JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	温度予測モデルを用いた重み付けシフトによるウェー ハスタック実装の放熱			
Author(s)	井口,寧;松澤,照男;堀口,進			
Citation	情報処理学会論文誌, 44(SIG14): 81-90			
Issue Date	2003-11			
Туре	Journal Article			
Text version	publisher			
URL	http://hdl.handle.net/10119/3313			
Rights	社団法人 情報処理学会, 井口寧 / 松澤照男 / 堀口進, 情報処理学会論文誌 : 数理モデル化と応用, 44(SIG14), 2003, 81-90. ここに掲載した著作物の利 用に関する注意: 本著作物の著作権は(社)情報処理 学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処 理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当 たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱 領」に従うことをお願いいたします。 The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.			
Description				



#

温度予測モデルを用いた 重み付けシフトによるウェーハスタック実装の放熱 ^{室†,††} 松 谁†††

昭

男↑

堀

濹

本論文では、ウェーハスタック実装による格子結合型マルチプロセッサの冷却を考慮した再構成方 式を提案する.ウェーハスタック実装は,ウェーハ規模のプロセッシング要素(PE)アレイを3次元 的に積層して構築され,システムの高速化,省電力化,コンパクト化が期待できる実装方式の1つで あるが,中心部にある PE の冷却や,各ウェーハ表面の欠陥の回避などが大きな問題となっている. 欠陥回避のために,あらかじめ予備の PE を設けておき,網を再構成することによって,論理的に欠 陥のない格子網を得る方法が従来から提案されているが,本論文では,予備 PE 選択の際に温度予測 モデルを導入し,スタック内温度を低くできる PE を選択することによって,網の再構成とスタック の冷却を同時に行うことを試みる.初期 PE の配置として予備 PE をウェーハ中心に集める方式,お よび, PEの移動手法として温度予測モデルを用いて温度が低くなる方向に PEを移動する方式を提 案する.2つの手法について,システム全体の歩留まりとウェーハスタック内の最高温度,および冷却 性能のばらつきを熱伝導シミュレーションによって評価した.その結果,予備 PE をウェーハ中心部 に配置すると, PE 歩留まりが高い場合にスタック全体の温度を大きく低下できた.温度予測モデル に基づいた重み付きシフトは,システム歩留まりを損なうことなく,従来手法よりも最大で約9%温 度を低くすることができた.

Biased Shifting Cooling Scheme for 3D Stacked Mesh Array Using Temperature Estimation Model

Yasushi Inoguchi,^{†,††} Teruo Matsuzawa[†] and SUSUMU HORIGUCHI^{†††}

This paper addresses a cooling scheme for 3D stacked mesh array. A 3D stacked implementation consists of a pile of wafers and each wafer contains a processing elements (PEs) array. It is one of good candidates to implement a large scale system with high speed, low power consumption and tight integration. However, cooling of PEs at the center of a stack and avoiding defects on a wafer surface are crucial problems. To avoid these defective PEs, conventional methods obtain a defect free logical mesh network by preparing spare PEs on a wafer and reconfiguring the logical mesh network. This paper proposes biased shifting method as a improved the reconfiguration algorithm to cool the stack. The biased shifting determines a direction to lower temperature using the temperature estimation model, and it shifts defective PEs toward that direction keeping a logical network mesh connection in the stack. System yield, cooling performance, and stability of temperature are examined by thermo-conducting simulation. As the result, the concentrated spare PEs placement much reduces maximum temperature in the 3D stack at highly PE yield, and the biased shifting can lower temperature than conventional method keeping highly system yield.

+ 北陸先端科学技術大学院大学情報科学センター Center for Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

- ++ 科学技術振興事業団さきがけ研究21(機能と構成) "Information and Systems," PRESTO, JST
- +++ 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

1. はじめに

近年、大規模なシストリックアレイや画像処理シス テムを実現する実装手法として,1枚のウェーハ上に 多数のプロセッシング要素(PE)を塔載し,これを三 次元的に積層して構成されるウェーハスタック実装が 提案され,様々な研究が行われている^{1)~5)}.ウェーハ スタック内部では,結線はすべてウェーハ上で完結す るため,もしウェーハスタック実装でシステムを構築 できれば,システム全体の高速化,省電力化,および 小型化が期待できる.しかしながら,ウェーハスタッ ク実装では,スタック内部のPEの発生する熱の放熱 手段と,各ウェーハの製造時に発生する欠陥回避の問 題が重要な問題となっている.

放熱の問題に対して, いくつかのシステムではス タックを貫通する熱伝導シャフトを内部に設け, この シャフトを通じて放熱する方法などが検討され, 実際 に試作システムが構築されている^{1)~3)}.しかしなが ら, これらの試作システムの放熱性能は十分ではなく, 実装されたシステムは直径2~3インチの小規模なも のである.ウェーハスタック実装は三次元構造を有す るため,大消費電力のPEの実装は不向きであり,小 規模なPEを多数結合するシステムに用いられる.そ の場合でも,放熱が効率良く行われれば,より高速で 消費電力が大きいプロセッサを用いたり,いっそう大 口径のウェーハを用いたシステムの大規模化が可能と なる.

一方,ウェーハに発生する欠陥の回避方式に関して は,二次元および三次元の格子結合網について様々な 研究がなされている^{6),7)}.これらの多くでは,初期に 動作すると仮定している PE の周囲に冗長な PE を配 置し,ウェーハ表面の欠陥により動作しない PE の機 能を冗長 PE で置き換え,網を再構成することにより 論理的に欠陥のない格子結合網を得ている.

ところで,これらの欠陥回避のための予備の冗長 PE は,欠陥 PE の数が少なければ置き換えが行われず, 使用されないままの PE が多数生じる.これらの使用 されない PE は,電源供給を止めることにより発熱し ないようにできるが,周囲の活動状態の PE にとって は,放熱する際の妨げとなる.そこで,欠陥 PE の置 き換えに際して,活動状態の PE が放熱しやすい位置 に,動作しない PE を配置することによって,ウェー ハスタック内の温度を低下させることができる^{8),9)}. また,筆者らは,ウェーハ上の PE 配置によって,ス タック内の温度を予測する手法を提案した¹⁰⁾.本論文 では,この温度予測を用いることによって,欠陥 PE の置き換えの際にスタック内温度が低くなるパターン を予測し,網の再構成と同時にスタックの冷却を行う ことを狙う.

本論文の構成は次のとおりである.2章で本論文で 使用する基礎技術として,格子結合型マルチプロセッ サの欠陥回避方式を紹介し,ウェーハスタックの構成 法および温度予測モデルについて述べる.3章で,具体 的な冷却手法として,冗長 PE の配置方式,および欠 陥回避の方向の重み付けによってウェーハスタック内



Fig. 1 Samples of shifting.

の最高温度を低下させる手法について議論する.4章 で,提案した欠陥回避方式に関して,ウェーハスタッ クの再構成成功率とスタック内部最高温度,および冷 却性能の安定性を評価する.5章はまとめである.

なお,ウェーハスタックは三次元構造を持つため, 本来であれば三次元での解析を行うべきであるが,熱 伝導シミュレーションにおける計算量が膨大となるた め,無限円柱モデルとして,中心の1枚のウェーハに ついて二次元的に解析を行う.

2. 欠陥回避アーキテクチャとウェーハスタック実装

2.1 欠陥回避アーキテクチャ

図1に,格子結合型マルチプロセッサシステムの 欠陥回避可能なアーキテクチャを示す^{6),7)}.網内には 初期に動作すると仮定された PEと,欠陥 PEの機能 を代行するための冗長 PE が配置される.各 PE は, 動作状態(Active),休止状態(Idle),機能せず信号 のみが通過する状態(PassH,PassV)の4つの状態 をとることができるが,これらは PE の欠陥の有無と は関係なく設定できる.各 PE の周囲には,バイパス リンクとスイッチが置かれる.スイッチはバイパスリ ンクとともに PE 間の接続の方向を切り換えるために 用いられ,PE の接続を通常の上下左右への接続から 斜め上/下の PE への接続に切り換えることができる. この様子を図1に示す.欠陥回避をする必要がない場 合,格子結合網は PE-スイッチ間の結線のみで構成で きるが,欠陥 PE を回避するためには,スイッチ間を



図 2 格子結合型マルチプロセッサのウェーハスタック実装 Fig. 2 Basic structure of 3D stacked mesh array.

結合しているバイパスリンク(図中破線で表示)が使用される.図1のように,欠陥PEを避けて隣接する PE に機能を代替することをシフトと呼ぶ.欠陥PE が2つ続く場合でも,2段階のシフト操作を行うこと により,欠陥を回避することができる.

上下左右どちらの方向にシフトするかを決定するア ルゴリズムは,ウェーハ全体の歩留まりに大きく影響 し,いくつかの方法が提案されている.Kungらはグ ラフ理論を用いた方法⁶⁾を提案した.また,Numata らはローカル情報のみを用いてヒューリスティックに 欠陥回避を行う方法(HS法)⁹⁾を提案し,高い再構成 の成功率を得ている.そこで,本論文ではHS法をも とに,冷却性能を考慮した再構成アルゴリズムを提案 する.

2.2 格子型ウェーハスタックの構成法

格子結合型ウェーハスタック実装の実装概念図を 図 2 に示す.それぞれのウェーハ上には実装すべき 格子結合網のサブセットに加え,冗長 PE を配置す る.ウェーハ上の欠陥 PE はウェーハ内部で再構成さ れ,各ウェーハは,論理的に欠陥のない格子結合網の サブセットを構成する.これらの論理的に欠陥のない ウェーハを縦方向に接続し,大規模な格子結合網を得 ることができる.

2.3 ウェーハスタックの温度予測モデル

ここでウェーハスタックの冷却について考える.-般にシリコン半導体は,接合部温度がおよそ 125°C を超えると,熱によって非可逆的に破壊されてしまう ため,動作状態においてもこの限界温度以下に保つ必 要がある.一方,ウェーハスタック実装は,三次元実 装構造を有しており,通常の放熱器などによる放熱が 非常に困難である.そこで,効率の良い冷却手段が求 められている.

スタック内には,前節で示したように多数のPEが



図 3 ウェーハスタックの温度予測モデル Fig. 3 Temperature estimation model.

配置されるが,それぞれの PEは,動作状態,欠陥状 態,および休止状態の3つの状態のうちのいずれかで ある.このうち,動作状態のPEは,自己の動作熱に よって発熱するが, 欠陥 PE および休止 PE は, PE の電源を OFF にすることによって発熱しないように できる、欠陥 PEは、ウェーハ表面の状態によって位 置が固定されるが,動作 PEと休止 PEは,再構成に よって位置を変化させることができる.放熱をウェー ハスタックの周囲から行うならば,定性的には発熱部 分(動作 PE)を周囲に配置し,非発熱部分(休止 PE) を中心に集めることにより,冷却効率を向上させるこ とができる.再構成を行う際には,PEどうしは相互 結合網で接続されているため,2.1節で述べた再構成 アルゴリズムに基づいて, PE 間結線を保ちながら移 動する必要がある.そこで,再構成の際に温度予測モ デルを導入し , 再構成と同時に冷却性能も向上させよ うというのが本論文の試みである.

ウェーハスタック実装の温度予測モデルは,動作 PE と休止 PE の配置分布から,スタックの内部最高温度 を近似して予測する¹⁰⁾.モデルの前堤条件として,円 周の周囲からのみ放熱する無限円柱モデルを想定し, この結果軸方向の熱移動は考慮せず,半径方向の熱 伝導によって放熱すると仮定する.スタック内のある ウェーハ1枚を取り出して,このウェーハ上の発熱 PE および休止 PE(欠陥 PE と使われない冗長 PEを含 む)の位置によって,ウェーハ中心部の温度を予測す る.図3に,温度予測モデルにおけるパラメータの概 略を示す.動作 PE の単位体積あたりの発熱量を \dot{q}_v , 熱伝導率を λ ,ウェーハの物理半径を R_a , PE アレイ の面積を収容できる円板の半径を R_e (= $\sqrt{2/\pi R_a}$), 全 PE 数,動作 PE 数,および非動作 PE(休止 PE



U 欠陥 PE) 数をそれぞれ N_t , N_a , N_i , PE の 1 辺 の大きさを L, j 番目の非動作 PE のウェーハ中心か らの距離を $r_c^{(j)}$,周囲温度を T_a とする.本温度予測 モデルでは,一般に温度が最も高温となる中心部の温 度を次の式で近似することができる.

$$T_{all}(0) = \frac{\dot{q_v}}{4\lambda} \left[R_e^2 \left\{ 1 - \ln(R_e/R_a)^2 \right\} + \frac{N_a}{N_t} \frac{L^2}{\pi} \right]$$
$$\cdot \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \ln(r_c^{(j)}/R_e)^2 - 1 \right\} + T_a \quad (1)$$

3. 冷却を考慮した再構成アルゴリズム

3.1 冗長 PE の配置方式

欠陥回避を開始する前の PE の初期配置について, 冗長 PE を周囲に配置する方式と中心部に配置する方 式が考えられる.この配置方式の違いについて,再構 成の成功率とウェーハスタック内の最高温度について 考察する.

冗長 PE をウェーハの周囲に配置する場合(図4) は,初期に動作すると仮定している PE が配置される ウェーハ中心部の表面状態が良く,欠陥回避の際にど の方向にもシフト可能なので,高い再構成の成功率が 期待できる.このため,HS 法をはじめ様々な再構成手 法で用いられてきたが^{5)~7)},欠陥 PE が少なく PE の 配置が初期配置からあまり変化しない場合,動作 PE がウェーハ中心部に集中するため,中心部の温度は高 くなる.

そこで,本論文では冗長 PE を中心に配置する方法 を提案する.図5に提案する配置方式を示す.この配 置では,発熱する PE が周囲に配置されるため,シフ トがあまり行われない場合,中心部の冗長 PE が休止 PE として残され,ウェーハの内部温度を低くできる ことが期待される.その一方で,欠陥回避の際には, 冗長 PE がウェーハの中心方向(上下左右の4方向の うち,2方向)のみにしか存在しないため,シフトの



rn Determin	$eShiftDirection(x, y)$ {
ttern W;	
= random();	/* return between 0 \sim 1.0 */
r < 0.25)	$W = Shift_PE(EAST, x, y);$
if($r < 0.50$)	$W = Shift_PE(\text{SOUTH}, x, y);$
if($r < 0.75$)	$W = Shift_PE(WEST, x, y);$
e	$W = Shift_PE(NORTH, x, y);$
$\operatorname{urn}(W);$	
	$ rn \ Determin \\ tern \ W; \\ = random(); \\ r < 0.25) \\ if(\ r < 0.50) \\ if(\ r < 0.75) \\ e \\ urn(\ W); $

	図 6	HS 法における	シフトフ	方向	の決	:定
Fig. 6	Shift	determination	based	on	$_{\rm HS}$	algorithm

方向中心方向に限定され,再構成の成功率は低下する 可能性がある.

3.2 シフト方向の重み付け

3.2.1 HS 法

次に動作 PE を移動する方向を決定するため,温度 予測モデルに基づいたシフト方向の重み付けを提案す る.欠陥回避の際のシフト方向を決定するためには, 様々なアルゴリズムが提案されている.図6にHS法⁷⁾ のシフト方向決定アルゴリズムを示す.HS法は非常 に高い再構成の成功率を得ることができるが,シフト の方向は乱数を用いて決定されており,外側,内側, 左右それぞれにシフトする確率はすべて等しく 0.25 である.

3.2.2 温度予測モデルに基づくシフト方向の重み 付け

そこで,冷却効率を高めるために,温度予測による 重み付けシフトを考える.図7に,温度予測による重 み付けシフトのアルゴリズムを示す.最初に,回避す べき欠陥 PE の座標 (x, y)に対して,東西南北それぞ れの方向に仮にシフトしたウェーハの PE 配置パター ン W_e , W_w , W_s , W_n を得る.それぞれのパターン には,動作 PE の位置と非動作 PE の位置が含まれる ので,各パターンについて,温度予測の式(1)を適用 することにより,東西南北それぞれの方向にシフトし た場合の温度の期待値(T_e , T_w , T_s , T_n)が予測で

$pattern \; TempEstimatedShiftDirection(x,y) \{$			
pattern W;			
$W_n = Shift_PE(NORTH, x, y);$			
$W_s = Shift_PE(SOUTH, x, y);$			
$W_e = Shift_P E(EAST, x, y);$			
$W_w = Shift_PE(WEST, x, y);$			
$T_n = TemperatureEstimate(W_n);$			
$T_s = TemperatureEstimate(W_s);$			
$T_e = TemperatureEstimate(W_e);$			
$T_w = TemperatureEstimate(W_w);$			
$T_{max} = MAX(T_n, T_s, T_e, T_w);$			
$T_{min} = MIN(T_n, T_s, T_e, T_w);$			
$\Delta T = T_{max} - T_{min};$			
$\sigma^2 = \Delta T \cdot \beta_t;$			
$T_n = RegRand(T_n, \sigma^2);$			
$T_s = RegRand(T_s, \sigma^2);$			
$T_e = RegRand(T_e, \sigma^2);$			
$T_w = RegRand(T_w, \sigma^2);$			
if $(T_n = MIN(T_n, T_s, T_e, T_w))$			
return(W_n);			
elsif($T_s = MIN(T_n, T_s, T_e, T_w)$)			
return(W_s);			
elsif($T_e = MIN(T_n, T_s, T_e, T_w)$)			
return(W_e);			
elsif($T_w == MIN(T_n, T_s, T_e, T_w)$)			
return(W_w);			
}			



きる.次に,それぞれの温度の期待値に対して,乱数 によってゆらぎを与える.ゆらぎを持つ温度の期待値 を相互に比較し,温度が最低となる方向にシフトを実 行したパターンを返し,関数を終了する.

ゆらぎは,再構成の解が局所解に陥らないために与 える. 関数 $RegRand(T, \sigma^2)$ は, 平均が T で分散が σ^2 の分布を持つ乱数を返す関数であり, σ^2 は温度差 ΔT とシフト重み β_t の積として与える.このアルゴ リズムでは、シフト方向を決定する要因として、温度 と乱数がある.シフト重みが小さい場合には,温度が シフト方向の決定に支配的になり,温度が低くなる方 向に確実にシフトできる反面,シフトの方向が固定化 されてしまい,再構成の成功率が低下してしまう.HS 法が高い再構成の成功率を得ている理由は,柔軟なシ フト方向の決定にあるので,温度以外に乱数の要素を 加えることによって,再構成の成功率の向上を目指す. シフト重みを大きくすると、シフト方向の決定に際し 乱数が支配的になり,再構成の成功率は高くなるが, 必ずしも温度が低下できる方向にシフトできるとは限 らず,冷却性能は低下する.



図8 ウェーハ歩留まり、冗長 PE 周囲配置, $(10+4) \times (10+4)$ Fig.8 System yields of dispersed spare PEs placement, $PESize = (10+4) \times (10+4).$

4. 歩留まりとスタック内最高温度

4.1 ウェーハ歩留まり

シフトの重み β_t を変化させたときのウェーハ歩留 まりを評価した.ここで,ウェーハ歩留まり(Y_w)は ウェーハ1枚あたりの再構成の成功率, PE 歩留まり は再構成前の任意の PE が正常に動作する確率とする. スタック全体としての歩留まり(スタック歩留まり) は、スタックの構成法によって異なる、ウェーハごとの 再構成終了後に正常なウェーハのみを用いてスタック を構築する場合では,スタック歩留まりはウェーハ歩 留まりに等しい.また,ウェーハを積層後に再構成を 行う場合では, N 層のスタック歩留まりは $(1-Y_w)^N$ となる.図8は冗長 PEをウェーハ周囲に配置(図4) しアレイサイズが (10+4)×(10+4), 図 9 は冗長 PE をウェーハ中心に配置(図5)しアレイサイズが (10+4)×(10+4),図10は冗長 PEをウェーハ周囲 に配置しアレイサイズが $(16+4) \times (16+4)$, 図 11 は冗長 PE をウェーハ中心に配置しアレイサイズが $(16+4) \times (16+4)$ のときのウェーハ歩留まりである. アレイサイズが $(N+R) \times (N+R)$ のとき, $N \times N$ の初期 PE に対して,縦横 R 列ずつの予備 PE を設 けている.なお,比較対象として,文献 7)にある HS 法のアルゴリズムを適用したときの歩留まりを掲載し た.一般にウェーハスタック実装では,低い PE 歩留 まりだと全体として利用可能な実装密度が低下し,高 密度実装が可能である利点が損なわれるため,比較的 高い PE 歩留まりが仮定される^{6),7)}. PE 歩留まりは, PE 面積を小さくしたり, 配線ルールを太くしたりす ることによって制御することが可能であるが,その場



図 9 ウェーハ歩留まり、 冗長 PE 集中配置, $(10+4) \times (10+4)$ Fig. 9 System yields of concentrated spare PEs placement, $PESize = (10+4) \times (10+4)$.



Fig. 10 System yields of dispersed spare PEs placement, $(16+4) \times (16+4).$



合でも, できるだけ低い PE 歩留まりで高いウェーハ 歩留まりが得られれば, スタック歩留まりを高めるこ とができる.

グラフより, 冗長 PE の配置による違い(図8対 図9,図10対図11)については,シフト重み β_t が十 分大きく($\beta_t \ge 0.1$), PE 歩留まりが十分高ければ, 冗長 PE の集中配置方式でも周囲配置でも,おおよそ 100%に近いウェーハ歩留まりを得ることができる.し かし, β_t が等しい場合,周囲配置の方が集中配置より もいっそう高いウェーハ歩留まりとなっている.また, PE 歩留まりがある程度高い場合($(10+4) \times (10+4)$ のとき PE 歩留まり 0.75 付近)にも,集中配置の場合 ではウェーハ歩留まりが 100%に達しにくい結果が得 られた.これらの原因は,冗長 PE が内部にしか存在 しないため,シフト可能な方向が限定され,冗長 PE の周囲配置では再構成可能な欠陥でも,冗長 PE を中 心に置くことにより救済が不可能になったためと考え られる.

一方, ゆらぎに対するシフト重み β_t がウェーハ歩 留まりに及ぼす影響は, β_t がおよそ 0.1 以上あれば, HS 法とほぼ同等のウェーハ歩留まりを得ることがで き, どの場合もほとんど差がない結果が得られた. β_t がおよそ 0.1 以下になると, 3.2 節で議論したように, シフトの方向が温度のみによって支配されるため,温 度が高くなっても欠陥回避可能な方向へのシフトが制 限され, ウェーハ歩留まりは急速に低下する.

4.2 スタック内最高温度

次に,ウェー八内の最高温度を差分法による熱伝導 シミュレーション¹¹⁾で求めた.この熱伝導シミュレー ションの精度は,数パターンの熱分布に対して,解析 的手法で求められる温度と比較検証済みである.

シミュレーションの条件として,ウェーハの素材はSi とし,熱伝導率などの物理定数はSiと同じ値を用いた. つまり,熱伝導率 $\lambda = 168.0(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$,密度 $\rho = 2.34(g \cdot cm^{-3})$,比熱 $c = 22.1(J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1})$ である.また,周囲温度は 25° C,PEアレイサイズ が $(16 + 4) \times (16 + 4)$ のとき,1つのPEの面積 を 5 mm × 5 mm,ウェーハの直径は140 mm とし, $(10+4) \times (10+4)$ のとき,1つのPEの面積を10 mm × 10 mm,ウェーハの直径は195 mm とする.4.1節 の結果より,0.7~0.8以上と比較的高いPE歩留まり が要求されるので,小さいPE面積として5 mm × 5 mmのPEを仮定し,配線ルールが太い場合として 10 mm × 10 mmのPEチップを仮定した.また,画像 処理プロセッサなどでは,しばしばビット処理に特化 した小規模プロセッサが用いられることも,小さいPE



面積を仮定する理由である.PEの発熱量は,画像処理 などに用いられる組み込み向け CPU や,コンピュー タシステムで最も多くの面積を占める D-RAM チップ の消費電力を想定し,1PE あたりの発熱量を 0.5W と 仮定した.具体的には,代表的な組み込み用 CPU で ある日立製作所の SH4 プロセッサは,CPU コア部分 の平均消費電力は 380 mW であり,代表的な 64Mbit SD-RAM である HYNDAI 社 HY57V658010ATC の 平均消費電力は 600 mW である.

ウェーハ内最高温度は,欠陥 PE の位置が異なるが 個数が同じ(PE 歩留まりが同じ)ウェーハをそれぞ れの条件や PE 歩留まりごとに数十枚用意して再構成 後の発熱パターンをシミュレートし,条件ごとの内部 最高温度を平均して求めた.

PEアレイサイズが (16+4)×(16+4)の場合の冗 長PEの配置方式ごとのウェーハ内最高温度を図12, 図13に示す.冗長PEの周囲配置では,図12に示す ように,PE歩留まりが高くなるにつれ,周囲にある冗 長PEがそのまま休止PEとして取り残され,中心部 の動作PEの放熱を妨げるため,スタック内の温度が 非常に高くなる.冗長PEを内部に配置する(図13) と,PE歩留まりが高い場合にウェーハ周囲のPEが 動作PEとして使用されるため,スタック内部温度を 低下する結果となる.逆に欠陥PEが増加しPE歩 留まりが低下すると,内部にある冗長PEが順次稼働 PEとして使用されだすため,PE歩留まりの上昇に 従って内部温度は上昇する.どちらの配置でも,温度 予測モデルを用いた重み付けシフト方式では,シフト



Fig. 13 Maximum temperatures of concentrated spare PEs placement, $(16 + 4) \times (16 + 4), \phi = 140$ mm.

重み β_t によって程度に差はあるものの, HS 法に比 べてつねに低い温度を保つことができた.

シフト重み β_t を小さくすると、どの PE 歩留まり でも温度を低下することができる.ただし、あまりに もシフト重みを低くすると、温度はいっそう低下させ られる反面、再構成可能な PE 歩留まりが非常に高い 領域に限られてしまう.たとえば、図 13 では、シフ ト重み $\beta_t \leq 0.0316$ では、温度を非常に低くできる が、その場合には PE 歩留まりが 0.95 以上でなけれ ばならない、それ以下の歩留まりでは、スタックの再 構成が失敗し、PE 間結線を保つ解を見つけることが できない、 $\beta_t \sim 0.100$ 前後が、ウェー八歩留まりと冷 却効果が両立できる適切なシフト重みである.

冷却効果は, 冗長 PE の集中配置の場合で特に大き く, たとえば図 13 では, PE 歩留まりが 0.85 のとき, HS 法に対して $\beta_t = 0.100$ では 10.3 度低い温度を実 現できた.これは, スタック内の温度上昇分(内部最 高温度と周囲温度の差)に対して, 9.4%の温度低下 である.PE 歩留まりの観点からは,もし設計温度を 100°C(373 K)とするならば, HS 法では 0.90 以上 の PE 歩留まりが要求されるのに対し, $\beta_t = 0.100$ の 重み付きシフト法では, PE 歩留まりが 0.85 まで利用 可能であるといえる.

図 12 および図 13 の A ~ D におけるウェーハの温 度分布の様子を図 14 に示す.(A) と(B)を比べると, 冗長 PE を中心に配置する場合は動作 PE が分散する ため,従来の配置方法(A)では中心部にホットスポッ トが発生しているが,(B)では発生していない.また,



図14 ウェーハ温度分布 . $(16+4) \times (16+4) \phi = 140 \text{ mm}$ Fig. 14 Temperature distribution, $PESize = (16+4) \times (16+4), \phi = 140 \text{ mm}.$





Fig. 15 Maximum temperatures of dispersed spare PEs placement, $(10 + 4) \times (10 + 4)$, $\phi = 195$ mm.

(C) と (D)を比べると,温度分布の傾向は同じであるが,中心部の温度が(D)の方が(C)に比べて低くなっている様子が分かる.

異なるケースとして, PEダイサイズを大きくし, ア レイサイズが $(10+4) \times (10+4)$ の場合のウェーハ内 最高温度を図15, 図16に示す.この場合でも同様に, PE 歩留まりの向上につれ, 冗長 PE を周囲に配置す る場合はスタック内温度が高くなり, 冗長 PE の集中 配置ではスタック内温度が低下する.このアレイサイ ズでは, $\beta_t = 0.316$ でも十分な歩留まりを得ることが



でき,このときのシフト重みが最も温度を低下できる.

図 16 で PE 歩留まりが 0.70 のとき, $\beta_t = 0.0316$ の 重み付きシフトは,HS 法に比べて 5.2 度(スタック 内温度上昇に対して 8.7%)低い温度を実現できる.

4.3 スタック内最高温度のばらつき

本節では、冷却性能の安定性について評価する.熱 伝導シミュレーションでは、様々な欠陥 PE の配置を 持つウェーハを多数生成し、条件や PE 歩留まりごと に内部最高温度を平均して温度評価を行った.その場 合、欠陥 PE の個数が同じであっても、欠陥 PE の場 所や再構成手法によっては、スタック内最高温度にか なりの差が生じる.ある個数の欠陥 PE を持つ場合、 平均温度が同じだとしても、欠陥 PE の配置による温 度のばらつきが少ない方が、安定して冷却が可能であ り、性能が優れている.

冷却性能の安定性を評価するためには,多数の欠陥 パターンを生成し,本アルゴリズムによって再構成を 行い,PE歩留まりごとに熱伝導シミュレーションで スタック内最高温度を評価し,標準偏差を求めればよ い.図17に,冗長PEの集中配置の場合(アレイサ イズ(16+4)×(16+4))のPE歩留まりとシフト重 みに対する温度の標準偏差を示す.図から分かるよう に, $\beta \sim 0.100$ のシフト重みでは,明らかにHS法に 比べてばらつきが小さい.PE歩留まりが0.90付近で は,約半分の標準偏差を得ることができた.PE歩留 まりが非常に低い場合は,欠陥回避可能なパターンが ほとんど一意に定まり,シフト重みによる差が出にく い.また,PE歩留まりが十分大きいと,ほとんどの



PE を動かすことなく欠陥回避が可能であり, シフト 重みによる影響が少なくなるため, やはり HS 法との 差は小さくなる.

5. 結 論

本論文では,冷却を考慮した格子結合型マルチプロ セッサシステムのウェーハスタック実装について議論 した.放熱を効果的に行うために,欠陥回避用の冗長 PEを中心に配置し,温度予測モデルに基づいたシフ ト方向の重み付けを行った.シフト方向の重み付けの 際に,シフトの方向が局所解に陥りウェーハ歩留まり が低下してしまうことを避けるため,正規分布乱数に よってゆらぎを与えた.ウェーハ歩留まりとスタック 内の最高温度をシミュレーションによって求めたとこ ろ, 冗長 PE を中心に配置する方式は, 歩留まりを あまり低下させずにスタック内最高温度を大幅に低下 させることできた.シフト方向に重みを加える場合, 乱数によるゆらぎが一定以上(β_t~0.100 以上)であ れば,ウェーハ歩留まりをほとんど低下させずに,ス タック内温度をさらに 9%前後低下させることができ ることが分かった.温度の安定性について評価したと ころ, 欠陥パターンに対するスタック内最高温度のば らつきの標準偏差は,重み付きシフトを用いると,最 大で HS 法の約半分になることも示された.

今回の方法では,欠陥を回避した後,中心方向に移 動可能にもかかわらず周囲に休止 PE が残る場合があ る.これら休止 PE の最適な配置が今後の課題である. 謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費を

用いて行われた.関係各位に感謝する.

参考文献

- Little, M.J. and Grinberg, J.: The 3-D Computer: An Intergrated Stack of WSI Wafers, *Wafer Scale Integration*, pp.253–318 (1989).
- Wojnarowski, R.J., et al.: Three Dimensional Hybrid Wafer Scale Integration Using the GE High Density Interconnect Technology, *International Conference on Wafer Scale Integration*, pp.309–317 (1993).
- Campbell, M.L. and Toborg, S.T.: 3D Wafer Stack neurocomputing, *International Confer*ence on Wafer Scale Integration, pp.67–74 (1993).
- Carson, J.: The Emergence of Stacked 3D Silicon and its Impact on Microelectronics System Integration, *IEEE Int'l Conf. on Innova*tive Systems in Silicon, pp.1–8 (1996).
- Kurino, H., et al.: Three-Dimensional Integration Technology for Real Time Micro-vision Systems, *Int'l Conf. on Innovative Systems in Silicon*, pp.203–212 (1997).
- 6) Kung, S.Y., Jean, S.N. and Chan, C.W.: Fault-Tolerant Array Processors Using Single-Track Switches, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.38, No.4 (1989).
- Numata, I. and Horiguchi, S.: Efficient Reconfiguration Scheme for Mesh-Connected Network: The Recursive Shift Approach, Proc. Parallel Architectures, Algorithms and Networks, pp.221–227 (1996).
- 8) Inoguchi, Y., Matsuzawa, T. and Horiguchi, S.: An Optimal Replacement Policy for Cooling of 3D Stacked Mesh Array, *IEEE High Performance Computing in Asia-Pacific Region*, Vol.2, pp.1087–1096, IEEE Computer Society Press (2000).
- 9) 井口 寧,松澤照男,堀口 進:重み付けシフトによる格子結合型ウェーハスタック実装の放熱と再構成,情報処理学会研究報告,2001-HPC-85, pp.13-18 (2001).
- 10) 井口 寧,松澤照男,堀口 進:ウェーハスタッ ク実装の温度予測モデル,情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.44, No.SIG 7 (TOM8), pp.1–11 (2003).
- 11) 日本機会学会(編):流れの数値シミュレーション, pp.56-93, コロナ社 (1988).

(平成 15 年 2 月 3 日受付)(平成 15 年 5 月 9 日採録)



井口 寧(正会員)

1991 年東北大学工学部機械工学 科卒業.1994 年~1997 年日本学術 振興会特別研究員.1997 年北陸先 端科学技術大学院大学情報科学研究 科博士後期課程修了.現在,同大学

情報科学センター助教授.また,2002年から科学技 術振興事業団さきがけ研究21(機能と構成)に参加 し研究に従事.この間並列システム,ウェーハスタッ ク集積システムに関する研究を行う.IEEE,電子情 報通信学会各会員.



松澤 照男(正会員)

1948年生.1973年信州大学大学 院工学研究科修士課程修了.同年信 州大学医学部助手.1986年沼津工業 高等専門学校助教授.1991年北陸先 端科学技術大学院大学助教授.1995

年同教授 . 数値流体力学における並列計算の研究に従 事.医学博士.日本機械学会,日本数値流体力学会, 日本流体力学会等各会員.



堀口 進(正会員)
1952年生.1976年東北大学工学
部通信工学科卒業.1981年同大学大
学院博士課程修了.1982年東北大学
工学部情報工学科助手.1989年同助
教授.1992年北陸先端科学技術大学

院大学情報科学研究科教授.この間,並列処理,超並 列システム,ウェーハ規模集積システム,並列アルゴ リズム,マルチメディア統合システムに関する研究を 行う.1986年6月~1987年7月米国 IBM ワトソン 研究所・客員研究員として並列計算アルゴリズムの研 究に従事.IEEEシニア会員,電子情報通信学会,情 報理論とその応用学会各会員.