

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-282108

(P2008-282108A)

(43) 公開日 平成20年11月20日(2008.11.20)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G06F 17/50 (2006.01)	G06F 17/50 658H	5B046
H01L 21/82 (2006.01)	G06F 17/50 658U	5F064
	H01L 21/82 C	
	G06F 17/50 658F	

審査請求 未請求 請求項の数 14 O L (全 40 頁)

(21) 出願番号	特願2007-123980 (P2007-123980)	(71) 出願人	504202472 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構
(22) 出願日	平成19年5月8日(2007.5.8)		東京都港区南麻布四丁目6番7号
特許法第30条第1項適用申請有り 社団法人情報処理学会、「情報処理学会研究報告」、第2007巻、第4号、平成19年1月22日発行		(74) 代理人	100097320 弁理士 宮川 貞二
		(74) 代理人	100100398 弁理士 柴田 茂夫
		(74) 代理人	100123892 弁理士 内藤 忠雄
		(74) 代理人	100131820 弁理士 金井 俊幸
		(74) 代理人	100106437 弁理士 加藤 治彦

最終頁に続く

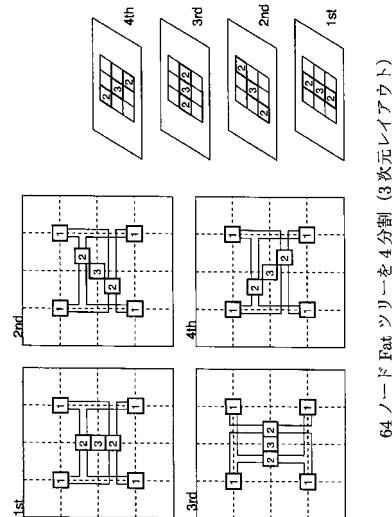
(54) 【発明の名称】 三次元集積電気回路の配線構造及びそのレイアウト方法

(57) 【要約】

【課題】複数のモジュール間を3次元的に接続する3次元集積電気回路の配線構造において、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減する。

【解決手段】本発明による三次元集積電気回路の配線構造は、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は前記二次元集積電気回路モジュールのほぼ中央を貫通する貫通ビアを通して構成され、前記電気回路モジュール及び前記交換接続手段とを接続する配線構成をFat Treeトポロジ又はFat H-Treeトポロジを用いて構成される。

【選択図】 図13



64 ノード Fat ツリーを4分割 (3次元レイアウト)

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって；

前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され；

前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリートポロジを用いて構成される；

三次元集積電気回路の配線構造。

10

【請求項 2】

複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって；

前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され；

前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットエイチツリートポロジを用いて構成される；

三次元集積電気回路の配線構造。

20

【請求項 3】

前記交換接続手段を制御する制御手段と前記交換接続手段と前記制御手段とを接続する制御信号線を備え；

前記二次元集積電気回路モジュール間に布設される制御信号線は貫通ビアを通して配線される；

請求項 1 又は請求項 2 に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 4】

前記貫通ビアの少なくとも 1 つは前記二次元集積電気回路モジュールのほぼ中央を貫通する；

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか 1 項に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

30

【請求項 5】

各電気回路領域は同一寸法の正方形又は長方形である；

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 6】

下位の交換接続手段に繋がる上位の交換接続手段は 2 個または 4 個である；

請求項 1 に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 7】

電気回路モジュールを二次元平面に 2 行 2 列に配置して第 1 レイヤモジュールを構成し；

40

第 1 レイヤモジュールを二次元平面に 2 行 2 列に配置して第 2 レイヤモジュールを構成し；

第 $m - 1$ レイヤモジュールを二次元平面に 2 行 2 列に配置して第 m レイヤモジュールを構成し；

第 m レイヤモジュールを三次元空間に 4 層積層して第 $m + 1$ レイヤモジュールを構成し；

第 $m + 1$ レイヤモジュールを三次元空間に 4 層積層して第 $m + 2$ レイヤモジュールを構成し；

第 $n - 1$ レイヤモジュールを三次元空間に 4 層積層して第 n レイヤモジュールを構成し
($1 < m < n$ とする) ；

50

4 個の第 1 レイヤモジュールの面心付近に 4 つの電気回路領域と 2 つ又は 4 つの第 2 ランク交換接続手段に繋がる第 1 ランク交換接続手段を備え；

4 個の第 2 レイヤモジュールの面心付近に 4 つの第 1 ランク交換接続手段と 2 つ又は 4 つの第 3 ランク交換接続手段に繋がる第 2 ランク交換接続手段を備え；

4 個の第 $m - 1$ レイヤモジュールの面心付近に 4 つの第 $m - 2$ ランク交換接続手段と 2 つ又は 4 つの第 m ランク交換接続手段に繋がる第 $m - 1$ ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 m レイヤモジュールの各層に 4 つの第 $m - 1$ ランク交換接続手段と 2 つ又は 4 つの第 $m + 1$ ランク交換接続手段に繋がる第 m ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 m レイヤモジュールを貫き 4 つの第 m ランク交換接続手段と第 $m + 1$ ランク交換接続手段を繋ぐ第 m の垂直方向配線を備え；

4 層の第 $m + 1$ レイヤモジュールの各層に 4 つの第 m ランク交換接続手段と 2 つ又は 4 つの第 $m + 2$ ランク交換接続手段に繋がる第 $m + 1$ ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 $m + 1$ レイヤモジュールを貫き 4 つの第 $m + 1$ ランク交換接続手段と第 $m + 2$ ランク交換接続手段を繋ぐ第 $m + 1$ の垂直方向配線を備え；

4 層の第 $n - 1$ レイヤモジュールの各層に 4 つの第 $n - 2$ ランク交換接続手段と 2 つ又は 4 つの第 n ランク交換接続手段に繋がる第 $n - 1$ ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 $n - 1$ レイヤモジュールを貫き 4 つの第 $n - 1$ ランク交換接続手段と第 n ランク交換接続手段を繋ぐ第 $n - 1$ の垂直方向配線を備える；

請求項 1 に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 8】

電気回路モジュールを二次元平面に 2 行 2 列に配置して第 1 レイヤモジュールを構成し

；

第 1 レイヤモジュールを二次元平面に 2 行 2 列に配置して第 2 レイヤモジュールを構成し；

第 $m - 1$ レイヤモジュールを二次元平面に 2 行 2 列に配置して第 m レイヤモジュールを構成し；

4 個の第 1 レイヤモジュールの面心付近に 4 つの電気回路領域と 1 つの第 2 ランク交換接続手段に繋がる第 1 ランク交換接続手段を備え；

4 個の第 2 レイヤモジュールの面心付近に 4 つの第 1 ランク交換接続手段と 1 つの第 3 ランク交換接続手段に繋がる第 2 ランク交換接続手段を備え；

4 個の第 $m - 1$ レイヤモジュールの面心付近に 4 つの第 $m - 2$ ランク交換接続手段と 1 つの第 m ランク交換接続手段に繋がる第 $m - 1$ ランク交換接続手段を備え；

前記全ての第 1 ランク交換接続手段乃至第 $m - 1$ ランク交換接続手段を右方向及び下方向に 1 モジュールずつ循環シフトした位置に第 1 ランク交換接続手段乃至第 $m - 1$ ランク交換接続手段を備え；

第 m レイヤモジュールを三次元空間に 4 層積層して第 $m + 1$ レイヤモジュールを構成し；

第 $m + 1$ レイヤモジュールを三次元空間に 4 層積層して第 $m + 2$ レイヤモジュールを構成し；

第 $n - 1$ レイヤモジュールを三次元空間に 4 層積層して第 n レイヤモジュールを構成し ($1 < m < n$ とする)；

4 層の第 m レイヤモジュールの重心付近の第 $m - 1$ レイヤモジュールに 4 つの第 $m - 1$ ランク交換接続手段と 1 つの第 $m + 1$ ランク交換接続手段に繋がる第 m ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 m レイヤモジュールを貫き 4 つの第 m ランク交換接続手段と第 $m + 1$ ランク交換接続手段を繋ぐ第 m の垂直方向配線を備え；

4 層の第 $m + 1$ レイヤモジュールの重心付近の第 m レイヤモジュールに 4 つの第 m ランク交換接続手段と 1 つの第 $m + 2$ ランク交換接続手段に繋がる第 $m + 1$ ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 $m + 1$ レイヤモジュールを貫き 4 つの第 $m + 1$ ランク交換接続手段と第 $m + 2$

10

20

30

40

50

ランク交換接続手段を繋ぐ第 $m + 1$ の垂直方向配線を備え；

4 層の第 $n - 1$ レイヤモジュールの重心付近の第 $n - 2$ レイヤモジュールに 4 つの第 $n - 2$ ランク交換接続手段と 1 つの第 n ランク交換接続手段に繋がる第 $n - 1$ ランク交換接続手段を備え；

4 層の第 $n - 1$ レイヤモジュールを貫き 4 つの第 $n - 1$ ランク交換接続手段と第 n ランク交換接続手段を繋ぐ第 $n - 1$ の垂直方向配線を備え；

前記第 m レイヤモジュール乃至前記第 n レイヤモジュール内の電気回路モジュールの配置は第 n レイヤモジュールを二次元平面に展開配置したときの行列の並びを折畳んで積層した順序に再配置した構成とし；

前記全ての第 1 ランク交換接続手段乃至第 $m - 1$ ランク交換接続手段を右方向及び下方に 1 モジュールずつ循環シフトした位置に配置された第 1 ランク交換接続手段乃至第 $m - 1$ ランク交換接続手段については、前記第 m レイヤモジュール乃至前記第 n レイヤモジュール内の電気回路モジュールの配置を第 n レイヤモジュールを二次元平面に展開配置したときの行列の並びを折畳んで積層した順序に再配置した構成とし；

同一の第 1 レイヤモジュールに属する電気回路モジュールで第 1 ランク交換接続手段と異なる二次元平面に配置されたものと前記第 1 ランク交換接続手段を繋ぐ第 1 の垂直方向配線を備え；

前記再配置した第 m レイヤモジュール乃至第 n レイヤモジュールにおいても前記第 m ランク交換接続手段乃至前記第 n ランク交換接続手段と同様の接続関係を有する；

請求項 2 に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 9】

複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって；

前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向にほぼ直線上に並べて配置された無線送受信手段を介して構成され；

前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリートポロジを用いて構成される；

三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 10】

複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって；

前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向にほぼ直線上に並べて配置された無線送受信手段を介して構成され；

前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットエイチツリートポロジで構成される；

三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 11】

前記電気回路モジュールは空モジュールを含む；

請求項 1 乃至請求項 10 のいずれか 1 項に記載の三次元集積電気回路の配線構造。

【請求項 12】

複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって；

10

20

30

40

50

前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され；

前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリートポロジを用いて構成される；

三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法であって；

前記ファットツリートポロジを前記二次元集積電気回路モジュールに相当するチップ対応に分割するツリー分割工程と；

前記三次元集積電気回路を二次元平面に展開した状態で、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段の配置を行なうノードマッピング工程と；

前記ノードマッピング工程で配置された前記三次元集積電気回路を前記ツリー分割工程で分割した前記二次元集積電気回路モジュールを積層するように折り畳む折り畳み工程と；

前記折り畳み工程で各チップに配置された前記交換接続手段のうちチップ間に分散された上位ランクの交換接続手段間を垂直方向配線でリンクするリンク工程とを備える；

三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法。

【請求項 13】

複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって；

前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され；

前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットエイチツリートポロジを用いて構成される；

三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法であって；

前記ファットエイチツリートポロジを前記二次元集積電気回路モジュールに相当するチップ対応に分割するツリー分割工程と；

前記三次元集積電気回路を二次元平面に展開した状態で、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段の配置を行なうノードマッピング工程と；

前記ノードマッピング工程で配置された前記三次元集積電気回路を前記ツリー分割工程で分割した前記二次元集積電気回路モジュールを積層するように折り畳む折り畳み工程と；

前記折り畳み工程で各チップに配置された前記交換接続手段のうちチップ間に分散された上位ランクの交換接続手段間を垂直方向配線でリンクするリンク工程とを備える；

三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法。

【請求項 14】

請求項 12 又は請求項 13 に記載の三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法をコンピュータに実行させるためのコンピュータ読み取り可能なプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は三次元集積電気回路の配線構造及びそのレイアウト方法に関する。詳しくは、ツリー型のトポロジについて、垂直方向配線を用いて配線長を削減し、配線遅延を短縮可能とする三次元集積電気回路の配線構造及びそのレイアウト方法に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体技術の進歩により、単一チップ上にプロセッサやメモリ、入出力（I/O）インタフェースなど複数の設計モジュールをタイル状に実装できるようになった。このようなタイルアーキテクチャでは、タイルだけでなくタイル同士を結合するための配線ネットワークを含めてチップ上に（主として二次元チップ上に）構成するチップ上ネットワーク（

10

20

30

40

50

Network-on-Chip、略してNoCという。)トポロジが用いられ、そのネットワークトポロジはアプリケーションの性能と面積、消費電力を決定付ける一要素となっている。(非特許文献1参照)

【0003】

近年注目を浴びているのが、チップの3次元化である。3次元集積回路(IC)は複数枚のウエハまたはダイを垂直方向に重ね合わせることで実現される。複数枚のチップを垂直方向に積み重ねることで、個々のチップの寸法を小さく抑えることができ、結果的に配線長および配線遅延を削減できる。(非特許文献2~4参照)

【0004】

図23に2次元ICと3次元ICの比較を示す。図23(a)は通常の2次元ICを、図23(b)はそれと同面積の3次元ICを示す。この3次元ICでは4枚のチップを積層することにより、個々のチップの面積は1/4、チップの両端を結ぶ配線長は1/2に削減される。これに伴い配線遅延及び必要なリピータの数も削減される。

10

【0005】

通常の2次元ICにおいては2-Dメッシュ(Mesh)や2-Dトーラス(Torus)などのグリッド型のトポロジが広く用いられている。3次元ICを想定したNoCの研究はまだ数が少ないが、3-D Meshや3-D Torusをベースにしたものがいくつか報告されている。これらは、通常の2次元NoCで広く用いられる2-D Meshや2-D Torusから容易に拡張できるという利点を持つ。

【0006】

【非特許文献1】Dally, W. J. and Towles, B.: Route Packets, Not Wires: On-Chip Interconnection Networks, Proceedings of the 38th Design Automation Conference, pp. 684-689 (2001)

20

【非特許文献2】Davis, W. R., Wilson, J., Mick, S., Xu, J., Hua, H., Mineo, C., Sule, A. M., Steer, M. and Franzon, P. D.: Demystifying 3D ICs: The Pros and Cons of Going Vertical, IEEE Design & Test of Computers, Vol. 22, No. 6, pp. 498-510 (2005)

30

【非特許文献3】Li, F. and et. al.: Design and Management of 3D Chip Multiprocessors Using Network-in-Memory, Proceedings of the International Symposium on Computer Architecture, pp. 130-141 (2006)

【非特許文献4】Das, S. and et. al.: Technology, Performance, and Computer Aided Design of Three-Dimensional Integrated Circuits, Proceedings of the International Symposium on Physical Design, pp. 108-115 (2004)

40

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかし、3-D Meshでは2-D Meshと比べ、オンチップルータのリンク数が4から6に増え、これに伴いオンチップルータのチャネルバッファおよびクロススイッチの面積が増加する、また、垂直方向のリンクは数十 μ m程度と非常に短いため、パケットが垂直方向に移動する度にルータでラッチする必要はない、すなわちラッチにより電力が余分に消費され遅延も生じるという欠点が指摘されており、ルータのハードウェア量の割りに得られるメリットは大きくない。

【0008】

50

他方、ツリー型トポロジについては、上位リンクの配線長が長くなるため、リンクの配線長が均一なグリッド型トポロジに比べて、配線遅延やリピータ数、消費電力の点で不利となると考えられ、NoCへの適用がためられてきた。しかしながら、3次元化によって上位リンクの配線長を短くでき、上記弱点を克服できると考えられる。また、3次元ICではグリッド型のトポロジに比して性能パフォーマンスが優ることが期待できる。

【0009】

本発明は、複数のモジュール間を接続する集積電気回路の配線構造において、適正なツリー型トポロジで3次元構造を実現することにより、2次元配線構造に比して、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記課題を解決するために本発明の第1の態様における三次元集積電気回路の配線構造は、例えば図8に示すように、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリー(Fat Tree)トポロジを用いて構成される。

【0011】

ここにおいて、交換接続手段とはモジュールを1対多数又は多数対多数の接続が可能な接続手段をいい、ルータ、交換機のスイッチ等が該当する。また、Fat Treeトポロジは例えば図11のような電気回路モジュールと交換接続手段の配線接続関係を規定するトポロジであるが、交換接続手段の上向きリンク数 p 、下向きリンク数 q 及び電気回路モジュールの上向きリンク数 c により複数の態様があり、このような態様のFat Treeを (p, q, c) Fat Treeと称する。このように構成すると、複数のモジュール間を3次元的に接続する三次元集積電気回路の配線構造において、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減できる。

【0012】

上記課題を解決するために本発明の第2の態様における三次元集積電気回路の配線構造は、例えば図19及び図20に示すように、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットエイチツリー(Fat H-Tree)トポロジを用いて構成される。

【0013】

ここにおいてFat H-Treeトポロジは、Fat Treeトポロジと同様に電気回路モジュールと交換接続手段の配線接続関係を規定するトポロジで、発明者達の提案による高パフォーマンスのトポロジである(松谷宏紀、鯉淵道紘、天野英晴:3次元IC向けFat TreeベースNetwork-on-Chips、情報処理学会研究報告2007-ARC-171,2007-EMB-3,p75-80,Jan,2007及び、松谷宏紀、鯉淵道紘、天野英晴:チップ内ネットワークにおけるFat H-Treeトポロジの性能評価、情報処理学会研究報告2006-ARC-169,p109-114,Aug,2006参照)。このように構成すると、複数のモジュール間を3次

10

20

30

40

50

元的に接続する3次元集積電気回路の配線構造において、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減できる。

【0014】

また、本発明の好ましい態様によれば、第1の態様又は第2の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、前記交換接続手段を制御する制御手段と前記交換接続手段と前記制御手段とを接続する制御信号線を備え、前記二次元集積電気回路モジュール間に布設される制御信号線は貫通ビアを通して配線される。このように構成すると、制御系配線についても配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減できる。

【0015】

また、本発明の好ましい態様によれば、以上の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、前記貫通ビアの少なくとも1つは前記二次元集積電気回路モジュールのほぼ中央を貫通する。ここにおいて、貫通ビアは二次元集積電気回路モジュールのほぼ中央を貫通するものに加え、別の位置にあっても良い。また、貫通ビアは連結する最下層の二次元集積電気回路モジュールについては配線接続できれば必ずしも貫通する必要はない。このように構成すると、垂直方向配線の配線長を低減でき、モジュール間の通信遅延を低減できる。

【0016】

また、本発明の好ましい態様によれば、以上の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、例えば図8に示すように、各電気回路領域は同一寸法の正方形又は長方形である。ここにおいて正方形又は長方形の辺の寸法や内角は設計誤差や製造ばらつきにより多少のばらつきが有っても良い。このように構成すると、電気回路モジュールを二次元平面内に無駄なく配置でき、また3次元の配線構造の設計も効率化できる。

【0017】

また、本発明の好ましい態様によれば、第1の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、例えば図8に示すように、下位の交換接続手段に繋がる上位の交換接続手段は2個または4個である。このように構成すると、モジュール間の接続パスを多重ルートにして通信トラヒックの集中を緩和できる。また、単一モジュールへの複数入力を要する演算、複数モジュールへの出力等を効率化できる。

【0018】

また、本発明の好ましい態様によれば、第1の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、例えば図8に示すように、電気回路モジュールを二次元平面に2行2列に配置して第1レイヤモジュールを構成し、第1レイヤモジュールを二次元平面に2行2列に配置して第2レイヤモジュールを構成し、第m-1レイヤモジュールを二次元平面に2行2列に配置して第mレイヤモジュールを構成し、第mレイヤモジュールを三次元空間に4層積層して第m+1レイヤモジュールを構成し、第m+1レイヤモジュールを三次元空間に4層積層して第m+2レイヤモジュールを構成し、第n-1レイヤモジュールを三次元空間に4層積層して第nレイヤモジュールを構成し(1<m<nとする)、4個の第1レイヤモジュールの面心付近に4つの電気回路領域と2つ又は4つの第2ランク交換接続手段に繋がる第1ランク交換接続手段を備え、4個の第2レイヤモジュールの面心付近に4つの第1ランク交換接続手段と2つ又は4つの第3ランク交換接続手段に繋がる第2ランク交換接続手段を備え、4個の第m-1レイヤモジュールの面心付近に4つの第m-2ランク交換接続手段と2つ又は4つの第mランク交換接続手段に繋がる第m-1ランク交換接続手段を備え、4層の第mレイヤモジュールの各層に4つの第m-1ランク交換接続手段と2つ又は4つの第m+1ランク交換接続手段に繋がる第mランク交換接続手段を備え、4層の第mレイヤモジュールを貫き4つの第mランク交換接続手段と第m+1ランク交換接続手段を繋ぐ第mの垂直方向配線を備え、4層の第m+1レイヤモジュールの各層に4つの第mランク交換接続手段と2つ又は4つの第m+2ランク交換接続手段に繋がる第m+1ランク交換接続手段を備え、4層の第m+1レイヤモジュールを貫き4つの第m+1ランク交換接続手段と第m+2ランク交換接続手段を繋ぐ第m+1の垂直方向配線を備え、

10

20

30

40

50

4層の第 $n-1$ レイヤモジュールの各層に4つの第 $n-2$ ランク交換接続手段と2つ又は4つの第 n ランク交換接続手段に繋がる第 $n-1$ ランク交換接続手段を備え、4層の第 $n-1$ レイヤモジュールを貫き4つの第 $n-1$ ランク交換接続手段と第 n ランク交換接続手段を繋ぐ第 $n-1$ の垂直方向配線を備える。

【0019】

ここにおいて、レイヤモジュールの面心とは、当該レイヤモジュールが4個の下位のレイヤモジュール又は4個の電気回路モジュールで構成されている場合には、これら4個のモジュールの頂点が集まる位置をいう。また、 m 及び n は整数で、 $1 < m < n$ である。このように構成すると、3次元空間にFat Treeトポロジを適用した、配線遅延が低減された三次元集積電気回路を実現できる。

【0020】

また、本発明の好ましい態様によれば、第2の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、例えば図19及び図20に示すように、電気回路モジュールを二次元平面に2行2列に配置して第1レイヤモジュールを構成し、第1レイヤモジュールを二次元平面に2行2列に配置して第2レイヤモジュールを構成し、第 $m-1$ レイヤモジュールを二次元平面に2行2列に配置して第 m レイヤモジュールを構成し、4個の第1レイヤモジュールの面心付近に4つの電気回路領域と1つの第2ランク交換接続手段に繋がる第1ランク交換接続手段を備え、4個の第2レイヤモジュールの面心付近に4つの第1ランク交換接続手段と1つの第3ランク交換接続手段に繋がる第2ランク交換接続手段を備え、4個の第 $m-1$ レイヤモジュールの面心付近に4つの第 $m-2$ ランク交換接続手段と1つの第 m ランク交換接続手段に繋がる第 $m-1$ ランク交換接続手段を備え、前記全ての第1ランク交換接続手段乃至第 $m-1$ ランク交換接続手段を右方向及び下方向に1モジュールずつ循環シフトした位置に第1ランク交換接続手段乃至第 $m-1$ ランク交換接続手段を備え、第 m レイヤモジュールを三次元空間に4層積層して第 $m+1$ レイヤモジュールを構成し、第 $m+1$ レイヤモジュールを三次元空間に4層積層して第 $m+2$ レイヤモジュールを構成し、第 $n-1$ レイヤモジュールを三次元空間に4層積層して第 n レイヤモジュールを構成し($1 < m < n$ とする)、4層の第 m レイヤモジュールの重心付近の第 $m-1$ レイヤモジュールに4つの第 $m-1$ ランク交換接続手段と1つの第 $m+1$ ランク交換接続手段に繋がる第 m ランク交換接続手段を備え、4層の第 m レイヤモジュールを貫き4つの第 m ランク交換接続手段と第 $m+1$ ランク交換接続手段を繋ぐ第 m の垂直方向配線を備え、4層の第 $m+1$ レイヤモジュールの重心付近の第 m レイヤモジュールに4つの第 m ランク交換接続手段と1つの第 $m+2$ ランク交換接続手段に繋がる第 $m+1$ ランク交換接続手段を備え、4層の第 $m+1$ レイヤモジュールを貫き4つの第 $m+1$ ランク交換接続手段と第 $m+2$ ランク交換接続手段を繋ぐ第 $m+1$ の垂直方向配線を備え、4層の第 $n-1$ レイヤモジュールの重心付近の第 $n-2$ レイヤモジュールに4つの第 $n-2$ ランク交換接続手段と1つの第 n ランク交換接続手段に繋がる第 $n-1$ ランク交換接続手段を備え、4層の第 $n-1$ レイヤモジュールを貫き4つの第 $n-1$ ランク交換接続手段と第 n ランク交換接続手段を繋ぐ第 $n-1$ の垂直方向配線を備え、前記第 m レイヤモジュール乃至前記第 n レイヤモジュール内の電気回路モジュールの配置は第 n レイヤモジュールを二次元平面に展開配置したときの行列の並びを折畳んで積層した順序に再配置した構成とし、前記全ての第1ランク交換接続手段乃至第 $m-1$ ランク交換接続手段を右方向及び下方向に1モジュールずつ循環シフトした位置に配置された第1ランク交換接続手段乃至第 $m-1$ ランク交換接続手段については、前記第 m レイヤモジュール乃至前記第 n レイヤモジュール内の電気回路モジュールの配置を第 n レイヤモジュールを二次元平面に展開配置したときの行列の並びを折畳んで積層した順序に再配置した構成とし、同一の第1レイヤモジュールに属する電気回路モジュールで第1ランク交換接続手段と異なる二次元平面に配置されたものと前記第1ランク交換接続手段を繋ぐ第1の垂直方向配線を備え、前記再配置した第 m レイヤモジュール乃至第 n レイヤモジュールにおいても前記第 m ランク交換接続手段乃至前記第 n ランク交換接続手段と同様の接続関係を有する。

【0021】

10

20

30

40

50

ここにおいて、レイヤモジュールの重心付近とは、二次元平面での面心付近で、さらに三次元積層構造の垂直方向においても中心に近いことをいい、当該レイヤモジュールが4層の下位のレイヤモジュールで構成されている場合には、第2層目又は第3層目が該当する。この下位のレイヤモジュールがさらに下位の4層のレイヤモジュールで構成されている場合には、垂直方向においてできるだけ中心に近い1層に配置されるのが好ましい。このように構成すると、3次元空間にFat Treeトポロジを適用した、配線遅延が低減された三次元集積電気回路を実現できる。

【0022】

上記課題を解決するために本発明の第3の態様における三次元集積電気回路の配線構造は、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向にほぼ直線上に並べて配置された無線送受信手段を介して構成され、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリートポロジを用いて構成される。

10

【0023】

ここにおいて、配線には無線による配線を含むものとする。また、無線送受信手段として一体化された送受信回路を用いても良く、個別の送信回路と受信回路とを用いても良い。このように構成すると、複数のモジュール間を3次元的に接続する三次元集積電気回路の配線構造において、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減できる。

20

【0024】

上記課題を解決するために本発明の第4態様における三次元集積電気回路の配線構造は、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向にほぼ直線上に並べて配置された無線送受信手段を介して構成され、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリートポロジを用いて構成される。

30

【0025】

このように構成すると、複数のモジュール間を3次元的に接続する三次元集積電気回路の配線構造において、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減できる。

【0026】

また、以上の態様の三次元集積電気回路の配線構造において、前記電気回路モジュールは空モジュールを含む。ここにおいて、空モジュールは電気回路を搭載していないモジュールであり、今後電気回路を搭載したモジュールに置換が予定されているものでも良く、本来電気回路が不要で空きスペースになっているものでも良い。このように構成すると、モジュール数(コア数)が 4^n 等に該当しない場合にも本発明の配線構造を適用できる。

40

【0027】

上記課題を解決するために本発明の第1の態様における三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法は、例えば図14に示すように、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気

50

回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットツリートポロジを用いて構成される三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法であって、前記ファットツリートポロジを前記二次元集積電気回路モジュールに相当するチップ対応に分割するツリー分割工程（S10）と、前記三次元集積電気回路を二次元平面に展開した状態で、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段の配置を行なうノードマッピング工程（S20）と、前記ノードマッピング工程（S20）で配置された前記三次元集積電気回路を前記ツリー分割工程（S10）で分割した前記二次元集積電気回路モジュールを積層するように折り畳む折り畳み工程（S30）と、前記折り畳み工程（S30）で各チップに配置された前記交換接続手段のうちチップ間に分散された上位ランクの交換接続手段間を垂直方向配線でリンクする垂直リンク工程（S40）とを備える。このように構成すると、本発明の第1の態様における三次元集積電気回路の配線構造を効率的に実現できる。なお、第3の態様における三次元集積電気回路の配線構造については、垂直リンク工程（S40）の貫通ビアを無線配線に代えることにより、同様に実現可能である。

10

【0028】

上記課題を解決するために本発明の第2の態様における三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法は、例えば図14に示すように、複数の電気回路モジュールと、前記電気回路モジュールを相互に交換接続する交換接続手段と、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線とで構成される二次元集積電気回路モジュールを三次元的に積層して構成される三次元集積電気回路の配線構造であって、前記二次元集積電気回路モジュール間の配線は複数の前記二次元集積電気回路モジュールをその二次元平面に垂直な方向に貫通する貫通ビアを通して布設され、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段とを接続する配線及び前記交換接続手段間を接続する配線はファットエイチツリートポロジを用いて構成される三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法であって、前記ファットエイチツリートポロジを前記二次元集積電気回路モジュールに相当するチップ対応に分割するツリー分割工程（S10）と、前記三次元集積電気回路を二次元平面に展開した状態で、前記電気回路モジュールと前記交換接続手段の配置を行なうノードマッピング工程（S20）と、前記ノードマッピング工程（S20）で配置された前記三次元集積電気回路を前記ツリー分割工程（S10）で分割した前記二次元集積電気回路モジュールを積層するように折り畳む折り畳み工程（S30）と、前記折り畳み工程（S30）で各チップに配置された前記交換接続手段のうちチップ間に分散された上位ランクの交換接続手段間を垂直方向配線でリンクする垂直リンク工程（S40）とを備える。このように構成すると、本発明の第1の態様における三次元集積電気回路の配線構造を効率的に実現できる。なお、第3の態様における三次元集積電気回路の配線構造については、垂直リンク工程（S40）の貫通ビアを無線配線に代えることにより、同様に実現可能である。

20

30

【0029】

また、本発明は、第1又は第2の態様の三次元集積電気回路の配線構造のレイアウト方法をコンピュータに実行させるためのコンピュータ読み取り可能なプログラムとして実現できる。

40

【発明の効果】**【0030】**

本発明によれば、複数のモジュール間を接続する集積電気回路の配線構造において、適正なツリー型トポロジで3次元構造を実現することにより、2次元構造に比して、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減することができる。

【発明を実施するための最良の形態】**【0031】****[配線トポロジ]**

50

以下に、図面に基づき本発明の実施の形態について説明する。まず、NoCで用いられる2次元及び3次元配線のトポロジについて説明する。

【0032】

図1に、リンク数が小さく対称な2次元レイアウトが可能なトポロジの代表例を示す。図1(a)に2-D Mesh、図1(b), (e)に2-D Torus、図1(c)にエイチツリー(H-Tree)、図1(d)にFat Treeのトポロジを示す。各トポロジにおいて、複数のルータが行列で配列され、四角はルータ、丸はコアをそれぞれ表す。図1(a)の2-D Meshは、隣り合うルータを格子状に配線したもので、Rawプロセッサ、Tripsプロセッサ、ストリーム処理向けNoCであるaSOC(Adaptive System on a Chip)、picoChip社の超並行処理プロセッサレイなどに幅広い用途で用いられている。図1(e)の2-D Torusは、2-D Meshの配線に加え、ネットワークの両端のコアを結ぶラップアラウンド(wrap-around)チャンネルを有している。図1(b)はこれを、チャンネル長が均一になるようにコアの行、列を0, 3, 1, 2の順に配置換えしたものである。2-D TorusはIMEC社のNoCなどで用いられている。図1(c)のH-Treeは、4分木配線構造を取る。すなわち、4個のコアをレベル1ルータで交換接続し、さらに4個のレベル1ルータをレベル2ルータで交換接続し、ツリー構造で通信対象を拡大する方式である。このため、2次元平面実装に適しているが、トラフィックがツリーの上位のルータ付近に集中しやすいという問題がある。H-Treeはアンドレ・デホン(Andre Dehon)らが提案した計算システムSCORE(Stream Computations Organized for Reconfigurable Execution)やQuickSilver社のACM(Adaptive Computing Machine)などのリコンフィギャラブルシステムで利用されている。

10

20

【0033】

次に、本発明の3次元配線に適用するトポロジであるFat Treeについて説明する。図1(d)のFat TreeはH-Treeにおけるツリー構造を多重化したものであるが、ルータの上向きリンク数 p 、下向きリンク数 q 、コアの上向きリンク数 c の組み合わせがあり、これを (p, q, c) で表わす。図1(d)のFat Treeは $(2, 4, 2)$ Fat Treeと表わされる。H-Treeに比して多重化した上位ツリーにより経路分散が可能で、トラフィックの集中が緩和される。既存のNoCへの適応例としてはSPINなどがある。

30

【0034】

これまで、ツリー型トポロジは、上位のルータ付近のリンクの長さが長くなるため配線遅延の点で不利である、すなわち、Fat Treeでは最上位リンクの配線長が長くなり、このため、リンクの配線長が均一なグリッド型トポロジに比べて、配線遅延やリピータ数、消費電力の点で不利となると考えられてきたが、我々の検討結果、3次元化によってこの弱点を克服できることが分かった。ここでは、Fat Treeおよび後述するFat H-Treeトポロジを用いて3次元NoCに適した配線構造を提案し、チップ面積、配線量、最長配線長、配線遅延、リピータ数、消費電力について評価する。モジュール間の相互接続トポロジとしてルータのリンク数を抑えつつ、一定の高い性能を実現するツリーの多重化を基にする。全体の配線長を短くするために3次元方向のルータ間の配線に貫通ビア等を用いるが、配線が交錯しないように、最上位ランクのルータの周りに次上下位レベルのルータを分散配置する。

40

【0035】

図2に64コアFat Treeのツリー構造の例を示す。64コアをランク1ルータ(第1ランクルータのこと、以下第 n ランクルータをランク n ルータという)からランク3ルータを介して相互接続する階層構造である。四角の中の数字はルータのランク数である。ランク1ルータとランク2ルータ間の配線及びランク2ルータとランク3ルータ間の配線は2重化されており、ランク1ルータは4コアと2個のランク2ルータに、ランク2ルータは4個のランク1ルータと2個のランク3ルータに、ランク3ルータは4個のラン

50

ク 2 ルータに接続される。

【 0 0 3 6 】

次に、本発明の他の 3 次元配線に適用するトポロジである Fat H - Tree について説明する。Fat H - Tree はレッドツリー (Red Tree) とブラックツリー (Black Tree) と呼ばれる 2 つの H - Tree を組み合わせたトポロジであり、トーラス構造を内包している。すなわち、Black Tree を介してネットワークの両端のコア (第 0 行と第 7 行、第 0 列と第 7 列) を結ぶラップアラウンドチャンネルを有している。各コアは 2 つのリンクを有し、1 つを Red Tree との接続に、他の 1 つを Black Tree との接続に用いる。Fat H - Tree は Fat Tree より構成が複雑であるが、コスト性能比で優れる。

10

【 0 0 3 7 】

図 3 に 6 4 コア Red Tree のツリー構造の例を示す。丸で描かれた各コアには 2 次元座標 (x, y) がそれぞれ割り当てられる。以降、コアをランク 0 ルータとも呼ぶ。まず、ランク 0 ルータに対し式 (1) で求まる Red Tree 座標 $R(r_0, r_1, \dots, r_i, \dots, r_{n-1})$ を割り当てる。ここで、i はランクを表す。

$$r_i = ((x / 2^i) \bmod 2) + 2 \times ((y / 2^i) \bmod 2) \quad (1)$$

Red Tree 座標 $R(r_0, r_1, \dots, r_{n-1})$ となるランク 0 ルータの上位ルータをランク 1 ルータと呼び、 $R(r_1, \dots, r_{n-1})$ の Red Tree 座標を割り当てる。同様の方法でランク 2 ルータからランク n ルータにも Red Tree 座標を割り当てる。ただし、最上位ランク (ランク n) ルータの Red Tree 座標を R とする。また、任意のランクのルータに繋がる次位ランクのルータは 4 つずつになり、これらのルータに付する符号の順序は左上を 0、右上を 1、左下を 2、右下を 3 とする。例として図中にランク 3 ルータ R、ランク 2 ルータ $R(0)$ 、ランク 1 ルータ $R(2, 0)$ 、コア $R(2, 2, 0)$ の位置座標を示す。ここで、 $R(0)$ はランク 3 ルータ R につながる 4 つのランク 2 ルータのうち左上のものを表し、 $R(2, 0)$ は $R(0)$ につながる 4 つのランク 1 ルータのうち左下のものを表し、 $R(2, 2, 0)$ は $R(2, 0)$ につながる 4 つのコアのうち左下のものを表す。

20

【 0 0 3 8 】

図 4 に 6 4 コア Black Tree のツリー構造の例を示す。Black Tree は Red Tree の座標を右方向及び下方向に 1 コア分ずつずらしたものである。

30

【 0 0 3 9 】

図 5 に Red Tree の座標と Black Tree の座標の関係を示す。Red Tree のコア座標 R_i は Black Tree のコア座標 B_i に移る。ルータおよび配線の座標も同様に右方向及び下方向に 1 コア分ずつずれる。さらに、Black Tree の 7 行目のコアは 8 行目、7 列目のコアは 8 列目に移動するが、これを 0 行目、0 列目に移動する。また、第 7 行 7 列目のコアは第 8 行 8 列目に移動するが、これを第 0 行 0 列目に移動する。このずれと移動を循環シフトと称することとする。このためランク 0 ルータの Black Tree 座標 $B(b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_{n-1})$ は式 (2) で求まる。

$$b_i = (((x - 1) \bmod 2^n) / 2^i) \bmod 2 + 2 \times (((y - 1) \bmod 2^n) / 2^i) \bmod 2 \quad (2)$$

40

Black Tree においてもランク 1 ルータからランク n ルータに Black Tree 座標を割り当てる。最上位ランク (ランク n) ルータの Black Tree 座標を B とする。また、任意のランクのルータに繋がる次位ランクのルータは 4 つずつになり、これらのルータに付する符号の順序は左上を 0、右上を 1、左下を 2、右下を 3 とする。例として図中にランク 3 ルータ B、ランク 2 ルータ $B(2)$ 、ランク 1 ルータ $B(1, 2)$ 、コア $B(0, 1, 2)$ の位置座標を示す。ここで、 $B(2)$ は 4 つのランク 2 ルータのうち左下のものを表し、 $B(1, 2)$ は $B(2)$ につながる 4 つのランク 1 ルータのうち右上のものを表し、 $B(0, 1, 2)$ は $B(1, 2)$ につながる 4 つのコアのうち左上のものを表す。

50

【 0 0 4 0 】

図6に64コアFat H-Treeの2次元レイアウトを示す。各コア（ランク0ルータ）に対し、Red TreeおよびBlack Treeを接続したものをFat H-Treeと称する。Fat H-Treeにおいてはトラス構造が形成される。すなわち、各コアはRed Treeのランク1ルータおよびBlack Treeのランク1ルータにつながり、コア-Red Treeのランク1ルータ-コア-Black Treeのランク1ルータ-コアの順序でリンクが形成され、第0行目のコアと第7行目のコア、第0列目のコアと第7列目のコアはBlack Treeのランク1ルータを介して接続され、ラップアラウンドチャンネルが形成される。

【 0 0 4 1 】

10

図7に畳み込み処理されたFat H-Treeの2次元レイアウトを示す。Fat H-Treeは、トラス同様、畳み込むことで2次元チップ上に容易にレイアウトできる。畳み込みとは2次元平面の配置の仕方であり、例えば行、列の配置を0, 7, 1, 6, 2, 5, 3, 4のように並び換えるものである。図6において、配線接続関係を保ちながら、畳み込み処理により再配置したレイアウトが図7に相当し、図6と図7は等価なトポロジである。最上位リンクを除き、Fat H-Treeの各リンクは畳み込みによって配線長が約2倍に延びるが、最上位リンクの配線長は大幅に短縮される。そのため、最上位の次のランクのリンク（第2位リンク）がFat H-Treeの最長配線となる。

【 0 0 4 2 】

20

次にFat Treeの3次元IC向けレイアウトについて説明する。Fat Treeの弱点は、最上位リンク（ランク3ルータとランク2ルータ間の配線）の配線長が長くなることによる配線遅延の増加、リピータ数の増加、およびそれに伴う消費電力の増加である。これらの問題を同時に解決するために、図2で示したFat Treeを半分の寸法から成る4枚のチップに分割し、これらを3次元的に結合する。こうすることで、すべての最上位リンクは距離数十μm程度のチップ間リンクに置き換えられ、配線長の問題は解決される。

【 0 0 4 3 】

30

図8にFat Treeを4分割した例を示す。3-D(2, 4, 1) Fat Treeの例である。Fat Treeの4分割手順は次のとおりである。

（ステップ1：チップの分割）まず、チップの分割を行う。2次元Fat Treeのコア座標 (x_{2D}, y_{2D}) を、次のような3次元座標 (x_{3D}, y_{3D}, z_{3D}) に変換する。

$$x_{3D} = x_{2D} \bmod 2^{n-1}$$

$$y_{3D} = y_{2D} \bmod 2^{n-1}$$

$$z_{3D} = 2 \times (y_{2D} / 2^{n-1}) + (x_{2D} / 2^{n-1})$$

例えば、図2の64コアFat Treeは図8のように4枚の16コアチップに分割される。

（ステップ2：ルータの配置）ルータを各チップに均等に振り分け配置する。図8の例では、各チップは4個のランク1ルータ、2個のランク2ルータ、1個のランク3ルータを有する。

40

（ステップ3：チップ間配線）他のランクに配置されたルータ同士をチップ間配線につなぐ。最上位リンクは、マイクロバンプ、無線、貫通ビアなどのチップ間通信技術を用いてチップ面に対して垂直方向に結合される。

（ステップ4：ルータの再配置）垂直方向のチップ間リンク同士が重ならないように、ルータの位置を調整する。図8の例では、チップの中心にランク3ルータを置き、その周囲に他のランクと重ならないように各ランク2ルータを位置をずらして配置している。これにより最上位リンクはチップ間リンクに置き換えられる。結果的に、最上位リンクの1/2の長さの第2位リンクが最長配線となるため、4分割によって最長配線長は1/2に短縮される。この方法は、(2, 4, 2) Fat Treeなど他の構成のFat Treeに対しても適用できる。

50

【0044】

次に4分割以外の分割方法について説明する。iを正の整数とするとき、チップの 2^i 分割はチップの4分割と2分割を組み合わせることによって実現できる。チップの2分割の場合、2次元のコア座標から3次元座標への変換は次のようになる。

$$\begin{aligned}x_{3D} &= x_{2D} \\ y_{3D} &= y_{2D} \bmod 2^{n-1} \\ z_{3D} &= y_{2D} / 2^{n-1}\end{aligned}$$

これ以外の点については4分割の場合と同じである。チップ間リンクの距離を無視するとき、最上位リンクの長さは2分割によって、縦方向が $1/2$ になり、横方向がそのままなので $3/4$ に短縮される。

10

【0045】

次に、Fat H-Treeの3次元IC向けレイアウトについて説明する。Fat H-Treeでは、畳み込みによって第2位リンク(ランク2ルータとランク1ルータ間の配線、図3の配線長の2倍になる)が最長配線となる。この最長配線の長さはFat Treeの最長配線(ランク3ルータとランク2ルータ間の配線、図2参照)の長さと同じであり、配線遅延、リピータ、および消費電力の増加を引き起こす。ここでは、Fat Treeと同様に、これらの問題を3次元化によって解決する。

【0046】

次に、Fat H-Treeの4分割について説明する。Fat H-Treeは2個のH-Treeの他に2-D Torus構造を内包するため、チップの分割後もこの2-D Torus構造が保存されていなければならない。このためFat H-Treeの分割では、チップの分割時にコア座標の転置処理を行う。

20

【0047】

図9にRed Treeを4分割した例を、図10にBlack Treeを4分割した例を示す。Fat H-Treeの4分割手順は次のとおりである。

(ステップ1:チップの分割)まず、チップの分割を行う。2次元Fat H-Treeのコア座標(x_{2D}, y_{2D})を、次のような3次元座標(x_{3D}, y_{3D}, z_{3D})に変換する。

$$\begin{aligned}x_{3D} &= x_{2D} \bmod 2^{n-1} && (x_{2D} < 2^{n-1} \text{ のとき}) \\ x_{3D} &= 2^{n-1} - (x_{2D} \bmod 2^{n-1}) && (x_{2D} \geq 2^{n-1} \text{ のとき}) \\ y_{3D} &= y_{2D} \bmod 2^{n-1} && (y_{2D} < 2^{n-1} \text{ のとき}) \\ y_{3D} &= 2^{n-1} - (y_{2D} \bmod 2^{n-1}) && (y_{2D} \geq 2^{n-1} \text{ のとき}) \\ z_{3D} &= 2 \times (y_{2D} / 2^{n-1}) + (x_{2D} / 2^{n-1})\end{aligned}$$

30

この処理によって、元のチップはチップの中心を軸に水平方向、および、垂直方向に折り畳まれ4枚のチップに分割される。例えば、図3のRed Treeは図9のように、また、図4のBlack Treeは図10のようにそれぞれ分割される。

(ステップ2:ルータの配置)ルータを各チップに均等に振り分け配置する。この例では、Red Tree(図9参照)およびBlack Tree(図10参照)ともに、各チップに4個のランク1ルータ、1個のランク2ルータを有する。一方、ランク3ルータは、Red Treeはチップ1(第2層目)に、Black Treeはチップ2(第3層目)にそれぞれ1個ずつ有する。

40

(ステップ3:チップ間配線)他のランクに配置されたルータ同士をチップ間配線につなぐ。Black Treeでは最上位ルータに加え、ランク1ルータも異なるランクのコア同士をつないでいる。この様子を図10の端部のコアに接続先のチップを表示して示す)。なお、接続されるコア同士は折り畳まれた時に垂直方向に重なり合うこととなる。

(ステップ4:ルータの再配置)必要に応じて行う。ランク2ルータは垂直方向に重ならないので、ここでは再配置を行わなくても良い。

【0048】

図9および図10のレイアウトを組み合わせたものがFat H-Treeの3次元レイアウトであり、分割後も2-D Torus構造が保存されている。例えば、コアR(

50

1, 0, 0) の 2 ホップ先 (Red Tree のランク 1 ルータ - コア - Black Tree のランク 1 ルータを介する) はコア R (1, 1, 0) であり、その次はコア R (1, 2, 0), コア R (1, 3, 0) と移動した後、チップ 2 に移り、コア R (1, 3, 2), コア R (1, 2, 2), コア R (1, 1, 2), コア R (1, 0, 2) を経て、再びチップ 0 のコア R (1, 0, 0) に戻る。図 6 にこの軌跡を矢印で示す。チップ間を除き 2 ホップ先へは Red Tree と Black Tree 各 1 個のランク 1 ルータを介して配線接続される。またチップ間については、図 7 を参照するとコア R (1, 0, 0) とコア R (1, 0, 2), コア R (1, 3, 0) とコア R (1, 3, 2) は垂直方向に重なり、垂直方向の配線で接続されることが分かる。

【0049】

10

次に、4 分割以外の分割方法について説明する。チップの 2 分割の場合、2 次元のコア座標から 3 次元座標への変換は次のようになる。

$$x_{3D} = x_{2D}$$

$$y_{3D} = y_{2D} \bmod 2^{n-1} \quad (y_{2D} < 2^{n-1} \text{ のとき})$$

$$y_{3D} = 2^{n-1} - (y_{2D} \bmod 2^{n-1}) \quad (y_{2D} \geq 2^{n-1} \text{ のとき})$$

$$z_{3D} = 2 \times (y_{2D} / 2^{n-1}) + (x_{2D} / 2^{n-1})$$

この場合、x 方向のリンクは単一チップ内で完結するため、x 方向に対してのみ図 7 のような畳み込みを行う。これ以外の点については 4 分割の場合と同じである。チップ間リンクの距離を無視するとき、最上位リンクの長さは 2 分割によって 3/4 に短縮される。

【0050】

20

[第 1 の実施の形態]

第 1 の実施の形態では、64 コア、3 階層の Fat Tree トポロジの例を説明する。一般的には、 4^n 個のモジュール間を、2 個の 2 次元平面を積層した 3 次元空間に集積化するために、4 本または 6 本の配線を持つ交換接続手段を用いた Fat Tree で階層的に接続する。

【0051】

図 11 に 64 コア 3 階層の Fat Tree トポロジの例を示す。 $4^3 = 64$ 個のモジュールを 3 階層に積層した 64 コア Fat Tree トポロジである。最下層の第 1 のレイヤには 64 個のコアが存在し、それぞれに電気回路で構成されるモジュールが配置されており、第 i 行第 j 列 ~ 第 $i+1$ 行第 $j+1$ 列 ($i, j = 0 \sim 14$ の偶数) 内の 4 個のモジュールを集めて 1 つの第 1 レイヤモジュールを構成し、第 1 レイヤモジュールにはこれら 4 個のモジュール間を交換接続するランク 1 ルータ、図中 内に「1」と表示) が配置されている。第 1 レイヤモジュールは 16 個存在する。また、ランク 1 ルータは 2 つの上位のランク 2 ルータへのリンクを有し (すなわちルートが 2 重化されている)、4 個のモジュールとこれら 2 個のランク 2 ルータとの交換接続も行う。第 2 のレイヤでは、第 i 行第 j 列 ~ 第 $i+3$ 行第 $j+3$ 列 ($i, j = 0, 4$) 内の 4 個の第 1 レイヤモジュールを集めて 1 つの第 2 レイヤモジュールを構成し、第 2 レイヤモジュールにはこれら 4 個の第 1 レイヤモジュール間を交換接続するランク 2 ルータ (図中 内に「2」と表示) が配置されている。第 2 レイヤモジュールは 8 個存在する。また、ランク 2 ルータは 2 つの上位のランク 3 ルータへのリンクを有し (すなわちルートが 2 重化されている)、4 個の第 1 レイヤモジュールとこれら 2 個のランク 3 ルータとの交換接続も行う。第 3 のレイヤでは、第 i 行第 j 列 ~ 第 $i+7$ 行第 $j+7$ 列 ($i, j = 0$) 内の 4 個の第 2 レイヤモジュールを集めて 1 つの第 3 レイヤモジュールを構成し、第 3 レイヤモジュールにはこれら 4 個の第 2 レイヤモジュール間を交換接続するランク 3 ルータ (図中 内に「3」と表示) が配置されている。第 3 レイヤモジュールは 4 個存在する。このようなツリートポロジを構成することにより、64 個のモジュールのうちの任意の 2 モジュール間の接続が複数ルート ($2 \times 2 = 4$) で可能になる。これは特定のルータへのトラフィックの集中を回避するのに役立つ。

30

40

【0052】

図 12 に 64 コア Fat Tree トポロジを 4 つのチップに分割した構成を示す。各

50

チップは第2レイヤモジュールに対応し、16個のモジュール、4個のランク1ルータ、2個のランク2ルータとこれらの間の配線を含んでいる。2個のランク2ルータがそれぞれ4個のランク1ルータに共に接続されることから、1個のチップには2個の第2レイヤモジュールが重複形成されている。各チップには更に1個のランク3ルータ及び当該ランク3ルータと当該チップに配置された1個のランク2ルータを接続する配線が含まれる。各チップは3次元空間に4層に積層される。異なるチップに存在するランク3ルータとランク2ルータを接続する配線はチップ間を繋ぐ垂直方向配線で接続される。

【0053】

図13に64コアFat Treeトポロジを4つのチップに分割し、4つのチップを積層したときの各ランクのルータ配置とルータ間配線の3次元レイアウトの概要を示す。図13(a)に各チップにおける2次元平面内の各ランクのルータ配置とルータ間配線を、図13(b)に各チップの3次元配置とランク2ルータ、ランク3ルータの配置を示す。図13(a)に示すように、各層のチップにおいて4個のモジュールを2行2列に配置して第1レイヤモジュールが構成され、ランク1ルータは第1レイヤモジュールのほぼ中心に配置され、また、4個の第1レイヤモジュールを2行2列に配置して第2レイヤモジュールが構成され、ランク2ルータは第2レイヤモジュールのほぼ中心に配置される。ランク2ルータと各4個のランク1ルータとはチップ面内の配線により接続される。各チップに第2レイヤモジュールが2重に構成され、4つのチップを積層して第3レイヤモジュールが構成される。第3レイヤモジュールも2重のものが2組合計4つ構成される。また、図13(b)に示すように、最上位のランク3ルータを各チップの2次元平面構造の中心に配置し、ランク2ルータをランク3ルータの隣接周辺に、2次元平面に対して垂直方向に重ならないように配置する。各ランク3ルータから4個のランク2ルータに到る4本の配線のうち、1本は同一層内の1個の隣接するランク2ルータにチップ内で接続され、他の3層のランク2ルータに到る3本は垂直方向配線を4つのチップの中心付近を貫く貫通ビア(最下層は必ずしも貫く必要はない)を通して各層に延び、各層において貫通ビアに隣接する1個のランク2ルータに接続される。例えば、第1層と第3層のランク3ルータは第1層の上、第2層の右上、第3層の右、第4層の右下に隣接配置されたランク2ルータに接続され、第2層と第4層のランク3ルータは第1層の下、第2層の左下、第3層の左、第4層の左上に隣接配置されたランク2ルータに接続される。垂直方向配線は、第1層と第2層間に6本、第2層と第3層間に8本、第3層と第4層間に6本となるが(図12参照)、これらは貫通ビアを通してまとめて配線される。このような配線構造により、モジュールから遠いルータ間の配線長、すなわちランク2ルータとランク3ルータ間の配線長を削減でき、これらの配線における信号の遅延を無視できるようにしている。

【0054】

なお、これまで各ランクのルータを制御する制御手段について言及しなかったが、かかる制御手段を備えるものとし、モジュール間での信号を伝達する配線だけでなく、これらの制御手段と各ランクのルータを接続する制御信号線、さらに電源線についてもチップ間に布設されるものは貫通ビアを通してまとめて配線しても良い。このようにすれば制御線や電源線の遅延も削減できる。

【0055】

図14にFat Treeトポロジの配線レイアウトのアルゴリズムの大略を示す。本実施の形態では64コア(2, 4, 1)Fat Treeの配線レイアウトについて説明する。まず、ファットツリートポロジを二次元集積電気回路モジュールに相当するチップ対応に分割する(ツリー分割工程:S10)。一般的にはコア数 4^n のFat Treeでは 4^n 分割が可能である。ここでは図11のFat Treeを図12のように4分割する。

【0056】

次にノードのマッピング、すなわち、三次元集積電気回路を二次元平面に展開した状態で、電気回路モジュール(コア)と交換接続手段(ルータ)の配置を行なう(ノードマッピング工程:S20)。一般的には 4^n のコアとルータを二次元平面に展開し、コアとル

ータを配置する。ここではまず、 $n = 3$ であり、コアを2行×2列の4コアずつにわけてランク1ルータをその中心に配置して第1レイヤモジュールを形成する。第1レイヤモジュールは全部で16個になる。次に、2行×2列の4つの第1レイヤモジュールのランク1ルータの中心付近にランク2ルータを配置して第2レイヤモジュールを形成し、ランク2ルータとランク1ルータを配線接続する。4つの第1レイヤモジュールに対してランク2ルータは2つ、すなわち第2レイヤモジュールは2重に形成される。第1レイヤモジュールは全部で8個になる。次に、2行×2列の4つの第2レイヤモジュールのランク2ルータの中心付近にランク3ルータを配置して第3レイヤモジュールを形成する。4つの第2レイヤモジュールに対してランク3ルータは2つ、すなわち第3レイヤモジュールは2重に形成される。第3レイヤモジュールは全部で2重のものが2組合計4個形成される。この平面構成は図2に示される。次に、このように構成されたモジュールの各コアに番号を付する。

10

【0057】

図15はコアのマッピングと折り畳みを説明するための図である。コアの番号は図15に示すように、第0行目の第0列から第 $2^n - 1 (= 7)$ 列へ、第1行目の第0列から第 $2^n - 1 (= 7)$ 列へ、 \dots 、第 $2^n - 1 (= 7)$ 行目の第0列から第 $2^n - 1 (= 7)$ 列へ採番する。図15の左側の符号はコアの行を、上側の符号はコアの列を示し、1st~4thはグループ(層)を示す。さらに、ランク1ルータからランク3ルータに番号を付する。ルータの番号は例えばRed Tree座標 $R(r_1, \dots, r_{n-1})$ のように採番する。

20

【0058】

次にノードマッピング工程で配置された三次元集積電気回路をツリー分割工程で分割した二次元集積電気回路モジュール(チップ)を積層するように折り畳む(折り畳み工程: S30)。一般的には $4^n \times m$ 分割するので $n - m$ 重に折り畳むが、ここでは $n = 3$ 、 $m = 2$ で、4重に折り畳む。図15の太枠のように全体を4つにグループに分け、各グループに層番号を付する。第3行目と第4行目の間及び第3列目と第4行列目の間に境界線を引くことにより、4つのグループに分けられる。各グループは第2レイヤモジュールに相当し、 $4 \times 4 = 16$ コアを有する。例えば、左下の第1グループを第1層目、左上の第2グループを第2層目、右上の第3グループを第3層目、右下の第4グループを第4層目とする。第1グループは第3行目と第4行目の間の境界線に沿って第2グループの下に折畳み第1層目とする。第3グループは第3列目と第4行列目の間の境界線に沿って第2グループの上に折畳み第3層目とする。第4グループは第3列目と第4行列目の間の境界線に沿って第3グループと共に折畳み、さらに第3行目と第4行目の間の境界線に沿って第3グループの上に折畳み第4層目とする。このように折畳むと、コアの配置は図19(後述する)、ランク1ルータ、ランク2ルータの配置は図13(a)のようになる。ランク2ルータは各チップすなわち各グループの中心付近に2つずつ(2重に)配置される。ランク3ルータは全体に4個(2重×2組)であり、各チップの中心付近に1つずつ配置される。なお、上記境界線を用いて折り畳めばどのように折り畳んでも良い。

30

【0059】

次に、折り畳み工程で各チップに配置された交換接続手段(ルータ)のうちチップ間に分散された上位ランクの交換接続手段(ルータ)間を垂直方向配線でリンクする(リンク工程: S40)。4チップの中心付近でランク3ルータの近傍に貫通ビアを設け、各チップにおいて垂直方向から見てランク3ルータの周囲にランク2ルータを配置し、ランク3ルータとランク2ルータを配線接続する。各ランク3ルータからは同層の1個のランク2ルータには面内配線で接続され、他の3層のランク2ルータへは垂直配線で接続される。合計12本の垂直配線が1つの貫通ビア内に布設される。この場合に、例えば図13(b)に示すように、8個のランク2ルータが垂直方向に重ならないように配置する。このようにするとランク3ルータから各ランク2ルータへの配線を交錯させずに直線的に形成できる。

40

【0060】

50

[第 2 の実施の形態]

第 2 の実施の形態では、256 コア、4 階層の Fat Tree トポロジの第 1 の例を説明する。図 11 の 3 階層の Fat Tree トポロジを第 3 レイヤモジュールとし、この第 3 レイヤモジュールを 4 層積層して第 4 レイヤモジュールが構成される。チップは全体で 16 層積層される。各第 3 レイヤモジュールにはそれぞれ 4 個、全体で 16 個の第 3 ランク ルータがあり、例えば各チップに配置される。8 個のランク 4 ルータが例えば第 2 層目の第 3 レイヤモジュールの最上層のチップに 4 個、第 3 層目の第 3 レイヤモジュールの最下層のチップに 4 個配置され、これらのランク 3 ルータとランク 4 ルータは各チップのほぼ中心に配置され、8 個のランク 4 ルータと 16 個のランク 3 ルータを接続する配線は、ルータが同一チップ内にある場合は面内配線で隣接接続され、異なるチップ間にある場合は主としてチップ間を繋ぐ垂直方向配線で接続される。

10

【 0061 】

図 16 に 16 個のランク 3 ルータと 8 個のランク 4 ルータ間の配線のトポロジを示す。それぞれの第 3 レイヤモジュールには 4 層のチップが積層されている。さらに第 3 レイヤモジュールを 4 層積層して第 4 レイヤモジュールが構成され、全体で 16 層のチップが積層されている。ランク 3 ルータは各チップに配置される。第 2 層目の第 3 レイヤモジュールの最上層のチップに配置された 4 個のランク 4 ルータのうち、第 k 番目 ($k = 1 \sim 4$) のルータは 4 個の第 3 レイヤモジュールの第 k 層目のチップ (第 2 レイヤモジュール) に配置されたランク 3 ルータに配線接続される。第 3 層目の第 3 レイヤモジュールの最下層のチップに配置された 4 個のランク 4 ルータについても同様に、第 k 番目 ($k = 1 \sim 4$) のルータは 4 個の第 3 レイヤモジュールの第 k 層目のチップ (第 2 レイヤモジュール) に配置されたランク 3 ルータに配線接続される。このように、ランク 3 ルータとランク 4 ルータ間の配線は二重化されている。

20

【 0062 】

図 17 に各第 3 レイヤモジュールの 3 次元配置とランク 3 ルータ、ランク 4 ルータの配置の例を示す。ランク 3 ルータ (図では「3」と表示) とランク 4 ルータ (図では「4」と表示) を結ぶ垂直方向配線は、それぞれのランク 4 ルータから上方向へ 2 本、下方向へ 2 本で、全体で上下各方向へ 16 本ずつ (同層への配線を除くと 15 本ずつ) となり、中央の貫通ビアを通してまとめて配線され、それぞれランク 3 ルータが配置されたチップに延びて隣接するランク 3 ルータに接続される。また、各第 3 レイヤモジュール内でランク 2 ルータとランク 3 ルータを結ぶ垂直方向配線は、第 3 レイヤモジュールの層内を超えて延びることはないので、ランク 3 ルータはランク 4 ルータとの垂直方向配線に隣接して設ければ良く、垂直方向に重ならない方が交錯を避け易いが重ねて設けても良い。

30

【 0063 】

次に配線レイアウトのアルゴリズムについて述べる。256 コア (2, 4, 1) Fat Tree では第 1 の実施の形態に比して 1 階層大きくなっており、コア及びルータが増えている。ツリー分割工程 (S10) では 16 チップに分割するが、チップ内のレイアウトは第 1 の実施の形態と同様である。ノードマッピング工程 (S20) では 256 コアのマッピングを第 0 行第 0 列から第 15 行第 5 列まで行なうが、第 1 の実施の形態と同様の順序で行なえば良く、ランク 1 ルータとランク 2 ルータのマッピングも同様である。ランク 3 ルータとランク 4 は垂直方向配線に関わりチップの中央付近に配置される。折り畳み工程 (S30) については境界線が第 3 行目と第 4 行目の間、第 7 行目と第 8 行目の間、第 11 行目と第 12 行目の間、第 3 列目と第 4 列目の間、第 7 列目と第 8 列目の間、第 11 列目と第 12 列目の間と縦横共 3 本ずつになるが、これらを境界線として折り畳めばどのように折り畳んでも良い。リンク工程 (S40) については第 1 の実施の形態にランク 3 ルータとランク 4 ルータとの垂直方向配線が加わるが、図 17 で説明したように行なえば良い。

40

【 0064 】

[第 3 の実施の形態]

第 3 の実施の形態では、256 コア、4 階層の Fat Tree トポロジの第 2 の例を

50

説明する。図 11 の 3 階層の Fat Tree トポロジを第 3 レイヤモジュールとし、第 3 レイヤモジュールが 1 チップ内の 2 次元平面に構成される。第 3 のレイヤでは、4 個の第 2 レイヤモジュールが 2 行 2 列に配置されて 1 つの第 3 レイヤモジュールを構成し、これら 4 個の第 2 レイヤモジュール間を交換接続するランク 3 ルータが第 3 レイヤモジュールの中心に配置される。1 個のチップには 4 つの第 3 レイヤモジュールと 4 個のランク 3 ルータが存在する。この第 3 レイヤモジュールを 4 層積層して第 4 のレイヤモジュールが構成され、これら 4 層合計 16 個の第 3 レイヤモジュール間を交換接続するランク 4 ルータが 2 個ずつ各第 3 レイヤモジュールの各層すなわち各チップのほぼ中心に配置され、合計 8 つの第 4 レイヤモジュールと 8 個のランク 4 ルータが存在する。ルータ間の配線の接続関係は第 2 の実施の形態と同様である。

10

【 0 0 6 5 】

最上位のランク 4 ルータを各チップの 2 次元平面構造のほぼ中心に 2 個ずつ配置し、ランク 3 ルータをランク 4 ルータの隣接周辺に 4 個ずつ配置する。各ランク 4 ルータから各チップの 4 個のランク 3 ルータに到る 4 本の配線のうち、1 本は同一層内の 1 個の隣接するランク 3 ルータにチップ内で接続され、他の 3 層のランク 3 ルータに到る 3 本は垂直方向配線を 4 つのチップの中心付近を貫く貫通ビアを通して各層に延び、各層において貫通ビアに隣接する 1 個のランク 3 ルータに接続される。例えば、第 1 層、第 2 層、第 3 層、第 4 層の第 1 番目のランク 4 ルータはそれぞれ各層の上、右上、右下に隣接配置されたランク 3 ルータ（各 4 個ずつ）に接続され、第 1 層、第 2 層、第 3 層、第 4 層の第 2 番目のランク 4 ルータはそれぞれ各層の下、左下、左、左上に隣接配置されたランク 3 ルータ（各 4 個ずつ）に接続される。垂直方向配線は、第 1 層と第 2 層間に 6 本、第 2 層と第 3 層間に 8 本、第 3 層と第 4 層間に 6 本となるが、これらは貫通ビアを通してまとめて配線される。

20

【 0 0 6 6 】

次に配線レイアウトのアルゴリズムについて述べる。256 コア (2, 4, 1) Fat Tree では第 1 の実施の形態に比して 1 階層大きくなっており、コア及びルータが増えている。ツリー分割工程 (S10) では 4 チップに分割する。このためチップが第 1、第 2 の実施の形態に比して 1 階層分大きくなっており、第 3 レイヤモジュール、ランク 3 ルータまで含む。ノードマッピング工程 (S20) は第 2 の実施の形態と同様である。折り畳み工程 (S30) については境界線が第 7 行目と第 8 行目の間、第 7 列目と第 8 列目の間になり、縦横共 1 本ずつで第 1 の実施の形態と同じ本数になり、第 1 の実施の形態と同様に折り畳むと理解しやすい。なお、これらを境界線として折り畳めばどのように折り畳んでも良い。リンク工程 (S40) については第 1 の実施の形態におけるランク 2 ルータとランク 3 ルータとの垂直方向配線の関係を本実施の形態におけるランク 3 ルータとランク 4 ルータとの垂直方向配線の関係に代えれば良い。

30

【 0 0 6 7 】

[第 4 の実施の形態]

本実施の形態では、64 コア、3 階層の Fat H-Tree トポロジの例を説明する。Fat H-Tree トポロジは Red Tree と Black Tree と呼ばれる 2 つの H-Tree トポロジを組み合わせたトポロジである。1 つのモジュールは 2 つのリンクを持ち、1 つのリンクを Red Tree との接続に、他の 1 つのリンクを Black Tree との接続に用いる。

40

【 0 0 6 8 】

図 3 の 64 コア Red Tree のツリー構造の例を再度参照する。各コア (モジュール) を で示す。この配線構造は第 1 の実施の形態で示した図 11 の 64 コア Fat Tree トポロジを平面展開したもので、モジュールが 8 × 8 の行列に配置されている。第 3 の実施の形態における第 3 レイヤモジュールの配線構造とほぼ同じであるが、ランク 1 ルータ以上の配線が多重化されていない点異なる。第 i 行第 j 列 ~ 第 $i + 1$ 行第 $j + 1$ 列 ($i, j = 0 \sim 6$ の偶数) 内の 4 つのモジュールがランク 1 ルータに接続されて第 1 レイヤモジュールを構成し、第 i 行第 j 列 ~ 第 $i + 3$ 行第 $j + 3$ 列 ($i, j = 0, 4$) 内の

50

4つの第1レイヤモジュールがランク2ルータに接続されて第2レイヤモジュールを構成し、第*i*行第*j*列～第*i*+7行第*j*+7列(*i*, *j* = 0)内の4つの第2レイヤモジュールがランク3ルータに接続されて第3レイヤモジュールを構成する。

【0069】

図4の64コアBlack Treeのツリー構造の例を再度参照する。各モジュールを で示す。このモジュールの配置及びモジュール間の配線構造は、図3の64コアRed Treeのモジュールの配置及びモジュール間の配線構造を右方向に1モジュール分、下方向に1モジュール分ずらした構造である。そして、Red Treeの第7行目のモジュールが右方向に1モジュール分ずれたものがBlack Treeの第0行目となり、Red Treeの第7列目のモジュールが下方向に1モジュール分ずれたものがBlack Treeの第0列目となり、Red Treeの第7行第7列目のモジュールがBlack Treeの第0行第0列目のモジュールとなる。すなわち、Black TreeのモジュールはRed Treeのモジュールを右方向及び下方向に1モジュールずつ循環シフトしたものである。Black Treeの各モジュール間の配線接続関係は、モジュールの配置を右方向に1モジュール分、下方向に1モジュール分ずらした場合のRed Treeの各モジュール間の配線接続関係と同じである。すなわち、第*i*行第*j*列～第*i*+1行第*j*+1列(*i*, *j* = 1～716の奇数)内の4つのモジュールがランク1ルータに接続されて第1レイヤモジュールを構成し、第*i*行第*j*列～第*i*+3行第*j*+3列(*i*, *j* = 1, 5)内の4つの第1レイヤモジュールがランク2ルータに接続されて第2レイヤモジュールを構成し、第*i*行第*j*列～第*i*+7行第*j*+7列(*i*, *j* = 1)内の4つの第2レイヤモジュールがランク3ルータに接続されて第3レイヤモジュールを構成する。ただし、これらの行列において7行目に該当するモジュールはBlack Treeでは0行目のモジュールとして配置され、7列目に該当するモジュールはBlack Treeでは0列目のモジュールとして配置され、第7行第7列目に該当するモジュールはBlack Treeでは第0行第0列目のモジュールとして配置される。そして、ランク1ルータは0行目と7行目のモジュール、0列目と7列目のモジュールを配線接続する。

【0070】

図18に64コアFat H-Treeトポロジの例を示す。このモジュールの配置及びモジュール間の配線構造は、図3のRed Treeのモジュールの配置及びモジュール間の配線構造と図4のBlack Treeのモジュールの配置及びモジュール間の配線構造とを合せ持つ構造である。配線が二重化されていることにより、特定のルータへのトラフィックの集中を回避できる。

【0071】

図19に64コアFat H-Treeを4分割した時のRed Treeの3次元レイアウトを示す。これは図3のRed Treeのモジュール配置とモジュール間の配線接続構造を4つのチップに分割した時のレイアウトを示すもので、(a)は第1層目のチップのレイアウト、(b)は第2層目のチップのレイアウト、(c)は第3層目のチップのレイアウト、(d)は第4層目のチップのレイアウトを示す。全体構成は第1の実施の形態における第3レイヤモジュールに相当し、同じく第1の実施の形態における第2レイヤモジュールに相当する4つのチップを4層積層して第3レイヤモジュールを構成する。図3のRed Treeの各モジュールに、第0行目を第0列から第7列へモジュール番号0～7を、第1行目を第0列から第7列へモジュール番号8～15を、・・・第7行目を第0列から第7列へモジュール番号56～63を順番に付与する。第2層目を図3の左上側の第2レイヤモジュールとする。第1層目は図3の左下側の第2レイヤモジュールを第2層目となる左上側の第2レイヤモジュールとの境界線にそってその下側に折畳んだときのモジュール番号の配置となる。第3層目は図3の右上側の第2レイヤモジュールを第2層目となる左上側の第2レイヤモジュールとの境界線にそってその上側に折畳んだときのモジュール番号の配置となる。第4層目は図3の右下側の第2レイヤモジュールを第3層目となる右上側の第2レイヤモジュールと共に第2層目となる左上側の第2レイヤモジ

10

20

30

40

50

ジュールの上に折畳んだ後にさらに右上側の第2レイヤジュールとの境界線にそってその上側に折畳んだときのジュール番号の配置となる。このように4つの第2レイヤジュールを積層して第3レイヤジュールを構成する。

【0072】

Red Tree系で第2レイヤジュールは4つ、第3レイヤジュールは1つである。ランク2ルータとランク1ルータを接続する配線はチップ内で接続され、ランク3ルータとランク2ルータを接続する配線は主としてチップ間を繋ぐ垂直方向配線で接続される(同層内では面内配線接続される)。ランク3ルータはRed Tree系では第3層目の第2レイヤジュールを搭載するチップの中央に配置される。これらの配線構造は第1の実施の形態におけるFat Treeトポロジとほぼ同じであるが、ランク2ルータが二重化されず各チップに1個、合計4個である点、ランク3ルータが上記のように合計1個である点と、これらに伴い、これらランク3ルータとランク2ルータを繋ぐ配線の本数が異なる。

10

【0073】

図20に64コアFat H-Treeを4分割した時のBlack Treeの3次元レイアウトを示す。これは図4のBlack Treeのジュール配置とジュール間の配線接続構造を4つのチップに分割した時のレイアウトを示すもので、(a)は第1層目のチップのレイアウト、(b)は第2層目のチップのレイアウト、(c)は第3層目のチップのレイアウト、(d)は第4層目のチップのレイアウトを示す。4つのチップの積層の仕方は図19のRed Treeと同じであり、したがって、各層のチップのジュールの配置は図19のRed Treeと同様であり、そして配線接続構造は図4のジュール間の配線接続構造を採用している。

20

【0074】

この結果、例えば、第1層目のチップでは、Red Treeの場合に比して第1レイヤジュール、第2レイヤジュールが上方向及び右方向にそれぞれ1ジュール分ずれる。ランク1ルータ、ランク2ルータも上方向及び右方向にそれぞれ1ジュール分ずれる。そして、4つのジュール41, 42, 49, 50からなる第1レイヤジュールは第1層目のチップ内に存在するが、4つのジュール43, 44, 51, 52からなる第1レイヤジュールは第1層目に43, 51、第4層目に44, 52と2層のチップにまたがり、ランク1ルータからこれらのジュールを接続する配線は2つのチップを接続する垂直方向配線を含む。ただし、これらのジュールは第1層目と第4層目で垂直方向に重なった位置にあり、1束の垂直方向配線で接続可能である。また、4つのジュール1, 2, 57, 58からなる第1レイヤジュールは第1層目に57, 58、第2層目に1, 2と2層のチップにまたがり、ランク1ルータからこれらのジュールを接続する配線は2つのチップを接続する垂直方向配線を含む。ただし、これらのジュールは第1層目と第2層目で垂直方向に重なった位置にあり、1束の垂直方向配線で接続可能である。また、4つのジュール3, 4, 59, 60からなる第1レイヤジュールは第1層目に59, 第2層目に3、第3層目に4、第4層目に60と4層のチップにまたがり、ランク1ルータからこれらのジュールを接続する配線は4つのチップを接続する垂直方向配線を含む。ただし、これらのジュールは第1層目から第4層目まで垂直方向に重なった位置にあり、1束の垂直方向配線で接続可能である。このような垂直方向配線も貫通ビアを使用できる。

30

40

【0075】

また、第2層目のチップでは、Red Treeの場合に比して第1レイヤジュール、第2レイヤジュールが下方向及び右方向にそれぞれ1ジュール分ずれ、ランク1ルータ、ランク2ルータも下方向及び右方向にそれぞれ1ジュール分ずれ、配線についても第1層目と類似の関係が存在する。また、第3層目のチップでは、Red Treeの場合に比して第1レイヤジュール、第2レイヤジュールが下方向及び左方向にそれぞれ1ジュール分ずれ、ランク1ルータ、ランク2ルータも下方向及び左方向にそれぞれ1ジュール分ずれ、配線についても第1層目と類似の関係が存在する。また、第4層目

50

のチップでは、Red Treeの場合に比して第1レイヤモジュール、第2レイヤモジュールが上方向及び左方向にそれぞれ1モジュール分ずれ、ランク1ルータ、ランク2ルータも上方向及び左方向にそれぞれ1モジュール分ずれ、配線についても第1層目と類似の関係が存在する。なお、図20中の端部にある各ランク1ルータには接続されるモジュールの番号と()内にそのモジュールが存在する層を示している。

【0076】

Black Tree系では、第2レイヤモジュールは4つ、第3レイヤモジュールは1つであり、ランク2ルータが各チップに1個、合計4個、ランク3ルータが合計1個である点はRed Treeの場合と同様であるが、ランク2ルータとランク3ルータの位置が異なる。各第2レイヤモジュールにおいて4つのランク1ルータに接続するランク2ルータは4つのランク1ルータの中央付近に配置され、ランク1ルータとランク2ルータを接続する配線は面内に布設される。また、第3レイヤモジュールにおいて4つのランク2ルータに接続するランク3ルータは第3層目のチップの中央に配置され、ランク2ルータとランク3ルータを接続する配線はチップ間では垂直方向配線となり、貫通ビア内にまとめて布設され、各チップ内で貫通ビアからランク2ルータまで面内配線で繋がれる。

10

【0077】

Fat H-TreeトポロジはRed TreeとBlack Treeと呼ばれる2つのH-Treeトポロジを組み合わせたトポロジである。したがって、その配線構造は両者の配線構造を合わせ持つ。しかし、垂直方向配線を有し、モジュールから遠いルータ間の配線長、すなわちランク2ルータとランク3ルータ間の配線長を削減でき、これらの配線における信号の遅延を殆ど無くしている。

20

【0078】

Fat H-Treeトポロジの配線レイアウトのアルゴリズムも大略は図14で表されるが、細部はFat Treeトポロジの場合と異なる。本実施の形態では64コア3階層Fat H-Treeのツリー構造配線レイアウトについて説明する。まず、ファットエイチツリートポロジを二次元集積電気回路モジュールに相当するチップ対応に分割する(ツリー分割工程：S10)。ここでは4分割する。

【0079】

次に三次元集積電気回路を二次元平面に展開した状態で、電気回路モジュール(コア)と交換接続手段(ルータ)の配置を行なう(ノードマッピング工程：S20)。コアの配置はFat Treeの場合と同様である。他方、ルータの配置はRed TreeではFat Treeの場合と同様であるが、Black TreeではFat Treeに対し1モジュール分下方及び右側に循環シフトしている。また、Red Tree内、Black Tree内では配線の多重化はされていない。

30

【0080】

次にノードマッピング工程で配置された三次元集積電気回路をツリー分割工程で分割した二次元集積電気回路モジュール(チップ)を積層するように折り畳む(折り畳み工程：S30)。折り畳み方はFat Treeの場合と同様である。従って、コアの配置はFat Treeの場合と同様である。他方、ルータの配置は図20に示すように、Red TreeではFat Treeの場合と同様であるが、Black TreeではFat Treeに対し1モジュール分、第1層目が右上に、第2層目が右下に、第3層目が左下に、第4層目が左上にシフトしている。また、第1レイヤモジュールが層間に亘るものがある。ランク2ルータは各チップにRed Treeで1つ、Black Treeで1つ、全体で8つである。ランク3ルータはRed Treeで第2層目中心に1つ、Black Treeで第3層目中心に1つ、全体で2つである。

40

【0081】

次に、折り畳み工程で各チップに配置された交換接続手段(ルータ)のうちチップ間に分散された上位ランクの交換接続手段(ルータ)間を垂直方向配線でリンクする(リンク工程：S40)。4チップの中心に貫通ビアを設け、各チップにおいて垂直方向から見てランク3ルータの周囲にランク2ルータを配置し、ランク3ルータとランク2ルータを配

50

線接続する。2つのランク3ルータからは、それぞれ同層の1つランク2ルータには面内配線で接続され、他の3層のランク2ルータへは垂直方向配線で接続される。合計6本の垂直方向配線が1つの貫通ビア内に布設される。この場合に、例えば図17に示すように、8つのランク2ルータが垂直方向に重ならないように配置する。このようにするとランク3ルータから各ランク2ルータへの配線を交錯させずに直線的に形成できる。また、Black Tree内ではチップのエッジ部分においてランク3ルータとモジュールを接続するための8束の垂直方向配線が設けられる(図20参照)。

【0082】

[第5の実施の形態]

以上の実施形態では4分割Fat Treeトポロジの例を説明したが、第5の実施の形態では2分割Fat H-Treeトポロジの例について説明する。ここでは、64コア3階層のFat H-Treeトポロジを32コア2チップに分割する例を説明する。

【0083】

図21に、64コアFat H-Treeを2分割した時のRed Treeの3次元レイアウトの例を示す。図21(a)は第1層目のチップのレイアウト、図21(b)は第2層目のチップのレイアウトを示す。第1層目は図19における第1層目と第4層目のモジュールを合せて配置を変更したものであり、第2層目のモジュールは図19における第2層目と第3層目のモジュールを合せて配置を変更したものである。2分割の場合、横方向には分割しないので、横方向のモジュールの配置は初めから固定される。本実施の形態では第1層目は左から56, 63, 57, 62, 58, 61, 59, 60の順序、第2層目は左から0, 7, 1, 6, 2, 5, 3, 4の順序であり、この配置は図7のモジュールの配置と同様であり、図6の配置すなわち図19の配置と等価である。縦方向のモジュールの配置は図19の配置と同様である。ランク1ルータとモジュールを接続する配線の関係、ランク2ルータとランク1ルータを接続する配線の関係は第4の実施の形態と同様であり、このため、ランク1ルータの位置は横方向では第0行目と第1行目の間、第2行目と第3行目の間で、縦方向では第1、2、5、6列目の中央となり、ランク2ルータの位置はチップの中央付近となる。これらの配線はチップ内で接続される。ランク2ルータは二重化されず各チップに2個、合計4個である。ランク3ルータは全体に1個で第1層目のチップの中央となり、ランク3ルータから4個のランク2ルータを接続する4本の配線のうち、2本は同一層内の隣接するランク2ルータにチップ内で接続され、他の層のランク2ルータに到る2本はチップ間を繋ぐ垂直方向配線で接続される。なお、図21では各モジュールを正方形で示しているが、縦横比を2:1にするとチップは正方形となり、既存の製造ラインに適合するので好適である。

【0084】

図22に、64コアFat H-Treeを2分割した時のBlack Treeの3次元レイアウトの例を示す。図22(a)は第1層目のチップのレイアウト、図22(b)は第2層目のチップのレイアウトを示す。第1層目は図20における第1層目と第4層目のモジュールを合せて配置を変更したものであり、第2層目のモジュールは図20における第2層目と第3層目のモジュールを合せて配置を変更したものである。横方向のモジュールの配置は初めから固定され、第1層目は左から56, 63, 57, 62, 58, 61, 59, 60の順序、第2層目は左から0, 7, 1, 6, 2, 5, 3, 4の順序である。縦方向のモジュールの配置は図20の配置と同様である。ランク1ルータとモジュールを接続する配線の関係、ランク2ルータとランク1ルータを接続する配線の関係は第4の実施の形態と同様であり、このため、第1層目において、ランク1ルータの位置は横方向では第0行目の上端、第1行目と第2行目の間で、縦方向では第0列目と第1列目の間、第3列目の中央、第4列目の中央、第6列目と第7列目の間となり、ランク2ルータの位置は横方向では第2列目の右から1/4モジュールの位置、第5列目の左から1/4モジュールの位置、縦方向では第0行目と第1行目の間となる。第2層目において、ランク1ルータの位置は横方向では第1行目と第2行目の間、第3行目の下端で、縦方向では第0列目と第1列目の間、第3列目の中央、第4列目の中央、第6列目と第7列目の間となり

、ランク2ルータの位置は横方向では第2列目の右から1/4モジュールの位置、第5列目の左から1/4モジュールの位置、縦方向では第2行目と第3行目の間となる。

【0085】

4つのモジュール40, 47, 48, 55からなる第1レイヤモジュールなどの4つの第1レイヤモジュールは第1層目のチップ内に存在し、4つのモジュール8, 15, 16, 23からなる第1レイヤモジュールなどの4つの第1レイヤモジュールは第2層目のチップ内に存在するが、4つのモジュール0, 7, 56, 63からなる第1レイヤモジュールは第1層目に56, 63、第2層目に0, 7と2層のチップにまたがり、4つのモジュール1, 2, 57, 58からなる第1レイヤモジュールなどの他の7つの第1レイヤモジュールも2層のチップにまたがり、ランク1ルータからこれらのモジュールを接続する配線は2つのチップを接続する垂直方向配線を含む。ただし、これらのモジュールは第1層目と第2層目で垂直方向に重なった位置にあり、それぞれ1束の垂直方向配線で接続可能である。このような垂直方向配線も貫通ビアを使用できる。ランク2ルータは二重化されず各チップに2個、合計4個であり、ランク2ルータとランク1ルータを接続する配線はチップ内で接続される。ランク3ルータは全体に1個で第3層目のチップの中央となり、ランク3ルータから4個のランク2ルータを接続する4本の配線のうち、2本は同一層内のランク2ルータにチップ内で接続され、他の層のランク2ルータに到る2本はチップ間を繋ぐ垂直方向配線で他のチップに到り、そのチップ内でランク2ルータの位置まで延びる。なお、図22では各モジュールを正方形で示しているが、縦横比を2:1にするとチップは正方形となり、既存の製造ラインに適合するので好適である。

10

20

【0086】

Fat H-TreeトポロジはRed TreeとBlack Treeと呼ばれる2つのH-Treeトポロジを組み合わせたトポロジである。したがって、その配線構造は両者の配線構造を合わせ持つ。しかし、垂直方向配線を有し、モジュールから遠いルータ間の配線長、すなわちランク2ルータとランク3ルータ間の配線長を削減でき、これらの配線における信号の遅延を殆ど無くしている。なお、上記の説明は2分割Fat H-Treeトポロジの例であるが、2分割Fat Treeトポロジについても2分割Red Treeのランク1ルータからランク2ルータへの配線を二重化し、さらにランク2ルータからランク3ルータへの配線を二重化することにより実現可能であり、同様に、垂直方向配線を有し、モジュールから遠いルータ間の配線長、すなわちランク2ルータと

30

40

【0087】

次に2分割Fat H-Treeトポロジの配線レイアウトのアルゴリズムについて述べる。第4の実施の形態に比して階層は同じで、チップ数が半分になっている。ツリー分割工程(S10)では2チップに分割する。ノードマッピング工程(S20)は第4の実施の形態とほぼ同様であるが、レッドツリー系のランク2ルータはチップの中心付近に配置される。折り畳み工程(S30)については境界線が第3行目と第4行目の間の1本のみになる。リンク工程(S40)についてはランク2ルータとランク3ルータ間のリンクを2チップ間で行なうが、第4の実施の形態と同様にBlack Tree系ではランク2ルータの位置がシフトしており、また、第1レイヤモジュールが層間に亘るものがある。ランク2ルータは各チップにRed Treeで2つ、Black Treeで2つ、全体で8つである。ランク3ルータはRed Treeで第1層目中心に1つ、Black Treeで第2層目中心に1つ、全体で2つである。

【0088】

[第6の実施の形態]

以上の実施形態では二次元集積電気回路モジュール間の配線が貫通ビアを通して構成される例について説明したが、第6の実施の形態では二次元集積電気回路モジュール間の配線に無線配線を用いる例を説明する。例えば第1の実施の形態の配線構造において、貫通ビアを通る垂直方向配線に代えて無線通信で信号を伝達する。モジュール間での信号を伝

50

達する配線だけでなく、各ランクのルータを制御する制御信号線、電源線についても無線配線で置換しても良い。この場合、チップすなわち二次元集積電気回路モジュールの二次元平面に垂直な方向にほぼ直線上に並べて無線送受信手段が配置される。チップ間の通信を行なうランク2ルータ及びランク3ルータに無線送受信手段として例えば各1個の無線送受信回路を用いても良く、各1個の無線送信回路及び無線受信回路を用いても良い。また、これら送信回路又は受信回路としてインダクターなどの電磁結合や容量結合を用いても良い。無線送受信手段を二次元平面に垂直な方向にほぼ直線上に並べるのは、チップ間で良好な無線通信が可能な送信手段と受信手段間の距離が μm オーダーの範囲では可能なのに対し、 mm オーダー以上では困難だからである。したがって、チップ間配線に無線配線を用いる場合にも、モジュール、各ランクのルータの配置及びこれらの間の配線構造について、貫通ビアの場合と同じアルゴリズムを適用できる。また、配線レイアウトのアルゴリズムは第1の実施の形態の貫通ビアを無線配線に代えれば良い。

10

【0089】

なお、上記の説明は第1の実施の形態に無線配線を適用する例であるが、第2～第5の実施の形態にも同様に無線配線を適用可能である。

【0090】

[評価]

次に、以上の実施の形態で説明した3-D Fat Tree および3-D Fat H-Treeについて、チップ面積、配線量、配線遅延、リピータ数、消費電力について評価する。これらの3次元レイアウトは2枚のチップ上に実現できるが、ここでは積層するチップ数を4層として評価する。

20

【0091】

(1) ルータのリンク数と個数

表1に、3-D Fat Treeおよび3-D Fat H-Treeトポロジで必要となるルータの個数を見積もった結果を示す。比較のため3-D Meshと3-D Torusの結果も示す。Fat H-Treeをはじめツリー系のトポロジでは3-D Meshや3-D Torusに比べてルータの数が少ない。また、表には示されていないが、ルータの最大リンク数はH-TreeとFat H-Treeで5個、Fat Treeで6個であるのに対し、3-D Meshと3-D Torusでは7個(xyz 各方向に2個ずつに、(ローカル)コア(プロセッシングエレメント)へのリンクを含めて7個とした)となり、ルータ1個当たりの面積でもツリー系トポロジのほうが有利である。ただし、(2,4,2) Fat TreeとFat H-Treeでは各コアは2本のリンクを有するため、他のトポロジと比べネットワークインターフェイス(NI)の面積が増加する。

30

【0092】

【表1】

ルータの個数.

	$N\text{-core}$	16-core	64-core	256-core
H-Tree	$(4^n - 1)/3$	5	21	85
Fat Tree (2,4,1)	$(4^n - 2^n)/2$	6	28	120
Fat Tree (2,4,2)	$4^n - 2^n$	12	56	240
Fat H-Tree	$2(4^n - 1)/3$	10	42	170
Mesh	N	16	64	256
Torus	N	16	64	256

40

【0093】

(2) ルータとネットワークインターフェイス(NI)の面積

表2に3-D Fat Treeおよび3-D Fat H-Treeトポロジにおける、オンチップルータとNIからなる部分の面積(mm^2)を示す。比較のため3-D

50

Meshと3-D Torusにおける同部分の面積も示す。

【表2】

チップ面積 (カッコ内は2次元レイアウトからの増分) [mm ²].				
	16-core		64-core	
3-D H-Tree	1.73	(0.03)	7.20	(0.03)
3-D Fat Tree (2,4,1)	2.17	(0.05)	10.16	(0.13)
3-D Fat Tree (2,4,2)	4.37	(0.13)	20.32	(0.26)
3-D Fat H-Tree	3.78	(0.18)	15.46	(0.33)
3-D Mesh	3.88	(0.46)	19.01	(3.81)
3-D Torus	6.16	(1.98)	24.62	(7.90)

10

【0094】

なお、カッコ内の数字は2次元レイアウトからの増分を示すものである。この数字はツリー型トポロジでは貫通ビアのみの面積を表し、MeshやTorusでは3次元化に伴うルータ面積の増分と貫通ビアの面積を表す。この結果より、ツリー型トポロジでは、3次元化のための貫通ビアによって総面積が最大5.0%増加しているのに対し、MeshとTorusでは3次元化によってルータのリンク数が増えるため、面積がMeshで最大21.5%、Torusで最大47.3%増加しており、3次元化のオーバーヘッドが非常に大きいことが分かる。

20

【0095】

各トポロジの面積は次の手順で見積もった。(1)まず、Verilog-HDL(Hardware Description Language)で記述されたルータ回路とNI回路を組み合わせて対象トポロジを構築した。(2)次に、これを0.18μmスタンダードセルライブラリを用いてSynopsys社のDesign Compilerで合成することでNoCの面積を抽出した。(3)次に、各トポロジに含まれるチップ間リンクの数から貫通ビアの面積を計算し、NoCの面積に足し合わせた。ここにおいて、ルータ回路は4段のパイプラインステージから構成され、パイプラインステージごとに1-フリット(flit)分のリピータを有し、NI回路として2-flit分のFIFO(First In, First Out)を入力側と出力側にそれぞれ有するものとした。また、Fat H-Treeと(2,4,2) Fat Treeでは2ポートのNIが必要になる。とくにFat H-Treeでは、片方のポートからもう片方のポートへパケットを転送する機能が必要であり、このためにNI内に小さなマルチプレクサが実装されているものとした。貫通ビアのサイズはチップを重ね合わせるときのアライメントの精度によって制限され、一般的には1μm角~10μm角となる。ここでは、1-ビット(bit)の単方向チップ間リンクが1枚のチップを貫通する度に、貫通ビアの面積として100μm²を加算した。

30

【0096】

(3) 総配線長

40

表3にFat Tree及びFat H-Treeについて、2次元レイアウトにおける総配線長を示す。比較のため2-D Meshと2-D Torusにおける総配線長も示す。ここで、隣接コア間距離を1-ユニット(unit)とし、配線長をユニット数で表す。

【表 3】

2次元レイアウトにおける総配線長 (隣接コア間距離を 1-unit とする) .

	N-core	16-core	64-core	256-core
2-D H-Tree	式 4	24	112	480
2-D Fat Tree (2,4,1)	nN	32	192	1,024
2-D Fat Tree (2,4,2)	$2nN$	64	384	2,048
2-D Fat H-Tree	式 5	72	392	1,800
2-D Mesh	$2(N - 2^n)$	24	112	480
2-D Torus	$4(N - 2^n)$	48	224	960

10

【0097】

階層数 n の H - Tree の 2次元レイアウトにおける総配線長 $L_{2D,ht}$ を式 (3) で表す。

【数 1】

$$L_{2D,ht} = \sum_{i=1}^n l_{ht}^i \cdot r_{ht}^i \quad (3)$$

20

ただし、 l_{ht}^i を H - Tree におけるランク i ルータからその 4 個の下位ルータへの総リンク長、 r_{ht}^i をランク i ルータの数とする。コア数を $N = 2^n \times 2^n$ とすると、 $l_{ht}^i = 2^{i+1}$ 、 $r_{ht}^i = N / 4^i$ となる。したがって、式 (3) は式 (4) のように変形できる。

【数 2】

$$L_{2D,ht} = \sum_{i=1}^n 2^{i+1} \cdot \frac{N}{4^i} = 2N \left(\frac{2^n - 1}{2^n} \right) \quad (4)$$

30

同様にして、階層数 n の Fat H - Tree の 2次元レイアウトにおける総配線長 $L_{2D,fht}$ を求める式は式 (5) のように導かれる。

【数 3】

$$L_{2D,fht} = 8 + 8N \left(\frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} \right) \quad (5)$$

40

表 3 の見積りでは Mesh 及び Torus のコア - ルータ間リンクの長さを無視しているものの、Fat H - Tree や (2, 4, 2) Fat Tree などツリー型トポロジの総配線長が圧倒的に長く、これがツリー型トポロジの欠点になっていることが分かる。

【0098】

表 4 に Fat Tree 及び Fat H - Tree について、3次元レイアウトの総配線長 $L_{3D,ht}$ を示す。比較のため 3 - D Mesh と 3 - D Torus における総配線長も示す。ここで、隣接コア間距離を 1 - unit とし、配線長をユニット数で表す。

【表 4】

3次元レイアウトにおける総配線長 (隣接コア間距離を 1-unit とする)。				
	N-core	16-core	64-core	256-core
3-D H-Tree	式 6	16	96	448
3-D Fat Tree (2,4,1)	$(n-1)N$	16	128	768
3-D Fat Tree (2,4,2)	$2(n-1)N$	32	256	1,536
3-D Fat H-Tree	式 7	40	200	904
3-D Mesh	$2(N-2^{n+1})$	16	96	448
3-D Torus	$4(N-2^{n+1})$	32	192	896

10

【0099】

3次元レイアウトではチップ間の距離は数十 μm 程度と、水平方向のリンク長に比べて圧倒的に短い。そのため、ここではチップ間リンクの長さは考慮しないものとする。まず、階層数 n のH-Treeを3次元化したときの総配線長 $L_{3D,ht}$ を求める。チップの枚数は4枚なので、すべての最上位リンクが長さ0のチップ間リンクに置き換えられることになる。したがって、式(4)は3次元化によって式(6)のように変化する。

【数 4】

$$L_{3D,ht} = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{i+1} \cdot \frac{N}{4^i} = 2N \left(\frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} \right) \quad (6)$$

20

【0100】

Fat H-Treeの場合はRed TreeとBlack Treeに分けて考える。Red TreeはH-Treeの3次元レイアウトと等価である(図9参照)。一方、Black Treeはこれに加え、最上位リンクの長さとしてそれぞれ2-unit必要となる(図10参照)。よって総配線長は式(7)のようになる。

【数 5】

$$L_{3D,fht} = 8 + 4N \left(\frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} \right) \quad (7)$$

30

表4と表3を比較することにより、総配線長が3次元化によってどれだけ削減できるかが分かる。Fat TreeおよびFat H-Treeでは、3次元化によって総配線長が25.0%から最大50.0%削減できた。その結果、総配線長は、(2,4,2) Fat Treeを除き、3-D Torusと同程度かそれ以下に削減された。

【0101】

(4) 消費電力

1-flitのデータを送信元から宛先ノードに転送するのに要する平均転送エネルギーは式(8)で計算できる。

$$E_{flit} = w H_{ave} (E_{sw} + E_{link}) \quad (8)$$

ただし、 w を1-flitのビット数、 H_{ave} を平均ホップ数、 E_{sw} をルータが1-bitのデータ転送に消費するエネルギー、 E_{link} をリンクが1-bitのデータ転送に消費するエネルギーとする。(2)のルータとNIの面積において見積もったルータを、250MHzでの動作を仮定してゲートレベルでシミュレーションしたところ、 E_{sw} は1.13pJとなった。

【0102】

一方、 E_{link} は式(9)で計算できる。

$$E_{link} = d V^2 C_{wire} / 2 \quad (9)$$

ただし、 d を1-hop当たりの平均距離(mm)、 V を動作電圧、 C_{wire} を配線

50

容量とする。ここでは V を $1.8V$ とし、 C_{wire} は $0.18\mu m$ プロセスを仮定するとき $414fF/mm$ となった。チップサイズは $12mm$ 角とし、 16 コア、 64 コア、 256 コアの場合について、上記のパラメータをもとに転送エネルギー E_{flit} を計算した。

【0103】

表5にリピータを挿入しないときの2次元レイアウトにおける1-flit当りの転送エネルギー E_{flit} (pJ)を示す。

【表5】

2次元レイアウトにおける転送エネルギー E_{flit} [pJ] (リピータ無し).

	16-core	64-core	256-core
2-D H-Tree	464.6	579.2	676.8
2-D Fat Tree (2,4,*)	464.6	579.2	676.8
2-D Fat H-Tree	424.4	530.6	636.3
2-D Mesh	468.9	501.0	661.7
2-D Torus	483.9	512.3	637.0

10

【0104】

Fat H-Treeは畳み込みによって1-hop当たりの平均距離 d が延びたが、平均ホップ数はこの中で最も小さく、消費電力においても有利となった。H-TreeやFat Treeはその次に平均ホップ数が小さいが、最上位リンクの利用率高いため転送エネルギーはFat H-Treeよりも大きくなった。2-D Torusは畳み込みによって1-hop当たりの平均距離 d が延びるため16コアでは2-D Meshより転送エネルギーが多い。一方、256コアでは E_{sw} のウェイトが高くなり、平均ホップ数の小さい2-D Torusは2-D Meshより有利になっている。

20

【0105】

チップサイズが $12mm$ 角のとき、ツリー型トポロジにおける最長配線長はコア数によらず常に $6mm$ である。このときの配線遅延は $715psec$ となり、プロセスの微細化に伴いさらに深刻化すると考えられる。そこで、マイ達の計算式(Ho, R., Mai, K.W. and Horowitz, M.A.: The Future of Wires, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 4, pp. 490-504 (2001)参照)に基づきリピータを挿入し、配線遅延を $441psec$ まで抑えることができたが、新たにリピータの消費電力を考慮する必要が生じた。

30

【0106】

表6にリピータを挿入したときの2次元レイアウトにおける1-flit当り転送エネルギー E_{flit} (pJ)を示す。リピータは $5mm$ 以上のリンクに挿入するものとして計算した。

【表6】

2次元レイアウトにおける転送エネルギー E_{flit} [pJ] (リピータ有り).

	16-core	64-core	256-core
2-D H-Tree	642.8	748.8	844.5
2-D Fat Tree (2,4,*)	642.8	748.8	844.5
2-D Fat H-Tree	691.7	641.2	786.0
2-D Mesh	468.9	501.0	661.7
2-D Torus	662.1	512.3	637.0

40

【0107】

上記マイ達の文献の図10によれば、 $4mm$ 以下の配線にリピータを挿入しても配線遅

50

延の消費効果が小さいことが分かる。そこで消費電力の増加を少しでも抑えるため、リピータの挿入は5mm以上のリンクに制限した。

【0108】

ツリー系のトポロジの最長リンクには平均4.9個のリピータが挿入されたため、リピータを挿入しない表5と比べ、転送エネルギーが大幅に増加した。また、16コアの2-D Torusにおいては畳み込みにより一部のルータ-ルータ間リンクが5mmを越えたため、ツリー型トポロジと同様に転送エネルギー E_{flit} が増加した。

【0109】

次に、3次元レイアウトにおける転送エネルギー E_{flit} を計算する。非特許文献2によると貫通ビアの容量は4.34 fFであり、本評価で仮定している配線10.5 μ m分の容量に相当し、水平方向の配線長に比べて十分小さい。そのためチップ間リンクで消費されるエネルギーは考慮しないものとする。

10

【0110】

表7に3次元レイアウトにおける転送エネルギー E_{flit} (pJ)を示す。

【表7】

3次元レイアウトにおける転送エネルギー E_{flit} [pJ] (リピータ不要)。

	16-core	64-core	256-core
3-D H-Tree	258.8	383.1	483.1
3-D Fat Tree (2,4,*)	258.8	383.1	483.1
3-D Fat H-Tree	321.5	356.6	441.0
3-D Mesh	300.6	334.6	418.0
3-D Torus	282.4	327.0	398.4

20

【0111】

3次元化レイアウトでは、どのトポロジにおいても5mmを越えるリンクが発生しなかったためリピータは不要となった。Fat Treeの転送エネルギー E_{flit} は表5と比べて最大44.3%、表6と比べて最大59.7%削減された。同様にFat H-Treeの転送エネルギー E_{flit} は表5と比べて最大32.8%、表6と比べて最大53.5%削減された。このように3次元化により、配線長およびリピータを減らすことができ、結果的に転送エネルギーを大幅に減らすことができた。

30

【0112】

以上説明したように、Fat Tree およびFat H-Treeの3次元レイアウトは、同サイズの2次元レイアウトに比べ、(1)配線長は25.0%から最大50.0%削減された、(2)配線遅延が小さくなり、挿入されるリピータ数を削減できた、(3)これにより、1フリット当りの転送エネルギーが最大59.7%削減された。なお、3次元化によってチップ面積が最大5.0%増加したが、メッシュの3次元化に比して十分低コストになっている。このように、本発明によれば、複数のモジュール間を接続する集積電気回路の配線構造において、適正なトポロジで3次元構造を実現することにより、2次元構造に比して、ネットワークの高い性能及びハードウェアの量と機能を維持しつつ、配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減することができる。

40

【0113】

以上、本発明の実施の形態について説明したが、本発明は以上の実施の形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で実施の形態に種々変更を加えられることは明白である。

【0114】

例えば、以上の実施の形態では、三次元集積電気回路の配線構造に64コア又は256コアのFat Treeトポロジ、64コアのFat H-Treeトポロジを適用する例について説明したが、他の4ⁿコア、2層のFat Treeトポロジ、Fat H-Treeトポロジにも適用可能であり、ルータの上向きリンク数p、ルータの下向きリ

50

リンク数 q 、コアの上向きリンク数 c の組み合わせについても特に制限はない。また、第 1 の実施の形態以外でも、交換接続手段を制御する制御信号線や電源線についてもチップ間に布設されるものは貫通ビア内に配置する構成としても良い。このように構成すると、制御系配線についても配線長を低減し、モジュール間の通信遅延を低減できる。また、以上の実施の形態では交換接続手段がルータである場合について説明したが、交換接続手段がクロススイッチ等の交換機のスイッチの場合についても同様に適用できる。また、以上の実施の形態では貫通ビアや無線配線が 1 箇所を主に説明したが、貫通ビアや無線配線を複数箇所に設けても良く、また、貫通ビアと無線配線とを併用しても良い。また、各電気回路領域は同一寸法の正方形又は長方形に限定されず、正三角形、正六角形や台形等の平面に隙間なく敷き詰められる形状であれば望ましいが、円形等隙間が生じる構造について、Fat Tree トポロジ、Fat H-Tree トポロジを適用可能である。

【産業上の利用可能性】

【0115】

本発明は LSI、IC 等の 3 次元配線に利用できる。

【図面の簡単な説明】

【0116】

【図 1】リンク数が小さく対称な 2 次元レイアウトが可能なトポロジの代表例を示す図である。

【図 2】64 コア Fat Tree のツリー構造の例を示す図である。

【図 3】64 コア Red Tree のツリー構造の例を示す図である。

【図 4】64 コア Black Tree のツリー構造の例を示す図である。

【図 5】Red Tree の座標と Black Tree の座標の関係を示す図である。

【図 6】64 コア Fat H-Tree の 2 次元レイアウトを示す図である。

【図 7】畳み込み処理された Fat H-Tree の 2 次元レイアウトを示す図である。

【図 8】Fat Tree を 4 分割した例を示す図である。

【図 9】Red Tree を 4 分割した例を示す図である。

【図 10】Black Tree を 4 分割した例を示す図である。

【図 11】64 コア 3 階層の Fat Tree トポロジの例を示す図である。

【図 12】64 コア Fat Tree トポロジを 4 つのチップに分割した構成を示す図である。

【図 13】64 コア Fat Tree トポロジを 4 つのチップに分割し、積層したときの各ランクルータ配置とルータ間配線の 3 次元レイアウトの概要を示す図である。

【図 14】Fat Tree トポロジ及び Fat H-Tree の配線レイアウトのアルゴリズムの大略を示す図である。

【図 15】コアのマッピングと折り畳みを説明するための図である。

【図 16】16 個のランク 3 ルータと 8 個のランク 4 ルータ間の配線のトポロジを示す図である。

【図 17】各第 3 レイヤモジュールの 3 次元配置とランク 3 ルータ、ランク 4 ルータの配置の例を示す図である。

【図 18】64 コア Fat H-Tree トポロジの例を示す図である。

【図 19】64 コア Fat H-Tree を 4 分割した時の Red Tree の 3 次元レイアウトを示す図である。

【図 20】64 コア Fat H-Tree を 4 分割した時の Black Tree の 3 次元レイアウトを示す図である。

【図 21】64 コア Fat H-Tree を 2 分割した時の Red Tree の 3 次元レイアウトの例を示す図である。

【図 22】64 コア Fat H-Tree を 2 分割した時の Black Tree の 3 次元レイアウトの例を示す図である。

【図 23】2 次元 IC と 3 次元 IC の比較を示す図である。

【符号の説明】

10

20

30

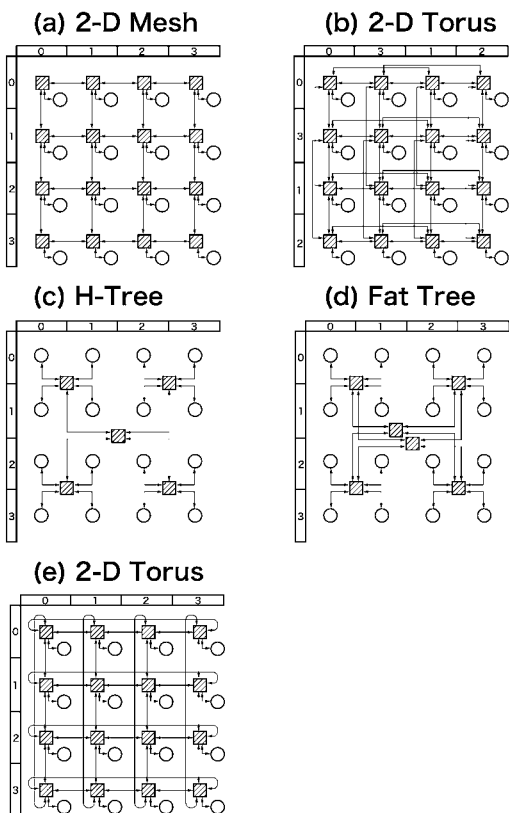
40

50

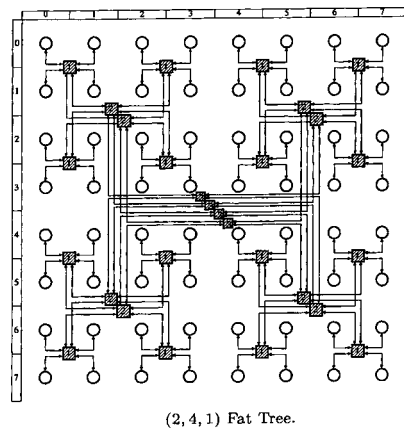
【 0 1 1 7 】

- i ($i = 1 \sim 3$) ランク i ルータ
- b_i Black Tree のランク i ルータの座標
- $B(b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_n)$ Black Tree のルータの座標
- (p, q, c) Fat Tree のリンク構成
- p ルータの上向きリンク数
- q ルータの下向きリンク数
- c コアの上向きリンク数
- r_i Red Tree のランク i ルータの座標
- $R(r_0, r_1, \dots, r_i, \dots, r_n)$ Red Tree のルータの座標
- x_{2D}, y_{2D}, z_{2D} コアの 2 次元座標
- x_{3D}, y_{3D}, z_{3D} コアの 3 次元座標

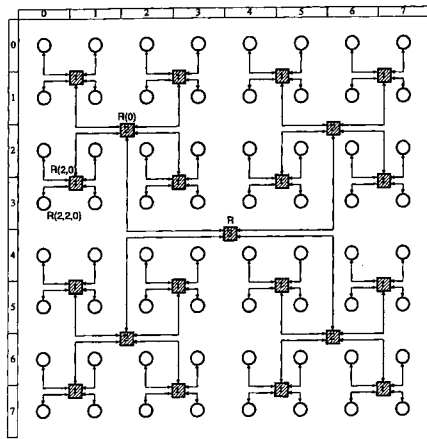
【 図 1 】



【 図 2 】

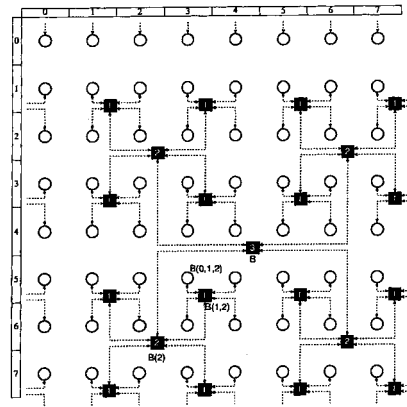


【 図 3 】



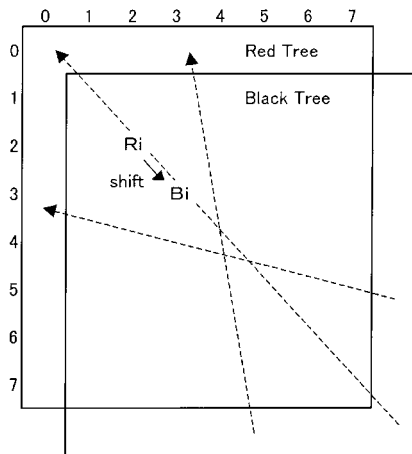
Fat H-Tree (red tree) .

【 図 4 】

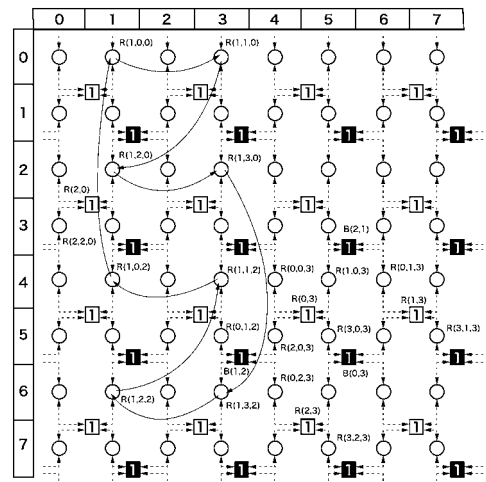


Fat H-Tree (black tree) .

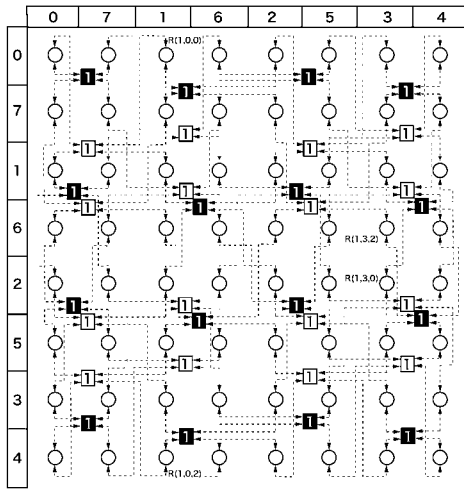
【 図 5 】



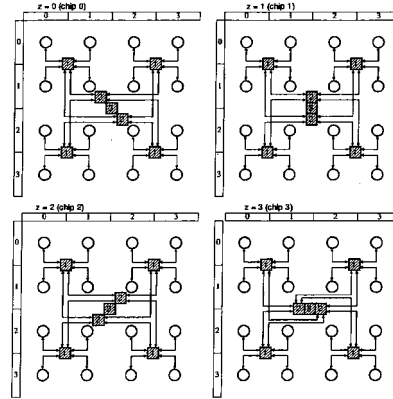
【 図 6 】



【 図 7 】

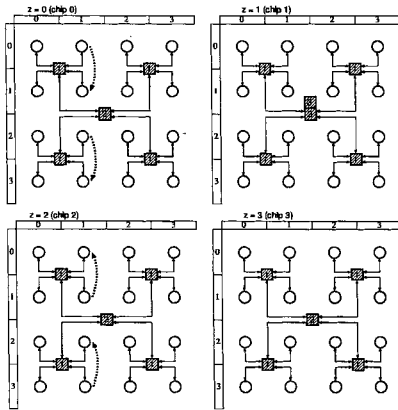


【 図 8 】



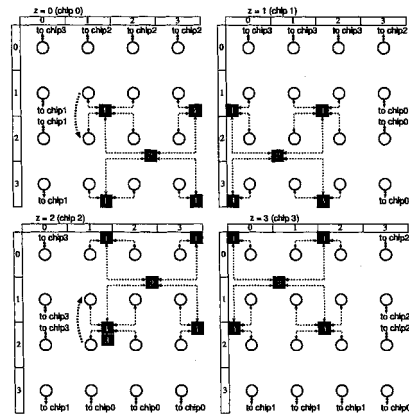
3-D (2, 4, 1) Fat Tree.

【 図 9 】



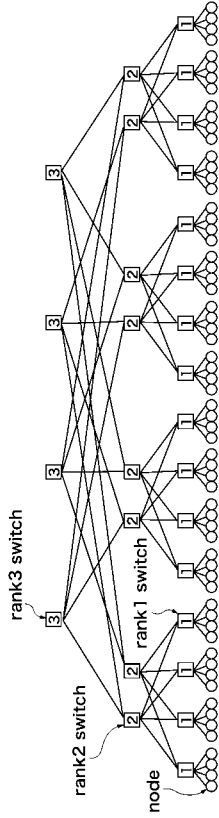
3-D Fat H-Tree (red tree).

【 図 10 】

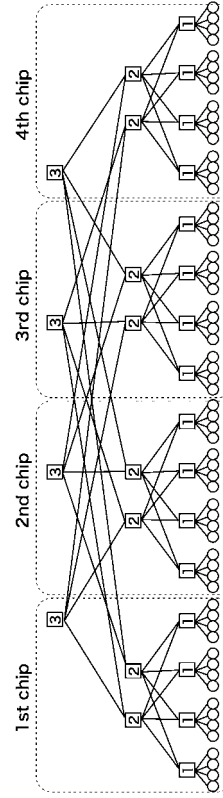


3-D Fat H-Tree (black tree).

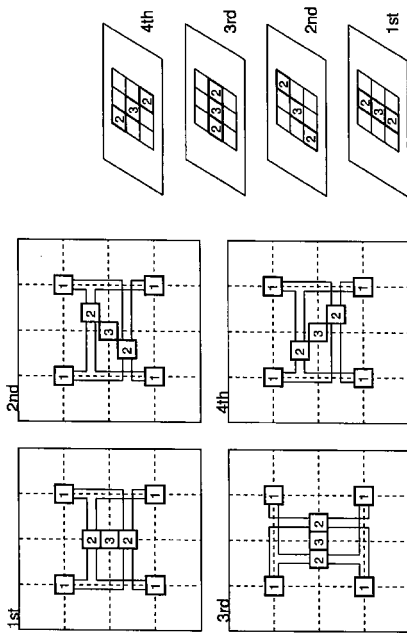
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】

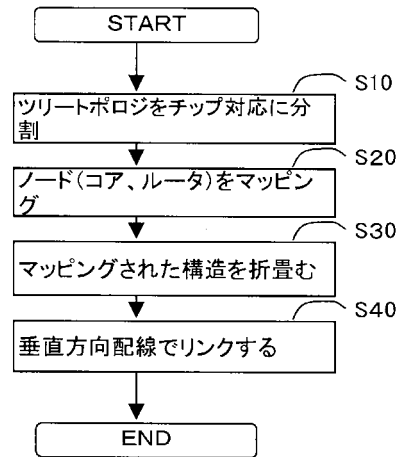


【 図 1 3 】



64ノードFatツリーを4分割(3次元レイアウト)

【 図 1 4 】

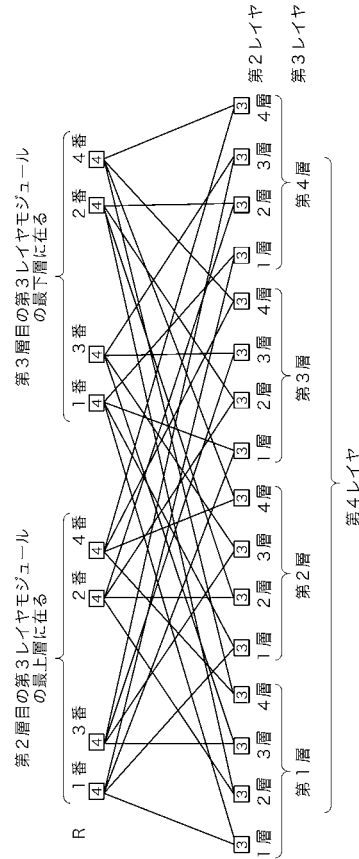


【 図 1 5 】

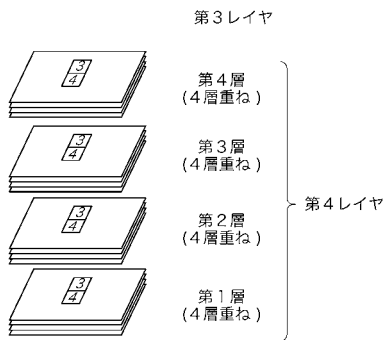
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	2	3	4	5	6	7
1	8	9	10	11	12	13	14	15
2	16	17	18	19	20	21	22	23
3	24	25	26	27	28	29	30	31
4	32	33	34	35	36	37	38	39
5	40	41	42	43	44	45	46	47
6	48	49	50	51	52	53	54	55
7	56	57	58	59	60	61	62	63

2nd (pointing to column 0), 3rd (pointing to column 6), 1st (pointing to column 1), 4th (pointing to column 7)

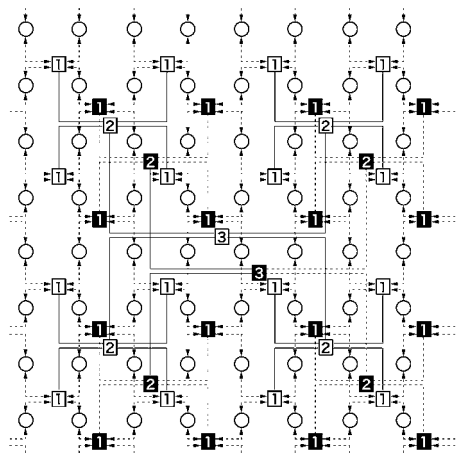
【 図 1 6 】



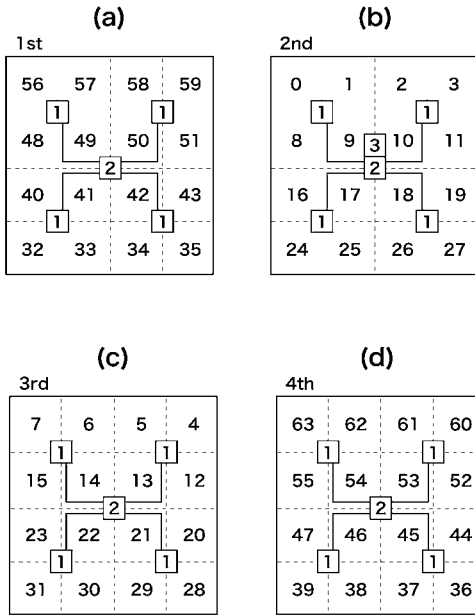
【 図 1 7 】



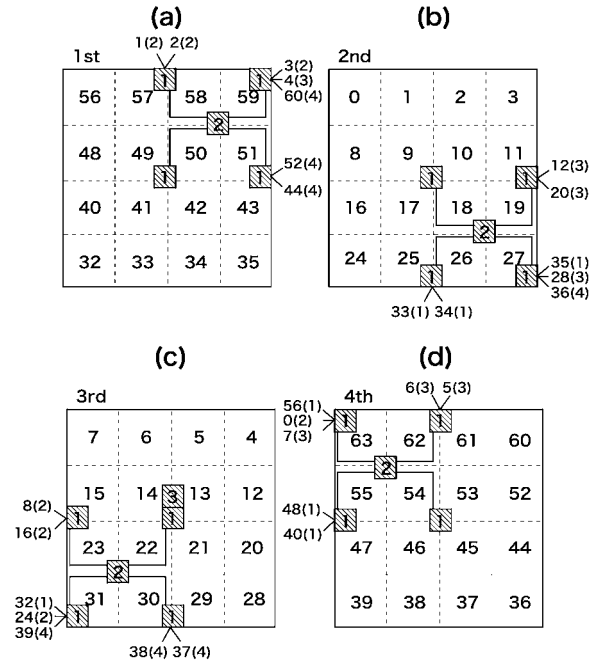
【 図 1 8 】



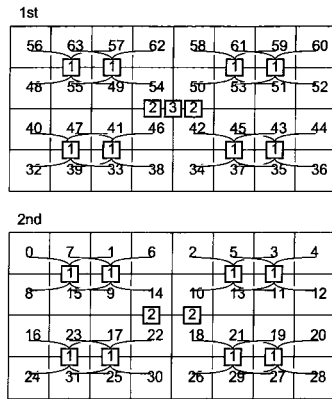
【図 19】



【図 20】

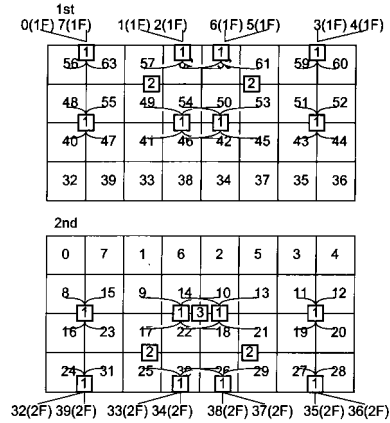


【図 21】



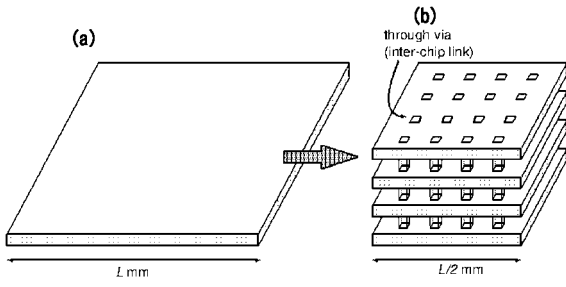
64 コア Fat H-Tree を 2 分割 (red tree)

【図 22】



64 コア Fat H-Tree を 2 分割 (black tree)

【 図 2 3 】



2次元 IC (左図) と 3次元 IC (右図) .

フロントページの続き

(72)発明者 鯉淵 道紘

東京都千代田区一ツ橋2丁目1番2号 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立情報学研究所内

(72)発明者 松谷 宏紀

埼玉県川口市前川1丁目7-3

Fターム(参考) 5B046 AA08 BA06

5F064 AA13 BB01 BB37 DD01 EE02 EE47 HH06