

УДК 658.512

А.А. Кулаков

**МЕТОД РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СБИС ТРЕХМЕРНОЙ КОМПОНОВКИ**

*Рассмотрена проблема решения задачи размещения ячеек в трехмерных многослойных СБИС по технологии сквозных кремниевых межсоединений с учетом тепловой оптимизации. Приведена постановка и математическая модель задачи. Для решения задачи размещения блоков и ячеек предложен подход, основанный на алгоритме имитации отжига и генетическом алгоритме, учитывающий взаимное тепловое влияние ячеек СБИС. Представлены достигнутые характеристики производительности и результаты экспериментальных исследований алгоритма.*

*Автоматизация проектирования интегральных схем; размещение элементов; трехмерные СБИС; тепловая оптимизация.*

А.А. Kulakov

**METHOD OF THERMAL CELL PLACEMENT ON THREE-DIMENSIONAL INTEGRATED CIRCUIT**

*This paper describes the approach to the cell placement problem in three-dimensional through-silicon vias integrated circuits with the heat distribution optimization. Described formulation and the objective function of the cell placement optimization problem. Proposed the algorithm based on simulated annealing approach and genetic algorithm, considering cell's mutual thermal effect. The description of achieved performance and experimental results are given.*

*Computer-aided design of integrated circuits; three-dimensional integrated circuits; cell placement; thermal optimization.*

**Введение.** С развитием современных субмикронных технологических процессов изготовления СБИС перед проектировщиками встали новые проблемы, такие как увеличение задержек в соединениях, увеличение энергопотребления и температуры. Они в свою очередь, отрицательно влияют на надежность и работоспособность электронных устройств.

Трехмерные интегральные схемы – это попытка преодолеть ограничения «плоских» СБИС, главным образом, интеграцией нескольких слоев кристалла в монолитную структуру. Выгода такого вертикального расширения СБИС включает лучшее использование площади чипа, уменьшение длины проводников, и увеличение количества транзисторов на единицу площади, что приводит к росту быстродействия и энергоэффективности [1]. Несмотря на эти преимущества, существует критическое ограничение: в трехмерной СБИС присутствует высокое влияние тепловых эффектов, из-за более высокой удельной мощности и большего теплового сопротивления вдоль путей теплоотдачи [2]. Высокая рассеиваемая мощность на единицу площади кристалла СБИС непосредственно влияет на его рабочую температуру, а, следовательно, негативно сказывается на надежности КМОП-схем [3, 9].

В рамках данной работы рассмотрены проблема размещения элементов многослойной трехмерной СБИС с учетом теплового распределения (тепловой эффективности) и предложен алгоритм, решающий поставленную задачу.

**Постановка задачи.** Рассмотрим метод проектирования СБИС на основе стандартных ячеек. В трехмерных СБИС предпочтительно размещать наиболее тепловыделяющие ячейки на нижних слоях структуры ИС в непосредственной близости от теплоотводов. При размещении ячеек необходимо минимизировать количество сквозных межслойных соединений и общую длину межсоединений в слоях [4].

Задачу теплового размещения стандартных ячеек в СБИС трехмерной компоновки можно сформулировать следующим образом. Имеется множество ячеек  $K$ . Все ячейки рассматриваются как источники тепла, а их перегрев обусловлен взаимным тепловым влиянием друг на друга [5]. Имеется множество  $N$  слоев, каждому из которых ставится в соответствие некоторый набор ячеек  $R$  из множества  $K$ . Матрицу соответствующих каждой ячейке удельных мощностей обозначим как  $M_l$ , где  $l = 1 \dots N$ , при этом позиция ячейки в матрице соответствует её положению на коммутационном поле.

Разобьем матрицу  $M_l$  на множество несвязных подматриц  $S_t(M_l)$  размерности  $t \times t$ , соответствующих областям коммутационного поля, где  $t$  – целое число, выбранное исходя из размерности матрицы  $M_l$ .

Пусть  $\sigma(M_l)$  – это сумма всех значений матрицы  $M_l$ , тогда максимальное значение рассеиваемой мощности (область перегрева) среди всех подматриц  $S_t$  определяется выражением:

$$\mu_t(M_l) = \max_{S_t \in S_t(M_l)} \sigma(M_l). \quad (1)$$

Для снижения рассеиваемой мощности на единицу площади необходимо минимизировать значение рассеиваемой мощности  $\theta(M_l)$  среди всех возможных размещений элементов в  $M_l$ :

$$\theta(M_l) = \min(\mu_t(M_l)). \quad (2)$$

Определим общую целевую функцию задачи теплового размещения как:

$$F = w_1 \times \sum_{l=1}^N \gamma_l + w_2 \times \tau, \quad (3)$$

где  $\gamma_l$  – общее число межсоединений в слое  $l$ ,  $\tau = \max_{l=1}^N (\theta(M_l))$  – оценка максимального тепловыделения слоев,  $w_1, w_2$  – весовые коэффициенты,  $0 < w_1 < 1$ ,  $0 < w_2 < 1$ ,  $w_1 + w_2 = 1$ .

Описанная задача размещения ячеек в многослойной трехмерной СБИС с учетом тепловой оптимизации относится к классу задач дискретной оптимизации.

**Алгоритм размещения.** Для решения задачи размещения существует множество алгоритмов, например [6, 7]. В настоящей работе предлагается использовать метод, основанный на алгоритме имитации отжига с использованием генетического алгоритма для генерации стартового размещения. Алгоритм имитации отжига представляет собой алгоритмический аналог физического процесса управляемого охлаждения и использует упорядоченный случайный поиск новых состояний системы с более низкой температурой [8].

Входные данные алгоритма:  $N$  – число слоев интегральной схемы,  $M$  – множество удельных мощностей ячеек,  $A$  – матрица коннективности ячеек,  $t$  – константа разбиения. Результатом работы алгоритма является оптимальное с точки зрения температурного градиента размещение ячеек на решетке коммутационных полей  $N$  слоев.

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1.

Основные процедуры алгоритма – генерация стартового размещения, размещение ячеек в слое, переразмещение ячеек между слоями.

Процедура генерации стартового (начального) размещения решает задачу кластеризации, которая является частным случаем задачи разбиения. Задача относится к классу NP-полных. Для её решения предлагается использовать генетический алгоритм (ГА) [9].

Задачу кластеризации ячеек можно сформулировать следующим образом. Каждой ячейке из множества  $K$  необходимо сопоставить номер кластера (слоя)  $n \in 1 \dots N$ , при этом количество кремниевых межсоединений  $TSV$  между слоями, т.е. число связей  $G$  между кластерами должно быть минимизировано:

$$G = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N TSV_{ij} \rightarrow \min, \quad i \neq j, \quad (4)$$

где  $TSV_{ij}$  – число связей между кластерами  $i$  и  $j$ ;  $N$  – количество частей при разбиении;  $G$  – суммарное количество связей.

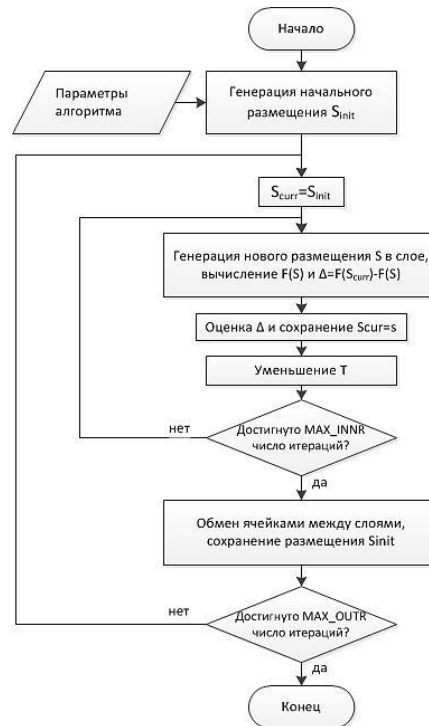


Рис. 1. Структурная схема алгоритма

Метрика связности ячеек определяется как:

$$D(x_i, x_j) = d_{ij} - (d_i + d_j), \quad (5)$$

где  $d_{ij}$  – число связей между ячейками  $x_i$  и  $x_j$  образовавшими пару;  $d_i$  и  $d_j$  – это число связей, соединяющих выбранную пару со всеми остальными ячейками.

Представление решений осуществляется кодированием ячейки номером гена и принадлежностью ячейки кластеру значением гена. Для уменьшения пространства поиска используется перекодирование хромосомы: номера кластеров, соответствующих ячеек, последовательно перенумеровываются слева направо, начиная с 1. Используются стандартные операторы мутации и кроссинговера.

После генерации стартового размещения производится итеративное перераспределение ячеек в слоях. Все ячейки слоя сортируются по убыванию рассеиваемой мощности. Матрица ячеек слоя разбивается на подматрицы размером  $t \times t$ , для каждой из которых выбирается ячейка  $u_s$ , имеющая наибольшее количество связей с другими ячейками слоя. Все ячейки  $u$  подматрицы, кроме выбранной  $u_s$ , заменяются на ячейки  $u'$  с наименьшей длиной соединений между  $u_s$  и  $u'$ , при этом заменяемые ячейки помечаются как посещенные и более не перемещаются.

Вероятность принятия полученного решения на каждой итерации определяется как:

$$p(\Delta F, T) = \exp\left(-\frac{\Delta F}{T}\right), \quad (6)$$

где  $\Delta F = F - F_{curr}$  – разница между вычисленным и наилучшим значением целевой функции,  $T$  – текущая температура.

Перемещение ячеек между слоями производится следующим образом. Для пары слоев  $n$ ,  $n - 1$  меняется местами пара ячеек  $(i, j)$ , наиболее подходящая для обмена на основе максимального весового фактора:

$$w_i = \frac{C_n}{C_{n-1}}, \quad w_j = \frac{C_{n-1}}{C_n}, \quad (7)$$

где  $C_n$  – общее число межсоединений с ячейками слоя  $n$ ;  $C_{n-1}$  – общее число межсоединений с ячейками слоя  $n - 1$ .

Алгоритм завершается по достижению максимального количества итераций.

**Заклучение.** В КМОП СБИС увеличение рабочей температуры на каждые  $10^\circ$  увеличивает вероятность отказов вдвое [10]. Экспериментальное исследование показало, что разработанный метод размещения снижает максимальное тепловыделение слоев на 10–12 %, что в абсолютных значениях температур от 20 до  $100^\circ\text{C}$  может составить 8–10  $^\circ\text{C}$ . Таким образом, предлагаемый метод позволяет существенно увеличить надежность электронных устройств, а также снизить их энергопотребление за счёт уменьшения числа межсоединений.

Отметим, что при увеличении количества слоев СБИС время сходимости целевой функции уменьшается. Это обусловлено тем, что для фиксированного количества ячеек увеличение числа слоев приводит к уменьшению количества межсоединений в слое.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Юдинцев В.А.* Трёхмерная кремниевая технология. Что, где, когда? Ч. 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 4. – С. 70-75.
2. The International Technology Roadmap for Semiconductors report, 2012. URL: <http://www.itrs.net/Links/2012ITRS/2012Chapters/2012Overview.pdf> (Дата обращения: 22.04.2013).
3. *Ковалев А.В.* Технологии энергосбережения в микроэлектронных устройствах // Монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 100 с.
4. *Xie Y., Cong J. and Sapattekar S.* Three-Dimensional Integrated Circuit Design: EDA, Design and Microarchitectures. Springer Publishers, 2009.
5. *Лебедев О.Б.* Оптимальное размещение дискретных источников тепла с использованием метода генетического поиска // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2005. – № 4. – С. 24-29.
6. *Курейчик В.М., Кажаров А.А.* Алгоритмы эволюционного роевого интеллекта в решении задачи разбиения графа // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 237-242.
7. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Гибридный алгоритм разбиения на основе природных механизмов принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – № 2. – С. 3-15.
8. *Новакова Н.Е.* Модели и методы принятия проектных решений в сложноструктурированных предметных областях. Монография. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 168 с.
9. *Кулаков А.А.* Извлечение знаний. Состояние, проблемы, перспективы // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2010. – № 3-4 (39-40). – С. 42-66.
10. *Small C.* Shrinking devices put the squeeze on system packaging // EDN. – 1994. – Vol. 39, № 4. – P. 41-46.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Кулаков Андрей Анатольевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: kulakov@icwtu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Энгельса, 2; тел.: 89043467451; аспирант.

**Kulakov Andrey Anatol'evich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: kulakov@icwtu.ru; 2, Engelsa street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79043467451; postgraduate student.