.

1. ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Тепловая модель ребристого теплоотвода показана на рис. 1, где P – тепловой поток, d_r, l_r, d_p, l_p – толщина и длина ребер и участков основания. Теплоотвод имеет одинаковую ширину. Размеры остальных конструктивных элементов отличаются друг от друга.

В общем случае тепловые процессы в таких конструкциях описываются двумерными уравнениями теплопроводности. Но практика проектирования теплоотводов показывает, что обычно выполняется соотношение

$$l_i \gg d_i,$$

где l_i и d_i – длина и толщина i -го ребра и участка основания.

Это позволяет рассматривать процессы теплопередачи в элементах конструкций как одномерные и осуществлять эквивалентные преобразования тепловой модели с использованием выражения для теплового сопротивления теплонагруженного стержня. Процессы теплопередачи в такой тепловой линии будут описываться системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\theta}{dx^2} - b^2\theta &= 0 \\ \frac{d\theta}{dx} &= -\frac{P}{\lambda S} \quad (x=0) \\ \frac{d\theta}{dx} &= -\beta\theta \quad (x=l) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где θ – перепад температур относительно температуры окружающей среды; x – расстояние от начала стержня; b и β – коэффициенты тепловой нагрузки на поверхность тепловой линии и в ее конце; λ – коэффициент теплопроводности материала теплоотвода; S –

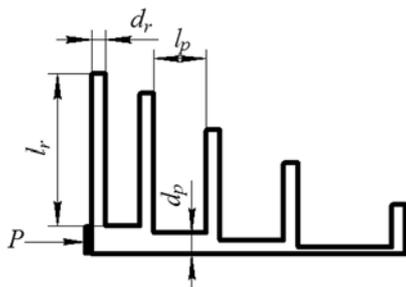


Рис. 1. Теплоотвод с ребристыми поверхностями

площадь поперечного сечения теплопередающего элемента; l – длина ребра или участка основания.

Выражение для коэффициента тепловой нагрузки на поверхность стержня имеет вид [1]

$$b^2 = \frac{\alpha U}{\lambda S},$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплоотвода; U – периметр поперечного сечения теплопередающего элемента.

Коэффициент тепловой нагрузки в конце линии определяется с помощью соотношения

$$\beta = \frac{1}{\lambda S R_H},$$

где R_H – нагрузочное тепловое сопротивление в конце линии.

Нагрузочное тепловое сопротивление рассчитывается как параллельное соединение входных тепловых сопротивлений ребра и следующего участка основания:

$$R_H = \frac{R_r R_p}{R_r + R_p},$$

где R_r и R_p – входное тепловое сопротивление ребра и следующего участка основания.

При расчете коэффициентов тепловой нагрузки в конце участков основания используется выражение для входного теплового сопротивления следующего участка основания, которое находится из решения системы (1):

$$\theta(x) = \frac{P}{\lambda b S} \left[\frac{b \cdot \text{ch}(bl) + \beta \cdot \text{sh}(bl)}{b \cdot \text{sh}(bl) + \beta \cdot \text{ch}(bl)} \text{ch}(bx) - \text{sh}(bx) \right]. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что входное тепловое сопротивление ребер или участков основания может определяться с помощью соотношения

$$R = R_0 \frac{b \cdot \text{ch}(bl) + \beta \cdot \text{sh}(bl)}{b \cdot \text{sh}(bl) + \beta \cdot \text{ch}(bl)}, \quad (3)$$

где $R_0 = 1/\lambda b S$ – характеристическое тепловое сопротивление тепловой линии.

Графики зависимости нормированного теплового сопротивления от нормированной длины тепловой линии bl показаны на рис. 2.

В зависимости от параметров тепловой нагрузки в теплонагруженном стержне могут возникать режимы холостого хода, критический и короткого замыкания. В режиме холостого хода $\beta = 0$, а в конце стержня теплоотвод отсутствует. Выражение (3) в этом случае преобразуется к виду

$$R = R_0 \text{cth}(bl).$$

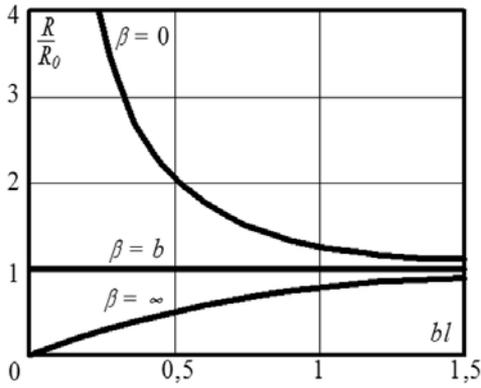


Рис. 2. Влияние тепловой нагрузки на тепловое сопротивление

Это выражение используется при расчете входных тепловых сопротивлений ребер. В режиме короткого замыкания ($\beta \rightarrow \infty$) на конце стержня поддерживается нулевая температура. Этому режиму соответствует входное тепловое сопротивление участка основания:

$$R = R_0 \text{th}(bl).$$

В критическом режиме $\beta = b$ входное тепловое сопротивление стержня не зависит от длины и равно характеристическому сопротивлению R_0 .

При использовании ребристых теплоотводов тепловой режим теплонагруженного стержня характеризуется условием

$$\beta < b, \tag{4}$$

которое необходимо выдерживать при выборе начальных приближений в алгоритме оптимизации.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ МАССЫ ТЕПЛОТВОДОВ

Масса теплоотвода, показанного на рис. 1, определяется с помощью выражения

$$m = \rho L \sum_{i=1}^n (d_{pi} l_{pi} + d_{ri} l_{ri}), \tag{5}$$

где ρ , L и n – плотность материала, ширина и число ребер теплоотвода.

Это соотношение может использоваться как целевая функция при оптимизации массы теплоотвода. Оптимизационная задача решается при ограничении

$$R_T \leq R_{Tb}, \tag{6}$$

где R_b – входное тепловое сопротивление теплоотвода; R_{Tb} – гранично-допустимое входное тепловое сопротивление теплоотвода.

Для ограничения области работоспособности параметры тепловой линии отображаются в область обратных величин:

$$\begin{aligned} d_{pi} &= \frac{1}{x_{1i}}; & l_{pi} &= \frac{1}{x_{2i}}; \\ d_{ri} &= \frac{1}{x_{3i}}; & l_{ri} &= \frac{1}{x_{4i}}. \end{aligned} \tag{7}$$

Преобразование (7) формирует область работоспособности, ограниченную координатными плоскостями и поверхностью (6). Для упрощения процедуры оптимизации выражение (3) заменяется линейной или квадратичной моделями.

Формирование моделей области работоспособности показано на рис. 3, где Ω_w – область работоспособности, B – граничная точка области работоспособности; x_{b1} и x_{b2} – параметры тепловой линии в граничной точке; 1 – граница области работоспособности тепловой линии, 2 и 3 – границы области работоспособности при линейной и квадратичной аппроксимации входного теплового сопротивления.

Исследование показало, что лучшую сходимость итерационных процессов обеспечивает квадратичная модель выходной функции

$$R(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 c_{ij} x_{ij}^2, \tag{8}$$

где $X = \{x_{ij}\}$ – множество геометрических параметров тепловой линии; c_{ij} – коэффициенты модели.

Коэффициенты модели определяются из условия совпадения касательной к функции (3) и эллипсоида (8) [5]. Уравнение касательной к ограничивающей функции формируется из ее линейной модели:

$$R(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_{ij}, \tag{9}$$

где $a_{ij} = \left. \frac{\partial R(X)}{\partial x_{ij}} \right|_{x_b}$ – линейные коэффициенты ограничивающей функции $R(X)$; $X_b = \{x_{bij}\}$ – множе-

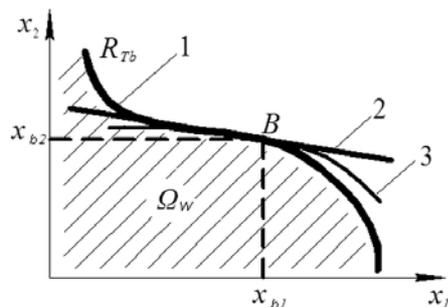


Рис. 3. Формирование области работоспособности

ство параметров элементов, соответствующих граничной точке области работоспособности; $a_0 = R_b - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_{bij}$.

Из выражения (9) формируется уравнение касательной к функции (3) в виде

$$\frac{1}{R_b - a_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_{ij} = 1. \quad (10)$$

Уравнение касательной к эллипсоиду (8) имеет вид

$$\frac{1}{R_b} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 x_{bij} a_{ij} x_{ij} = 1. \quad (11)$$

Сравнение соотношений (10) и (11) позволяет получить выражение для коэффициентов квадратичной модели (8):

$$c_{ij} = \frac{R_b a_{ij}}{R_b - a_0 x_{bij}}. \quad (12)$$

Отображение (7) позволяет записать целевую функцию (5) в виде

$$m(x) = \rho L \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{1i} x_{2i}} + \frac{1}{x_{3i} x_{4i}} \right) \rightarrow \max. \quad (13)$$

Оптимальное значение параметров тепловой линии определяется методом множителей Лагранжа. Для этого из соотношений (8) и (13) составляется вспомогательная функция

$$\Phi(\lambda) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{1i} x_{2i}} + \frac{1}{x_{3i} x_{4i}} \right) + \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 c_{ij} x_{ij}^2, \quad (14)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Оптимальные значения параметров теплоотводов достигаются при соотношениях

$$x_{1i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{2i}}{c_{1i}}}, \quad x_{2i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{1i}}{c_{2i}}}, \quad (15)$$

$$x_{3i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{4i}}{c_{3i}}}, \quad x_{4i} = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{\frac{c_{3i}}{c_{4i}}}, \quad (16)$$

когда множитель Лагранжа принимает значение

$$\lambda = \frac{2}{R_b^2} \left[\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[4]{c_{1i} c_{2i}} + \sqrt[4]{c_{3i} c_{4i}} \right) \right]^2.$$

Поскольку значения коэффициентов в выражениях (15) и (16) зависят от положения граничной точки, то для определения оптимальных размеров теплоотвода с количеством ребер n используется итерационный алгоритм.

Шаг 1. Определяются размеры одиночного ребра минимальной массы [3]:

$$d_m = \frac{0,632}{\alpha \lambda} \left(\frac{1}{LR_b} \right)^2;$$

$$l_m = \frac{0,7875}{\alpha} \frac{1}{LR_b}.$$

При расчете α используются выражения для вертикально ориентированной поверхности [1].

Шаг 2. Назначаются начальные значения параметров теплоотвода с учетом количества ребер:

$$d_{ri} = d_{pi} = d_m,$$

$$l_{ri} = l_{pi} = \frac{l_m}{2n-1}.$$

Шаг 3. Определяется среднеповерхностная температура ребер и участков основания путем интегрирования выражений (2) для каждого участка теплоотвода.

Шаг 4. Уточняются значения коэффициентов теплоотдачи на каждом участке теплоотвода. Используются соотношения, учитывающие влияние межреберного расстояния на коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением [3].

Шаг 5. Уточняются геометрические параметры теплоотвода. Используются соотношения (15) и (16).

Шаг 6. Проверяется условие

$$\left| \frac{R(X^{(i)}) - R(X^{(i-1)})}{R(X^{(i)})} \right| \leq \epsilon,$$

где ϵ – погрешность вычислений.

Если условие не выполняется, то переход на шаг 3.

Шаг 7. Проверяется условие

$$\left| \frac{R(X^{(i)}) - R_b}{R_b} \right| \leq \epsilon,$$

где ϵ – погрешность вычислений.

Если условие не выполняется, то переход на шаг 3. Иначе – конец алгоритма.

Алгоритм позволяет определить оптимальные размеры теплоотвода, имеющего минимальную массу при заданном числе ребер. Для окончательного выбора конструкции теплоотвода необходимо провести исследование зависимости массы оптимальных теплоотводов от количества ребер.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕБРИСТЫХ ТЕПЛОТВОДОВ

Исследовалась зависимость массы теплоотвода от количества ребер. Исследование проводилось с целью определения оптимального числа ребер при минимизации массы теплоотвода. В исследованиях использовался теплоотвод из алюминиевого сплава АЛ2.

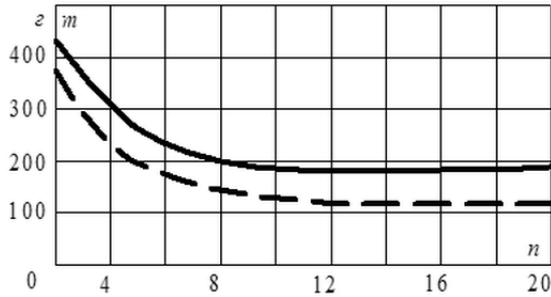


Рис. 4. Зависимость массы теплоотвода от числа ребер

Задавалась мощность $P = 10$ Вт, температура окружающей среды $t_c = 40^\circ\text{C}$, допустимое входное тепловое сопротивление $R_b = 2$ К/Вт, коэффициент черноты поверхности теплоотвода $\varepsilon = 0,91$. В алгоритме учитывалась зависимость коэффициентов теплоотдачи от межреберного расстояния [3]. Результаты расчетов отображены на рис. 4 пунктирной линией.

Из рис. 4 видно, что оптимизация позволяет в несколько раз уменьшить массу теплоотвода. Изменение массы теплоотвода в 2,5 раза осуществляется при увеличении количества ребер до $n = 8$. Дальнейшее увеличение количества ребер уменьшает массу теплоотвода только на 20 %. По сравнению с пластинчатым теплоотводом [3] масса уменьшается в 5 раз.

Оптимизация приводит к конструкции теплоотвода, у которой размеры ребер и участков основания не повторяются. Толщина участков основания изменяется от 9 мм до 1 мм, а длина – от 9 мм до 14 мм. Толщина ребер изменяется от 1,2 мм до 0,4 мм, а их длина – от 136 мм до 95 мм. Длина ребер, расположенных в конце теплоотвода, уменьшается до 30 %. Необходимость обеспечения такой номенклатуры размеров снижает технологичность теплоотвода. Улучшения технологичности изделия можно достигнуть обеспечением равенства однотипных размеров. В этом случае целевая функция (5) запишется в виде

$$m = \rho L[(n - 1) \cdot d_p l_p + n \cdot d_r l_r] \rightarrow \min.$$

Вспомогательная функция (14) преобразуется к виду

$$\Phi(\lambda) = \left(\frac{n-1}{x_1 x_2} + \frac{n}{x_3 x_4} \right) + \lambda \sum_{j=1}^4 c_j x_j^2.$$

Оптимальные значения массы теплоотвода обеспечиваются при выполнении соотношений

$$x_1 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{(n-1)^2 \cdot \frac{c_2}{c_1}},$$

$$x_2 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{(n-1)^2 \cdot \frac{c_1}{c_2}},$$

$$x_3 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{n^2 \cdot \frac{c_4}{c_3}},$$

$$x_4 = \frac{1}{\sqrt[4]{2\lambda}} \sqrt[8]{n^2 \cdot \frac{c_3}{c_4}},$$

$$\lambda = \frac{2}{R_b^2} \left[\sqrt[4]{(n-1)^2 c_{1i} c_{2i}} + \sqrt[4]{n^2 c_{3i} c_{4i}} \right]^2.$$

Оптимизация массы теплоотвода с равными однотипными размерами приводит к зависимости, показанной на рис. 4 сплошной линией. Из графика видно, что теплоотвод имеет минимальную массу при числе ребер $n = 12$. Дальнейшее увеличение ребер приводит к незначительному увеличению массы на 25 %. Сравнение теплоотводов с различными и равными однотипными размерами показывает, что за улучшение технологичности приходится расплачиваться увеличением массы на 25 %.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод оптимизации массы теплоотводов позволяет проектировать теплоотводы минимальной массы путем изменения параметров элементов конструкций. Полученные оптимизационные соотношения связывают размеры участков теплоотвода с параметрами границ области работоспособности, определяющей допустимый тепловой режим теплоотводящих элементов. Улучшение сходимости алгоритма обеспечивается выбором эллипсоидной модели границ области работоспособности.

Применение разработанных оптимизационных процедур позволяет уменьшать массу теплоотводящих устройств в несколько раз по сравнению с пластинчатыми теплоотводами. Предложенный метод позволяет учитывать технологические ограничения, в частности проектировать теплоотводы с равными однотипными размерами. Но в этом случае уменьшение массы на 20–30 % меньше. Предложенный метод может использоваться и при других стратегиях проектирования теплоотводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дульнев Р. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Дульнев Р. Н. – М. : Высш. шк., 1984. – 247 с.
2. Роткоп Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. – М. : Советское радио, 1976. – 232 с.

3. *Ройзен Л. И.* Теловой расчет ребренных поверхностей / Ройзен Л. И., Дулькин И. Н. ; под. ред. В. Г. Фастовского. – М. : Энергия, 1977. – 256 с. с ил.
4. *Гапоненко Н. П.* Проектирование пластинчатых радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами / Гапоненко Н. П., Огренич Е. В. // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2007. – № 1. – С. 32–35.
5. *Шило Г. Н.* Геометрические методы назначения допусков / Шило Г. Н. // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 2. – С. 118–126.

Надійшла 12.03.2010
Після доробки 22.04.2010

Шило Г. М., Огренич Є. В., Філобок Г. В., Гапоненко М. П.

ПРОЕКТУВАННЯ РЕБРИСТИХ ТЕПЛОВІДВОДІВ МІНІМАЛЬНОЇ МАСИ

Сформовано моделі елементів конструкцій тепловідводів у вигляді теплових ліній з навантаженням на кінці. Розглянуто режими роботи теплових ліній. Для тепловідводів мінімальної маси отримано співвідношення, що

зв'язують розміри елементів конструкцій тепловідводів з параметрами границь області працездатності. Оцінено залежність маси тепловідводів від кількості ребер.

Ключові слова: тепловідвід, тепла лінія, мінімальна маса, алгоритм оптимізації, область працездатності, технологічне обмеження.

Shilo G. N., Ogrenich E. V., Filobok A. V., Gaponenko N. P.
DESIGNING OF RIBBED HEAT SINKS HAVING MINIMUM MASS

The authors present the models of heat sinks structural elements in the form of heat lines loaded at the end. Modes of heat lines operation are considered. Relationships have been obtained for heat sinks of minimum mass, relating the size of heat sinks structural elements with parameters of workability region limits. Dependence of heat sinks mass on the number of ribs has been estimated.

Key words: heat sink, heat line, minimum mass, optimization algorithm, workability region, technological limitations.