Известия НАН Армении, Физика, т.52, №3, с.376–382 (2017)

УДК 621.3; 621

ТЕПЛОВОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА

А.Г. АРУТЮНЯН

Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

e-mail: harash@seua.am

(Поступила в редакцию 20 февраля 2017 г.)

Предложены критерий и соответствующий подход для теплового размещения элементов интегральных схем (ИС) на поверхности кристалла. Предлагаемый критерий размещения идентичен традиционным критериям минимизации суммарной длины соединений между элементами, что позволяет на этапе размещения применять аддитивный многопараметрический критерий совместного учета электрического и теплового режимов функционирования элементов ИС.

1. Введение

Обеспечение топологической равномерности теплового поля и повышения тепловой надежности интегральных схем (ИС) является важной задачей. Исследования теплофизических свойств кремния и ИС на его основе важны с практической точки зрения. Изучение тепловых характеристик полупроводников является актуальной задачей [1, 2], поскольку среднее удельное энергопотребление в современных полупроводниковых ИС составляет 0.5–0.75 Вт/мм^2 и по прогнозам на предстоящее десятилетие достигнет 1.35 Вт/мм^2. В условиях такого энергопотребления в высокоскоростных процессорных ИС температура полупроводникового кристалла может достичь 100°С, а разница между локальными температурами в различных областях полупроводникового кристалла – 10–20°С [3].

Электромиграция элементов ИС от температуры для среднего времени безотказной работы характеризуется зависимостью Блека, которую можно представить в виде [4]

$$t_{\mathrm{av}}\left(T\right) = AJ^{-n}\exp\left(\frac{E_{\mathrm{a}}}{kT}\right), \tag{1}$$

где $t_{\mathrm{av}}\left(T\right)$ – среднее время безотказной работы, A – параметр, зависящий от технологии (микроструктуры), J – плотность тока, n – степенной показатель плотности тока, принимающий значения $n = 1,...,2$ при изменении плотности тока в

пределах $J = (0.2–2.0)\times10^6$ А/см^2, E_a – энергия активации, зависящая от применяемых материалов и для полупроводниковых ИС с алюминиевыми межсоединениями принимающая значения $E_a =$ 0.5–0.6 eV, k – постоянная Больцмана и T – температура элемента ИС в K. В пределах одной ИС все параметры, входящие в формулу (1), кроме температуры T можно принять приблизительно равными для всех элементов.

Результаты ускоренных испытаний ИС средней сложности показали, что если их средний срок службы при температуре 60°C составляет 50–75 лет, то при повышении температуры до 125°C – не более 1000–1500 час. Для больших ИС срок службы резко снижается [5]. Таким образом, повышение рабочей температуры полупроводникового кристалла приводит к резкому снижению среднего срока службы ИС.

Одним из путей решения этой проблемы является уменьшение разности температур между различными зонами кристалла при размещении элементов ИС, что может привести к понижению температуры в наиболее горячих зонах кристалла. При этом наиболее холодные зоны кристалла будут служить своего рода внутренними «микрорадиаторами». Целью настоящей работы является разработка методов обеспечения и учета топологической равномерности температурного поля при размещении элементов ИС.

2. Условия равномерного теплового размещения элементов

Условие равномерности распределения температур на поверхности кристалла можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^{N}\left(T_i - T_{\text{av}}\right)^2 \to \min , \tag{2}$$

где T_i – температура i-го элемента; T_{av} – средняя температура элементов ИС и N – количество рассматриваемых элементов ИС.

Определим среднюю температуру элементов ИС как $T_{\text{av}} = \sum_{i=1}^{N}\left(T_i / N\right)$. С учетом того, что $1/N^2$ не зависит от размещения элементов, условие (2) можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^{N}\left|\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\left(T_i - T_j\right)\right| \to \min . \tag{3}$$

Так как на этапе размещения элементов ИС известна не температура, а мощности элементов, то с целью приведения условия (3) к виду, удобному в качестве критерия размещения, произведем некоторые преобразования. Допустим, что мощности элементов ИС, коэффициенты теплопроводности отдельных

частей кристалла ИС и коэффициенты теплообмена не зависят от температуры. Тогда на основе принципа суперпозиции стационарная температура некоторого i-го элемента определяется из взаимного теплового влияния всех элементов [6]

$$T_i = T_{\text{en}} + \sum_{k=1}^{N} P_k F_{ki} \ , \tag{4}$$

где T_{en} – температура окружающей среды, P_k – мощность k-го элемента, F_{ki} – тепловой коэффициент между k-й и i-й позициями.

Для ИС с высокой степенью интеграции и с большой регулярностью структуры, состоящей из элементарных ячеек приблизительно одинаковых размеров, можно принять равенство значений тепловых коэффициентов всех посадочных мест элементов, т. е. $F_{ij} \approx F_{ji}$. Учитывая, что значения сумм $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^{N} P_k F_{ki}$ и $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^{N} P_k F_{kj}$ мало зависят от взаимного расположения i-го и j-го элементов, а также то, что F_{ij} является убывающей функцией от геометрического расстояния d_{ij} i-го и j-го элементов, критерий равномерности распределения температуры на поверхности кристалла можно представить в виде

$$f_T = \sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \left| P_i - P_j \right| d_{ij} \to \min \ . \tag{5}$$

Полученное условие (5) означает, что элементы с большими значениями абсолютных разностей мощностей следует размещать по возможности ближе. Тогда задачу равномерного теплового размещения элементов ИС можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такие взаимные топологические расстояния d_{ij} $\left(i, j = 1, 2, \ldots, N\right)$ координат размещения элементов ИС с заданными мощностями, которые бы удовлетворяли условию (5). Такая задача является комбинаторной и ее точное решение связано с полным перебором вариантов размещения. Однако при начальном размещении элементов можно пользоваться более экономичными последовательными алгоритмами размещения, дающими возможность получения удовлетворительных результатов, которые можно подвергнуть дальнейшему улучшению с помощью итерационных алгоритмов окончательного размещения [7, 8].

При изучении теплового поля реальных конструкций необходимо учитывать граничные условия охлаждения и теплофизические свойства материала. Аналитические методы учета условий теплообмена на всех границах системы делают задачу столь сложной и трудоемкой, а точность расчетов столь низкой, что исследование теплового поля системы может оказаться нецелесообразным. Неслучайно в настоящее время изучение теплового поля реальных конструкций ведется, в основном, экспериментальными методами, например, путем инфракрасного сканирования поверхности кристалла. В целом изучение теплового поля

конкретных конструкций ИС является самостоятельной задачей исследования и не входит в рамки настоящей работы. Однако, имея в виду известный в теории теплообмена принцип местного влияния и учитывая высокую степень интеграции современных ИС, предложенный критерий (5) может обеспечить равномерное распределение мощностей на основной части поверхности кристалла.

3. Комплексный критерий размещения

В традиционных алгоритмах начального размещения элементов ИС в качестве основного критерия используется условие обеспечения минимума ожидаемой суммарной виртуальной длины межсоединений, в котором ожидаемые длины соединений между элементами идентифицируются их топологическими расстояниями [8]:

$$f = \sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} r_{ij} d_{ij} \to \min , \qquad (6)$$

где r_{ij} – количество связей между i-ым и j-ым элементами.

При сопоставлении условий (5) и (6) становится очевидным, что топологическая близость элементов приводит как к укорачиванию их взаимосвязей, так и к уменьшению разности их температур, и наоборот. Учитывая вышеизложенное, в качестве обобщенного критерия размещения элементов, учитывающего электрическую связанность элементов и тепловой режим ИС, предлагается использовать аддитивную функцию от двух частных критериев f и f_T :

$$F = a_1 \overline{f}_{\mathrm{T}} + a_2 \overline{f} \to \min , \qquad (7)$$

где $\overline{f}_T$ и $\overline{f}$ – нормированные значения f_T и f ; a_1 и a_2 – весовые коэффициенты. Нормирование производится с целью приведения параметров с различными физическими измерениями к единому относительному безразмерному виду. При этом для корректности сравнения возможных вариантов размещения по критерию F при различных значениях коэффициентов a_1 и a_2 следует придерживаться условия $a_1 + a_2 = 1$. С помощью весовых коэффициентов a_1 и a_2 можно управлять относительной важностью длин межсоединений и равномерностью топологического распределения температур.

4. Практическая реализация исследований

На основе предложенного критерия (7) нами реализован простейший алгоритм последовательного размещения, основанный на рекурсивном повторении следующей основной процедуры. На очередную позицию, ближайшую к уже размещенным ячейкам, размещается ячейка, имеющая минимальное значение функции претендентности β, которое определяется как разница между связанностями

данной i-й ячейки с еще неразмещенными и уже размещенными ячейками в смысле критерия (7), что соответствует условию

$$\beta_i = \min_{i \in E_1} \left(\sum_{j \in E_1} \left(a_1 \overline{\left| P_i - P_j \right|} \right) + a_2 \overline{r_{ij}} - \sum_{j \in E_2} \left(a_1 \overline{\left| P_i - P_j \right|} \right) + a_2 \overline{r_{ij}} \right), \qquad (8)$$

где β_i – значение функции претендентности для i-й ячейки, E_1 и E_2 – множества неразмещенных и размещенных ячеек, соответственно. Верхняя линия обозначает нормированные значения соответствующих величин.

Оценку качества размещения с точки зрения равномерности топологического распределения температур можно производить на основе разницы максимальной и минимальной значений удельных мощностей локальных нагретых зон кристалла. Очевидно, что насколько меньше значение этой разницы, настолько больше степень топологической равномерности температур. Выбор размеров локальных нагретых зон производится опытным путем на основе принципа местного влияния теплообмена. Согласно этому принципу, влиянием местного возмущения теплового поля на достаточно удаленные зоны можно пренебречь [6]. Исследования показали, что при размещении стандартных ячеек современных ИС с достаточной для практики точностью, размеры локальных тепловых зон можно принять равными площади, занимаемой четырьмя соседними ячейками [9].

Если рассматриваемое размещение состоит из m локальных тепловых зон, то удельную мощность элементов, размещенных в некоторой i-ой зоне L_i, можно оценить следующим образом:

$$K_{L_i} = \sum_{i \in L_i} P_i \Big/ \sum_{i \in L_i} S_i, \quad i = 1, 2, ..., m, \qquad (9)$$

где P_i и S_i – мощность и занимаемая площадь i-го элемента, соответственно. Обобщенное качество размещения с точки зрения равномерности топологического распределения температур можно оценить следующим образом:

$$K_L = \left(\frac{\max K_{L_i} - \min K_{L_i}}{\max K_{L_i}} \right) 100\%, \; i = 1, 2, ..., m. \qquad (10)$$

5. Результаты исследования

На основе вышеизложенного подхода разработан соответствующий алгоритм начального размещения элементов ИС, который реализован и испытан на тестовых схемах ISCAS85 для различных значений весовых коэффициентов a_1 и a_2. В качестве элементной базы использована библиотека цифровых стандарт-

ных ячеек SAED90, разработанная в учебном департаменте ЗАО Синопсис Армения [10]. Результаты сравнительных данных топологического распределения температур и суммарной длины межсоединений приведены в табл.1.

Табл.1. Сравнительные данные размещения ячеек тестовых ИС

Обозначение ИС	Количество ячеек	minK_{Li} /maxK_{Li} нВт/мГц мкм^2			Суммарная длина межсоединений, мкм		
		$a_1 = 1$, $a_2 = 0$	$a_1 = 0$, $a_2 = 1$	$a_1 = 0.5$, $a_2 = 0.5$	$a_1 = 1$, $a_2 = 0$	$a_1 = 0$, $a_2 = 1$	$a_1 = 0.5$, $a_2 = 0.5$
C499	202	0.9/2.0	0.7/5.1	0.7/2.7	5226	2594	2991
C3540	1669	2.2/10.2	1.6/18.8	1.8/13.5	52621	28966	31957
C5315	2307	1.8/7.2	1.4/12.0	1.4/8.5	153931	76142	80130

Суммарная длина межсоединений оценена с помощью широкоиспользуемых в системах автоматизированного проектирования ИС полупериметровых моделей межсоединений [7].

Как видно из таблицы, при $a_1 = a_2 = 0.5$ значение коэффициента равномерности мощностей K_L по сравнению с случаем без учета мощностей $(a_1 = 0, a_2 = 1)$ уменьшается на 4–12%, а суммарная длина межсоединений по сравнению с случаем без учета межсоединений $(a_1 = 1,\ a_2 = 0)$ – на 36–45%.

6. Заключение

Полученные результаты показывают, что учет мощностей элементов при их размещении обеспечивает более равномерное распределение температур на поверхности кристалла без существенного увеличения суммарной длины межсоединений. Тем самым тепловая надежность проектируемой ИС повышается. При этом увеличивая отношение весовых коэффициентов a_1 и a_2 за счет увеличения суммарной длины межсоединений, можно обеспечить уменьшение значения коэффициента равномерности мощностей K_L на 13–31%. Предлагаемый метод может быть внедрен в существующие средства автоматизированного проектирования ИС в виде подсистемы начального размещения стандартных ячеек.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Y. Shabani.** Heat Transfer: Thermal Management of Electronics. Boca Raton, London, New York, Taylor&Francis, 2010.
2. **T. Grasser.** Hot Carrier Degradation in Semiconductor. New York, Springer, 2015.

3. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2013.
4. **R. Vijay.** Introduction to Semiconductor Reliability. International Reliability Physics Symposium, 2003 Dallas, Texas. Topic 111, pp. 1–74.
5. Тепловой режим процессоров Pentium4-athlonxp. http://www.ixbt.com/cpu/Pentium4-athlonxp-thermal-managment.shtml
6. **Г.Н. Дульнев.** Теория тепло- и массообмена. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2012.
7. **N. Sherwani.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. New York, Springer, 2013.
8. **S. Gerez.** Algorithms for VLSI Design Automation. Chichester, John Wiley & Sons, 1998.
9. **K. Kyoung, J. Edward, K. Sung.** Thermal-Driven Circuit Partitioning and Floorplanning with Power Optimization, Georgia Institute of Technology, 2003.
10. Digital Standard Cell Library. SAED_EDK90_CORE DATABOOK. © 2008 SYNOPSYS ARMENIA Educational Department, Yerevan, 2008.

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐՐԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՏԵՂԱԲԱՇԽՈՒՄԸ ԲՅՈՒՐԵՂԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՎՐԱ

Ա.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Առաջարկված են ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) տարրերի ջերմային տեղաբաշխման չափանիշ և համապատասխան մոտեցում: Առաջարկվող տեղաբաշխման չափանիշը նույնական է տարրերի միջմիացումների գումարային երկարության նվազարկման ավանդական չափանիշներին, ինչը թույլ է տալիս տեղաբաշխման փուլում օգտագործել ԻՍ-երի տարրերի գործառնության էլեկտրական և ջերմային ռեժիմների հաշվառման բազմապարամետրական ադիտիվ չափանիշ:

THERMAL PLACEMENT OF ELEMENTS OF INTEGRATED CIRCUITS ON CRYSTAL SURFACE

A.G. HARUTYUNYAN

Criterion and an appropriate approach for thermal placement of integrated circuits (ICs) elements on the crystal surface are proposed. The criterion of placement is identical to the traditional criteria of minimizing the total length of connections between the elements, which allows to apply an additive multiparametrical criterion of joint account of electrical and thermal modes for operating of IC elements at the placement stage.