

Метод размещения блоков СБИС трехмерной интеграции

А.А. Кулаков, В.М. Курейчик

Южный федеральный университет, kulakov@tgn.net.ru, kur@tgn.sfedu.ru

Аннотация — В работе рассмотрена проблема решения задачи планирования СБИС трехмерной интеграции с учетом оптимального теплового распределения элементов. Приведена постановка задачи. Описан метод представления планов трехмерной интеграции на основе транзитивного замыкания графов. Представлены два способа моделирования тепловых эффектов. Предложен подход, основанный на комбинировании генетического алгоритма и алгоритма имитации отжига, а также тепловых моделей, учитывающий в интегральном критерии качества взаимное тепловое влияние элементов СБИС. Представлены результаты экспериментального применения алгоритма и сделаны выводы о применимости метода.

Ключевые слова — СБИС трехмерной интеграции, планирование СБИС, тепловое распределение, алгоритм имитации отжига, генетические алгоритмы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Схемы трехмерной интеграции (3-D), в которых активные элементы размещаются на нескольких слоях кристалла, являются одним из подходов к решению проблемы выполнения закона Мура. Однако, несмотря на многие преимущества, такие как неоднородная интеграция, уменьшение длины межсоединений, увеличение числа транзисторов на единицу площади, переход производителей микроэлектронных устройств на трехмерную компоновку схем происходит достаточно медленно. Это связано с необходимостью решать новые задачи на всех уровнях проектирования СБИС. Одной из основных проблем физического проектирования, среди прочих, является проблема тепловых эффектов [1]. Влияние тепловых эффектов является критическим ограничением во всех высокоэффективных микросхемах: надежность устройства строго зависит от температуры, эта проблема является еще более существенной для 3-D ИС из-за более высокой удельной мощности на единицу площади и большего теплового сопротивления [2].

В настоящей работе предлагается тепловая модель и метод размещения тепловыделяющих разногабаритных функциональных блоков на плане кристалла многослойной интегральной схемы с учетом критерия снижения влияния негативных тепловых эффектов. Данная задача относится к классу NP-полных, и, поскольку для её решения не существует алгоритма с полиномиальной вычислительной сложностью, предлагается использовать эволюционный алгоритм.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В СБИС трехмерной интеграции предпочтительно размещать тепловыделяющие функциональные блоки на нижних слоях структуры ИС в непосредственной близости от теплоотводов. При размещении функциональных блоков необходимо минимизировать максимальную рабочую температуру устройства и общую длину межсоединений в слоях [4].

Задачу планирования СБИС трехмерной компоновки с учетом тепловой оптимизации сформулируем следующим образом. Имеется множество слоев L и множество функциональных блоков M . Для каждого функционального блока $m_j \in M$ заданы значения (x_i, y_i, l_i, o_i) , где x_i – координата блока по оси x , y_i – координата блока по оси y , l_i – номер слоя, и o_i – ориентация блока m_j . Для исходного плана F определим его площадь A и длину проводников W . Каждый блок m_j рассматривается как источник тепла и характеризуется значением удельной рассеиваемой мощности p_i . Для устранения перегрева и снижения максимальной рабочей температуры интегральной схемы необходимо снизить взаимное тепловое влияние функциональных блоков [5] или, другими словами, минимизировать рассеиваемую мощность на единицу площади. Интегральный критерий оптимизации запишем следующим образом:

$$C = \alpha \cdot \sum_{l=1}^N W_l + \beta \cdot Q,$$

где l – номер слоя схемы, N – общее число слоев схемы, W_l – длина проводников в слое l , Q – тепловой критерий, определяемый на основе теплового моделирования схемы, α и β весовые коэффициенты, $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$, $\alpha + \beta = 1$.

Тепловой критерий Q характеризует максимальную температуру среди всех слоев схемы с учетом взаимного теплового влияния элементов:

$$Q = \max_{k=1}^N (q_k),$$

где k – номер слоя, N – общее число слоев, q_k – отношение максимальной температуры к средней в слое k .

Для определения значения Q необходимо построить тепловую модель СБИС, при этом модель должна удовлетворять критериям быстродействия и

точности решения так как эволюционные алгоритмы планирования могут генерировать миллионы различных решений.

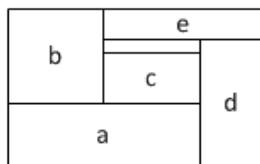
III. СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПЛАНА

При разработке алгоритма планирования трехмерных СБИС в первую очередь необходимо выбрать способ представления геометрических отношений между блоками.

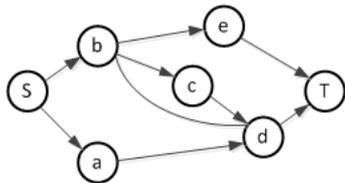
Для решения этой задачи предлагается использовать представление на основе транзитивного замыкания графа.

Использование предложенного подхода основано на представлении в виде двух ориентированных графов: горизонтального графа C_h и вертикального графа C_v . В каждом из графов вершина n_i представляет блок b_i , а ребро (n_i, n_j) в графе C_h (C_v) определяет местоположение блока b_i слева (снизу) блока b_j .

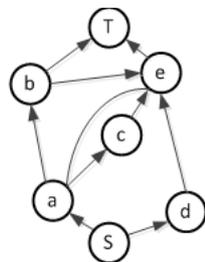
На рис. 1 показан план с пятью блоками: a, b, c, d, e, а также соответствующие им оргграфы.



(a)



(б)



(в)

Рис. 1. Представление топологии плана с помощью транзитивного замыкания графа. (а) исходный план, (б) горизонтальный граф C_h , (в) вертикальный граф C_v

Значение (вес), связанное с вершиной в графе C_h (C_v), представляет собой ширину (высоту) соответствующего блока, а ребро (n_i, n_j) C_h (C_v) обозначает горизонтальное (вертикальное) отношение между блоками b_i и b_j . Для применения в схемах трехмерной интеграции такие пары графов необходимо построить для каждого слоя схемы.

Поскольку существует ребро (n_b, n_d) в C_h , блок n_b находится слева от n_d . Точно также, блок n_a расположен ниже b , поскольку существует ребро (n_a, n_b) в графе C_v . Для определения конечных позиций каждого блока (декодирования) необходимо определить наибольший путь в графе C_h (C_v).

Процесс декодирования представления производится следующим образом. В исходных графах C_h (C_v) достраиваются вершины источника S и

назначения T (см. рис. 1) таким образом, что вершина S связывается ребрами со всеми вершинами, имеющими нулевую степень входящих ребер, а вершина T – со всеми вершинами, имеющими нулевую степень входящих ребер. Под степенью входящих (исходящих) ребер мы понимаем число связей с вершиной, входящих в неё (исходящих из неё). Эти узлы являются «виртуальными» и имеют нулевые размеры, весовое значение узла в графе равно нулю.

Пусть $L_h(n_i)$ – длина наибольшего пути из n_s в n_i для графа C_h , а $L_v(n_i)$ – длина наибольшего пути из n_s в n_i для графа C_v . Эти значения могут быть определены с помощью известного алгоритма вычисления наибольшего пути в графе [6]. При этом декодированные координаты (x_i, y_i) блока n_i задаются значением $(L_h(n_i), L_v(n_i))$. Общая площадь плана определяется выражением $L_h(n_i) \times L_v(n_i)$. Вычислительная сложность алгоритма декодирования составляет $O(m^2)$, где m – число блоков.

Для описания связи элементов, расположенных на разных слоях, можно использовать следующий подход. Все слои плана разбиваются на ячейки дискретной сеткой. Шаг сетки определяется в зависимости от размера элементов. Для каждой ячейки i определяется список элементов $V(i)$, которые попали в эту ячейку, а для каждого элемента j определяется список ячеек $S(j)$, которые покрывают этот элемент. Эти значения отражают вертикальные отношения элементов на трехмерном плане схемы.

Для использования описанного представления схем трехмерной интеграции необходимо определить следующие операции:

- 1) Обмен элементов местами в пределах одного слоя.
- 2) Поворот – изменение ориентации элемента.
- 3) Перемещение – изменение положения элемента в пределах одного слоя.
- 4) Обмен элементов из разных слоев местами.
- 5) Перемещение элемента в другой слой.

Первые три операции являются стандартными для представлений плана с помощью графов. Они изменяют топологию плана только одного слоя. Последние две операции предназначены для поиска решений в трехмерном топологическом пространстве.

IV. ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ

Теплопередача в кристалле СБИС определяется в соответствии с законом теплопроводности Фурье [7], согласно которому тепловой поток пропорционален отрицательному градиенту температуры:

$$q = -k\nabla T, \quad (1)$$

где q – тепловой поток (в Вт/м²), k – коэффициент теплопроводности, T – температура. Минус в правой части уравнения показывает, что тепловой поток направлен противоположно градиенту температуры T (то есть в сторону скорейшего убывания температуры).

Временные константы процесса теплопередачи имеют порядок миллисекунд, что существенно больше интервалов тактирования в современных СБИС. Если режим питания элемента СБИС остается неизменным в течение длительного периода времени и его распределение плотности мощности остается относительно постоянным, может считаться достаточным проведение анализа тепловых параметров схемы в установившемся режиме. В этом случае все производные от времени равны нулю, выражение (1) для точки (x,y,z) схемы можно выразить следующим образом:

$$\nabla^2 T(x, y, z) = -\frac{g(x, y, z)}{k}, \quad (2)$$

где x, y, z – пространственные координаты точки, T – температура, g – удельная мощность в точке (x,y,z).

Выражение (2) позволяет вычислить тепловую модель и определить точную температуру в каждой точке схемы, однако имеет большую вычислительную сложность. Для промежуточной оценки максимальной температуры используем упрощенную тепловую модель, позволяющую дать приблизительную оценку теплового распределения, достаточную для целей задачи планирования.

Для этого наложим на исходный план F сетку размером MxN и пронумеруем ячейки сетки от 1 до MxN. Вместо определения точной температуры T[i] ячейки i такой сетки будем использовать приближенное значение E, которое можно определить следующим образом:

$$E[i] = \sum_{j=1}^N G^*[i, j]g[j],$$

где E[i] – тепловая оценка ячейки I, G* - приближение для функции G, g – удельная мощность ячейки j.

Приближение функции G*[i,j] вычислим следующим образом:

$$G^*[i, j] = \begin{cases} 1/d_{ij}, & d_{ij} \leq C_1 \\ C_0/\sqrt{d_{ij}}, & C_1 < d_{ij} < C_2 \\ 0, & d_{ij} > C_2 \end{cases},$$

где d_{ij} – это расстояние между центрами двух ячеек i и j; C₁=3, C₂=100, C₀=3/5 – константы, определяемые экспериментальным путем.

Например, имеется план с размещенными на нем функциональными блоками A,B,C,D,E,F (рис. 2). Для каждого функционального блока задана рассеиваемая мощность P. Разобьем исходный план на 20 ячеек. Если рассеиваемая мощность P_A=2, P_B=6, тогда E[4]=2·1/4+6·3/4=5.

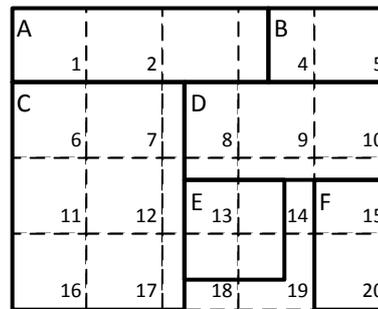


Рис. 2. Разбиение плана слоя интегральной схемы на ячейки

Значение E[i] определяется для каждой i-й ячейки. Вычисляется среднее значение T=avg(E_i) и максимальное значение T=max(E_i) для всего топологического плана слоя.

V. АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ

Разработано несколько подходов к решению описанной задачи, включая линейное программирование [8], и эволюционные алгоритмы [9]. Отметим, что целью решения является не достижение точки глобального оптимума, а нахождения оптимального решения, удовлетворяющего наложенным требованиям за приемлемое время. Время работы алгоритма является одной из ключевых проблем существующих решений, так как введение в алгоритм тех или иных тепловых моделей увеличивает область поиска задачи и приводит к резкому росту временной сложности алгоритма.

Предлагаемый алгоритм основан на генетическом алгоритме (ГА) и алгоритме имитации отжига. Он относится к так называемым алгоритмам, инспирированным природными явлениями [10].

ГА представляет собой эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем последовательного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Алгоритм имитации отжига представляет собой известный алгоритмический аналог физического процесса управляемого охлаждения и использует упорядоченный случайный поиск новых состояний системы с более низкой температурой.

Комбинирование алгоритмов производится путем ввода в генетический алгоритм оператора локального поиска, применяемого к популяции после оператора мутации. Оператор локального поиска представляет собой реализацию алгоритма имитации отжига, причем температура процесса отжига является основным критерием при расчете тепловой модели.

В алгоритме используются две тепловых модели. Полная тепловая модель рассчитывает значения температур в установившемся режиме численным методом конечных разностей. Упрощенная модель рассчитывает приближенную тепловую оценку.

Полученные значения нормируются в пределах от 0 до 100.

Предлагаемый алгоритм работает в два этапа. На первом этапе над представлением производятся все операции изменения дерева, включая обмен и перемещение элементов между слоями. При этом используются обе тепловые модели – на каждой итерации применяется упрощенная тепловая модель, при снижении температуры отжига – полная тепловая модель. На втором этапе итерационно на каждом слое производятся изменения топологии, затрагивающие только данный слой, при этом используется только упрощенная тепловая модель.

Алгоритм реализован на языке C/C++ в виде прототипа программного приложения для исследования его эффективности. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования

Число блоков	Число слоев	Тисх	Топт	t, с
33	3	119,13	105,14	11
60	3	123,61	111,59	24
100	4	131,79	117,42	97

Для всех экспериментальных наборов достигнуто снижение максимального тепловыделения слоев ($T_{\text{опт}}$). Отмечено, что увеличение количества слоев схемы снижает время сходимости целевой функции (t). Это обусловлено тем, что для фиксированного количества блоков увеличение числа слоев приводит к уменьшению количества межсоединений в слое. Кроме этого, увеличение числа блоков приводит к существенному увеличению времени работы алгоритма, однако его удалось существенно уменьшить с помощью введения в алгоритм упрощенной тепловой модели.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна предложенного подхода заключается в решении задачи планирования

трехмерной СБИС с учетом тепловых эффектов, что существенно для синтеза топологии схем трехмерной интеграции. На основе описанного подхода разработан прототип программной подсистемы, позволяющей осуществлять автоматизированное планирование кристалла схемы с учетом критериев тепловыделения и длины межсоединений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] More Than Moore's-3D-IC Economics and Design Enablement // Cadence design systems. 2013. URL: <http://www.semi.org/en/sites/semi.org/files/docs/6-SiP%20Global%20Summit%203DIC%20Technology%20Forum%20-%20Brandon%20Wang.pdf> (Дата обращения: 22.01.2014).
- [2] The International Technology Roadmap for Semiconductors report, 2012. URL: <http://www.itrs.net/Links/2012ITRS/2012Chapters/2012Overview.pdf> (Дата обращения: 22.04.2013).
- [4] Y. Xie, J. Cong and S. Sapatnekar. 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] Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ. Изд. 3. М.: Вильямс, 2014. 1328 с.
- [7] Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. Изд. 3-е, репринтное. М.: Бастет, 2010. 342 с.
- [8] Xin Li, Yuchun Ma, and Xianlong Hong. A novel thermal optimization flow using incremental floorplanning for 3D ICs // In ASPDAC. IEEE Press. 2009. P. 347-352.
- [9] Cuesta D., Risco-Martin J.L., Ayala J.L., Hidalgo J.I. A combination of evolutionary algorithm and mathematical programming for the 3D thermalaware floorplanning problem // In 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO 2011). ACM Press. 2011. P. 1731-1738.
- [10] 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.