

多芯片组件基板单探针测试路径的二次优化*

徐如清^{1,2,†} 董刚¹ 黄炜炜¹ 杨银堂¹

(1 西安电子科技大学微电子所 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2 中国电子科技集团预研部, 北京 100846)

摘要: 基于模拟退火算法给出了一种可用于 MCM 互连基板单探针测试的二次优化方法,即采用模拟退火算法对启发式算法获得的 MCM 互连基板单探针测试路径进行二次优化改进.模拟结果显示,所提方法与已有的启发式优化算法相比较,对单探针路径的优化最高可达 90.2%,可以有效地降低多芯片组件互连基板单探针测试的成本.

关键词: 单探针测试; 模拟退火算法; 二次优化

PACC: 2570A **EEACC:** 4270

中图分类号: TN491 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)10-1652-04

1 引言

多芯片组件(multi-chip module, MCM)是把多块裸芯片组装在同一块多层高密度互连基板上,并封装在同一外壳中,形成一个多功能组件.它可满足军事、航天航空、工业测量所特别注重的高速、小型和高可靠性的需求,是一种潜力巨大的系统实现方式.

为了提高 MCM 产品的成品率,需要对其高密度互连基板进行测试.典型的 MCM 基板包含了大量的互连网络,目前,单探针测试是一种比较常用的手段^[1].为了提高测试效率,减小探针移动的总距离是一种有效的方法.根据 MCM 基板焊区和互连网络的分布情况求解出单探针运动的最短或较短路径是单探针测试的关键.

考虑到模拟退火算法具有强通用性和高程度优化的特点,本文将采用模拟退火算法对启发式算法获得的 MCM 互连基板单探针测试路径进行二次优化改进,以期获得质量更好的解,进一步减小单探针移动的总距离,从而提高测试效率,降低测试成本.

2 单探针测试路径优化问题描述

单探针测试路径优化就是在待测焊区集合中寻找一个序列,使得测试路径的总距离最短.求解探针路径时,首先根据 CAD 软件所提供的电路网表信息得到 MCM 基板的互连网络以及各焊区的坐标数据,将探针在两个焊区间移动的距离定义为两个焊区间的 Euclidean 距离,从而求解优化的单探针测

试路径实际上就是通过确定恰当的移动顺序来使总的测试成本最小,也就是在待测焊区集合中寻找一个序列,使得测试路径的总距离最短.因此,可以采用(1)式作为 MCM 互连基板单探针测试成本问题的数学描述:

$$C = \sum_s \sum_i \sum_j \sum_m \sum_n d_{imjn} P_s(i) [P_{s+1}(j) + P_{s-1}(j)] T_m(i) T_n(j) \quad (1)$$

其中 s 为迭代次数控制参数; i 和 j 为遍寻互连的控制参数; m 和 n 为遍寻互连端点的控制参数; d_{imjn} 表示从互连 i 端点 m 到互连 j 端点 n 的移动成本; P 和 T 分别表示在每次迭代中互连和互连端点遍寻情况,只能取 0 或者 1.

根据实际的测试要求,考虑到迭代中每次只有一个互连的一个端点被测试,探针不应测试同一个互连端点两次,以及保证每次遍寻时,每条互连有一个端点被测试.对于(1)式所描述的优化问题还需要如下的约束条件:

$$\sum_s P_s(i) - 1 = 0 \quad \forall i \quad (2)$$

$$P_s(i)(1 - P_s(i)) = 0 \quad \forall s, i \quad (3)$$

$$T_t(i)(1 - T_t(i)) = 0 \quad \forall t, i \quad (4)$$

$$\sum_s T_s(i) - 1 = 0 \quad \forall i \quad (5)$$

针对上述问题,启发式算法包括插队算法^[2,3]、嵌套插队算法(用移动算法进行优化的插队算法)^[2,3]和基于 LK 2-opt 邻域搜索的移动算法^[4,5]已应用于 MCM 互连基板单探针测试路径优化问题的求解,得到优化了的测试序列 f_0 .实际上,这些测试序列还存在着进一步优化的空间,可以采用模拟退

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60606006)

† 通信作者. Email: xuruqing1972@hotmail.com

2007-03-23 收到,2007-05-21 定稿

火算法对基于启发式算法的 MCM 互连基板单探针测试路径进行二次优化改进,以获得质量更好的解,并进一步减少单探针移动的总距离,降低测试成本,提高测试效率.

3 基于模拟退火算法的二次优化

模拟退火算法最早的思想是由 Metropolis 在 1953 年提出的. Kirkpatrick 等人在 1983 年成功地将模拟退火算法应用在组合优化问题中,其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性^[6].它是在一个给定温度下,搜索从一个状态随机变化到另一个状态,并用一个随机接受准则进行判断,温度缓慢下降,当温度很低时,就以概率 1 收敛于全局最优解上,模拟退火算法具有渐近收敛性.

3.1 模拟退火算法参数控制

模拟退火算法初始温度 T_0 的设置影响模拟退火算法全局搜索性能, T_0 越大,搜索到全局最优解的可能性越大,同时所花费的搜索时间也就越多.综合性能和时间的考虑,在本文中设定初始温度 $T_0 = 30$,结束温度 $T_f = 1$.

模拟退火算法的温度下降规则为按比例下降,即 $T_{i+1} = \alpha T_i$, T_i 为第 i 次迭代温度, $\alpha = 0.97$ 为衰减系数.

退火平衡条件为:若在温度 T_i 时,随机进行 U 次循环,则认为在该温度下,每个分子都已经足够的机会达到最佳位置,因而可以将温度下降到 αT_i ;若在温度 T_i 时,成功对解改进 L 次,相当于退火过程中,已有足够的分子达到最佳位置,也将温度下降到 αT_i .

3.2 2-opt 邻域搜索

在模拟退火算法中,邻域搜索对计算时间和最后解的质量起着举足轻重的作用.邻域搜索是指对

解空间中某个特定的区域进行搜索,最关键的部分在于如何通过变换当前解来得到它的邻域.如果邻域的范围较小,搜索很快会陷入局部最优;如果邻域的范围很大,搜索的效率会很低.

本文采取的邻域搜索方法是 k -opt 方法.当 k 较大时,虽然解的质量较高,但是邻域中解的数目会随着 k 呈指数级增长,搜索时间很长.考虑到要把它应用到网络数目通常较大的 MCM 的基板测试,选用 $k = 2$,即使用 2-opt 邻域搜索的方法^[7].邻域的定义为交换路径中不相邻两条边得到的所有路径的集合,如图 1 所示.假设 (i, j) 和 $(i+1, j+1)$ 是当前可行解的两条边,则 2-opt 法运算后将得到两条新边 $(i, i+1)$ 和 $(j, j+1)$,并对原来的 $i+1$ 和 $j+1$ 之间的路径进行翻转,可得到新解.显然,只有当 $C_{i,j} + C_{i+1,j+1} > C_{i,i+1} + C_{j,j+1}$ ($C_{i,j}$ 为焊区 i 到 j 的测试成本)时,所得到的解才是最优解.

测试序列 f_i 的 2-opt 邻域搜索的算法步骤:

步骤 1:定义 f_i 为当前解;

步骤 2:根据 2-opt 邻域搜索原理变化当前解到当前解的一个邻域,找出邻域中最好的解,定义该解为新解;

步骤 3:如果新解优于当前解,则将当前解用新解代替,重复步骤 2;否则,抛弃新解,停止搜索.

3.3 二次优化算法

采用模拟退火算法对启发式算法结果进行二次优化的算法描述,如下:

步骤 1:将启发式算法得到的结果赋予模拟退火算法的初始序列,令 $f_i = f_0$;

步骤 2:设置控制参数,包括初始温度 T_0 、温度衰减系数 α 、终止温度 T_f 、当前温度迭代次数 u ,当前成功迭代次数 $l = 0$;

步骤 3:采用 2-opt 邻域搜索,构造邻域解 f_j ,且令 $u = u + 1$;

步骤 4:如果 $f_j \geq f_i$,则转步骤 5;否则 $f_i = f_j$,记录当前解为最优解, $l = l + 1$,转步骤 6;

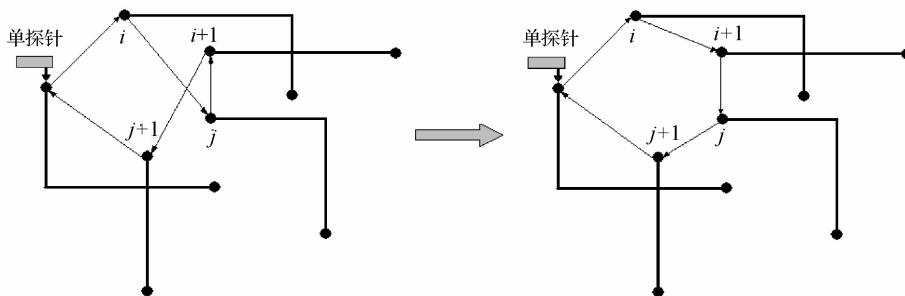


图 1 2-opt 邻域搜索示意图

Fig. 1 2-opt neighborhood search

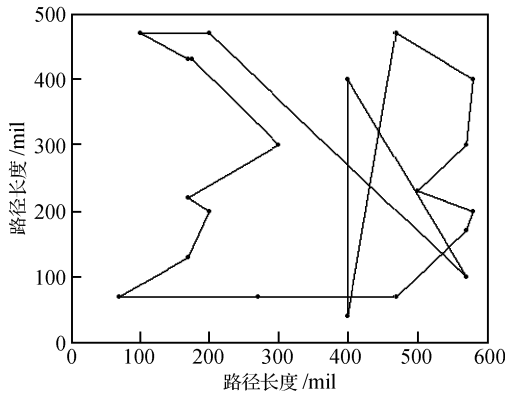


图 2 基于插队算法的单探针测试路径

Fig. 2 Single-ended probe movements of insert algorithm

步骤 5: 计算 $\Delta f_{ij} = f_j - f_i$, 如果 $\exp(-\Delta f_{ij}/T_i) > \epsilon$, ϵ 为 $(0,1)$ 的随机数, 则 $f_i = f_j, l = l + 1$; 否则, 转步骤 6;

步骤 6: 若 $l \geq L, T_{i+1} = \alpha T_i, u = 0, l = 0$, 转步骤 7, 否则转步骤 3;

步骤 7: 如果当前温度 $T_{i+1} \leq T_i$, 计算总移动成本并输出.

4 结果与讨论

本文采用 Matlab 语言编写了采用模拟退火算法对启发式算法获得的 MCM 互连基板单探针测试路径的二次优化程序.

采用 x 方向最大为 600mil 和 y 方向最大为 500mil 的坐标平面来模拟多芯片组件的基板, 随机生成 MCM 互连网络, 且假设每个网络只有 2 个端点.

针对包含 20 个网络的 MCM 互连基板分别采用插队算法和基于模拟退火算法优化的插队算法对单探针移动路径进行了仿真, 结果分别如图 2 和图 3 所示. 可以发现使用插队启发式算法所生成的单探针测试路径由于有许多无谓的穿插运动而大大增加了测试成本, 而基于模拟退火算法优化的插队算法就很好地解决了这个问题, 从而减少了测试成本.

从仿真实验的结果可以看出, 采用插队启发式算法, 由于无谓的穿插运动使所得到的解不够理想, 结果偏离最佳值较大. 而用模拟退火算法进行二次优化的结果要好于单独使用插队启发式算法, 因此在规模较大的 MCM 互连基板的单探针测试路径选择时, 可以考虑用模拟退火算法对启发式算法所得到的结果进行二次优化.

为了进一步验证本文所提方法的有效性, 同时分别针对包含 20, 34, 98 和 308 个网络的随机生成

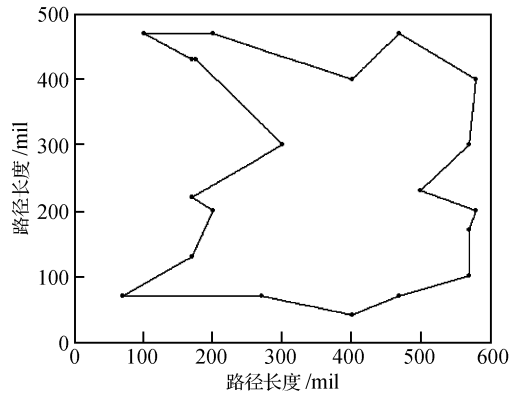


图 3 基于二次优化插队算法的单探针测试路径

Fig. 3 Single-ended probe movements of improved insert algorithm

MCM 互连基板采用各种启发式算法和本文所提出的改进方法进行了优化. 仿真结果分别见表 1~3. 为了直观地表示新方法的改进作用, 定义成本改善系数如下:

$$\text{成本改善系数} = \frac{\text{启发式算法优化的成本} - \text{使用 SA 算法二次优化的成本}}{\text{启发式算法优化的成本}} \times 100\% \quad (6)$$

表 1 插队算法的二次优化结果

Table 1 Improved optimization of insertion algorithm

网络数	插队算法/mil	(插队算法+SA)/mil	成本改善系数/%
20	6238	2097	66.4
34	7842	2801	64.3
98	8766	2843	67.6
308	36113	3528	90.2

表 2 嵌套插队算法的二次优化结果

Table 2 Improved optimization of nested insertion algorithm

网络数	嵌套插队算法 /mil	(嵌套插队算法+SA) /mil	成本改善系数 /%
20	3573	2202	38.4
34	4443	665	40.0
98	6203	2597	58.1
308	10734	3556	66.9

表 3 2-opt 移动算法的二次优化结果

Table 3 Improved optimization of 2-opt shuffle algorithm

网络数	2-opt 移动算法 /mil	(2-opt 移动算法+SA) /mil	成本改善系数 /%
20	2510	2052	18.2
34	5804	2700	53.5
98	6799	2591	61.9
308	9010	4206	53.3

从表 1,2,3 看出,基于模拟退火算法的二次优化相对于启发式算法如插队算法、嵌套插队算法和 2-opt 移动算法等得到的优化路径结果有明显的改善.其中对插队算法的二次优化结果改进最为明显,针对 5IC308 网络的成本改善系数甚至高达 90.2%.同时发现,在应用模拟退火算法进行二次优化时,基本满足互连网络越复杂,其成本改善效果越明显的规律.因此,所提出的基于模拟退火算法对启发式算法二次优化的方法,通过对启发式算法进行优化,使测试成本得到改善,得到了更为合理的多芯片组件单针测试路径,从而达到提高测试效率的目的,特别适合于复杂的互连网络.

5 结论

针对 MCM 基板互连测试所采用的单探针技术,采用模拟退火算法对启发式算法得到的探针路径进行了二次优化.仿真结果显示,本文所提方法与已有的启发式优化算法相比,可以得到质量更好的探针移动路径,从而可以有效地降低测试成本,互连网络越复杂,改进效果越明显,最高成本改善系数甚

至高达 90.2%,可以有效提高测试效率.

参考文献

- [1] Naka Y, Tanaka N, Naito T. Highly reliable and low-cost multi-chip module composed of wafer process packages. *Electronic Components and Technology Conference*, 2003: 881
- [2] Pendurkar R, Tovey C, Chatterjee A. Single-probe traversal optimization for testing of MCM substrate interconnections. *IEEE Trans CAD*, 1999, 18(8): 1178
- [3] Pendurkar R, Chatterjee A, Tovey C. Optimal single-probe traversal algorithm for testing of MCM substrates. *ICCAD*, 1996, 10: 396
- [4] Yan Rongchang, Kim B C. A novel routing algorithm for MCM substrate verification using single-end probe. *Proceedings of VLSI Test Symposium*, 1998, 4: 266
- [5] Yan Rongchang, Kim B C. A probe routing algorithm for MCM substrate test. *Proceedings of Multichip Modules and High Density Packaging*, 1998, 4: 15
- [6] Xing Wenxun, Xie Jinxing. *Computational method of modern optimization*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese)[刑文训, 谢金星. 现代优化计算方法. 北京: 清华大学出版社, 2003]
- [7] Potvin J Y, Rousseau J M. An exchange heuristic for routing problems with time windows. *J Oper Res Soc*, 1995, 46(12): 1433

A Second Single-Probe Traversal Optimization for MCM Substrate*

Xu Ruqing^{1,2,†}, Dong Gang¹, Huang Weiwei¹, and Yang Yintang¹

(1 Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)
(2 Department of Advanced Research, CETC, Beijing 100846, China)

Abstract: For the single-probe technology used to test MCM substrate, this paper presents a second single-probe traversal optimization approach based on a simulated annealing algorithm. Compared with previous heuristic algorithms, significant improvements are achieved using the proposed algorithm, and test cost is reduced dramatically by 90.2%.

Key words: single probe test; simulated annealing algorithm; second optimization

PACC: 2570A **EEACC:** 4270

Article ID: 0253-4177(2007)10-1652-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60606006)

† Corresponding author. Email: xuruqing1972@hotmail.com

Received 23 March 2007, revised manuscript received 21 May 2007