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

Title	改良型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
Author(s)	井口,寧; 松澤,照男; 堀口,進
Citation	情報処理学会研究報告 : 数理モデル化と問題解決研究報告, 2002(36): 13-16
Issue Date	2002-05
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/3316
Rights	社団法人 情報処理学会, 井口寧／松澤照男／堀口進, 情報処理学会研究報告 : 数理モデル化と問題解決研究報告, 2002(36), 2002, 13-16. 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	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

改良型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

井口 寧 †,　松澤 照男 †,　堀口 進 ‡
† 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター
‡ 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

本論文では，ウェーハスタック実装の温度予測モデルに基づく冷却アルゴリズムを提案する．ウェーハスタック実装は，一枚のウェーハ上に多数のプロセッシング要素 (PE) を構築し，これを 3 次元的に積層して構築する実装方式の一つであるが，3 次元構造内部の PE が発生する動作熱の冷却が重要な問題である．最初にウェーハスタック実装の構成と放熱モデルを定め，発熱 PE を冷却が容易なウェーハの外側に移動するために，PE 移動の方向に重みを付加する再構成アルゴリズムを提案する．熱伝導シミュレーションおよび温度予測モデルによって本手法を評価したところ，最適なパラメータを選択した場合，直径 195mm のウェーハスタックで約 2K の冷却効果が得られた．

Enhanced Biased Shifting Cooling Scheme for 3D Stacked Mesh Array

Yasushi Inoguchi†,　Teruo Matsuzawa†,　Susumu Horiguchi‡
† Japan Advanced Institute of Science and Technology, Center for Information Science
‡ Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of Information Science

This paper proposes cooling schemes for 3D stacked implementation based on a temperature estimation model. The 3D stacked implementation is a pile of WSIs which contains a large number of processing elements (PEs) on a silicon wafer. However, cooling method of PEs is one of the most crucial problems because it is difficult to radiate heat generated by PEs. Introducing thermo-conducting model, biased shifting method is proposed. This method moves hot PEs toward the outer side of the wafer where cooling is achieved on. The maximum temperature in the stacks are evaluated by thermo-conducting simulation and the temperature estimation model, it was shown that the proposed scheme can reduce maximum temperature about 2K in $\phi = 195mm$ stack.

1　はじめに

大規模なシステム LSI，画像処理システムや超並列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) を搭載し，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システムが提案され，積層手法，冷却手法，および欠陥回避技術などについて様々な研究がなされている．しかしながら，3 次元構造を有するウェーハスタックシステムでは，システムの大規模化にともない，スタック内部の PE が発生する動作熱の冷却手段が重要な問題となっている．

冷却問題に対して，ウェーハスタック内部に熱を伝える縦方向のシャフトを設け，この熱伝達シャフトを通じて冷却する方法などが提案され，実際にウェーハスタックシステムが試作されている．本研究では，ウェーハの外側が冷却効率に優れることに注目し，内部の動作 PE の配置を工夫し，発熱する PE をウェーハの外側に移動する冷却手法を試みる．冷却メカニズムを正確に求めるために，ウェーハスタックの温度予測モデルを導入し，このモデルに従ってシフト方向決定のアルゴリズムを改良する．最後に温度予測モデルおよび熱伝導シミュレーションでスタック内最高温度を評価を行なう．

2　ウェーハスタック実装

ウェーハスタックの構成法

ウェーハスタック実装の概念図を図 1 に示す．今後の議論のために，座標系を図 1 に示すように定める．それぞれのウェーハ上には，実装すべき格子結

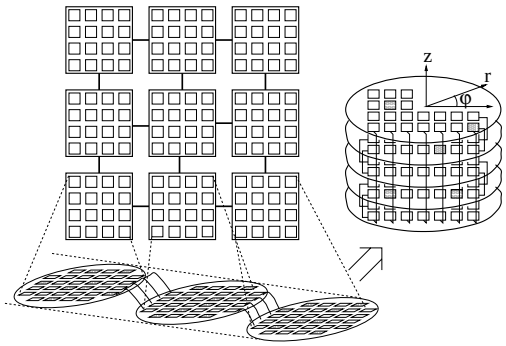


図 1: ウェーハスタック実装の概念図

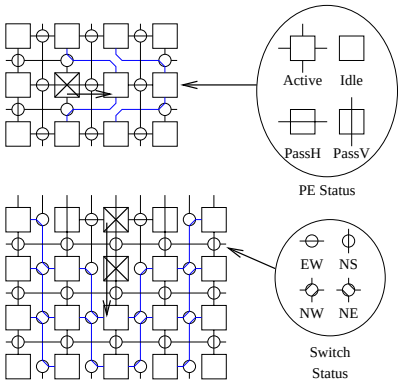


図 2: 1-1/2 トラックモデルと欠陥回避の例

合網の一部を搭載し，各ウェーハ上の PE どうしをウェーハ間結線で結合することによって大規模な格子結合網を実現する．本論文では，ウェーハスタックの冷却をスタックの上下面を除いた円板状のウェーハの周囲から行なうと仮定する．最上面層や最下面層は，画像処理における CCD などの素子に用いられることを想定するためである．

再構成問題

ウェーハスタックに用いるウェーハには，製造時に発生する欠陥 PE が存在するため，冗長 PE によって欠陥 PE の機能を代替する必要がある．図 2 に，格子結合網の欠陥回避可能なアーキテクチャを示す [1]．最初に使用を想定した PE の他に，欠陥 PE の機能を代替するための冗長 PE を配置する．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．各 PE の周囲には，1 本のバイパス用トラックとスイッチ群が置かれ，これらを切り替え網を再構成することによって，図に示すように欠陥 PE を回避し論理的に欠陥のない結合網を得る．このように，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．

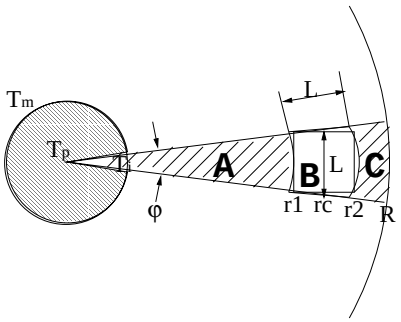


図 3: 休止 PE を含む扇形領域の発熱モデル

一方，欠陥 PE のシフト方向を決定する再構成アルゴリズムは，ウェーハスタックの冷却効率に大きく影響する．なぜならば，動作 PE は動作熱を発生し，休止 PE や機能しない PE は電源をカットでき発熱しないため，動作 PE を冷却効率が高いウェーハの周辺部に，休止 PE をウェーハの中心にシフトできれば，高い冷却効率が期待できるからである．

3 温度予測モデル

本章ではウェーハスタックの温度予測モデルを，ウェーハ上の PE チップの状態から近似的に導出する．問題の簡略化のため，次のような仮定を置く．ウェーハ間の熱移動について，ウェーハ間の温度分布の差が小さいと推定できるので，上下方向の熱移動は無視できると仮定するまた，ウェーハ上の円周方向への熱移動も十分小さいものと仮定できる．図 3 に示す休止 PE を含む扇形領域の熱伝導を考える．図中，領域 B を休止 PE とし，領域 A,C を発熱 PE とすると，一次元熱伝導となり，λ を熱伝導率，発熱 PE の単位体積あたりの発熱量を $\dot{q_v}$ とすると，半径 r に対する温度 T は次のように書ける．

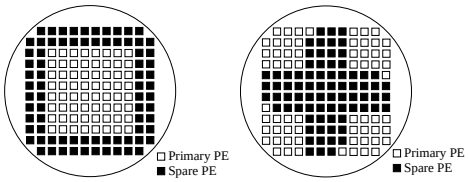
$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q_v}}{\lambda} = 0 \qquad (1)$$

ウェーハの半径を R, 周囲温度を T_a，ウェーハ中心から PE の中心までの距離を $r_c = (r_1 + r_2)/2$，PE のサイズを $L \times L$ として式 (1) を解くと，中心温度 $T_i(0)$ は次のように近似できる．

$$T_i(0) = \frac{\dot{q_v}}{4\lambda}\left\{R^2 + 2r_cL\left(\ln(r_c/R)^2 - 1\right)\right\} + T_a$$

これを複数の休止 PE に対して重ね合せて行けば良い．$r_c^{(j)}$ を j 番目の休止 PE のウェーハ中心からの距離とすると，N_i の休止 PE を含むウェーハ中心温度 $T_m(0)$ は，

$$T_m(0) = \frac{\dot{q_v}}{4\lambda}\left[R^2 + \frac{L^2}{\pi}\cdot \sum_{j=1}^{N_i}\left\{\ln(r_c^{(j)}/R)^2 - 1\right\}\right] + T_a \qquad (2)$$



(a) 周囲配置　　(b) 集中配置

図 4: 冗長 PE の初期配置

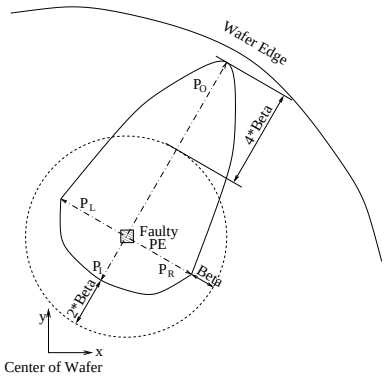


図 5: シフト確率の方向による重み付け

となり，この式によってスタック内最高温度を推測することができる．

4　冷却方式

冷却手法

a) 冗長 PE の集中配置

初期に動作すると仮定している PE と冗長 PE の初期配置について考える．冗長 PE をウェーハ周囲に配置する場合 (図 4(a)) 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いことが期待でき，シフトするとしても，どの方向にシフトしても冗長 PE を得られるため，高いシステム歩留りが期待できる．しかし，冷却の観点から考えると，欠陥 PE が少なくあまりシフトが行なわれない場合，中心部にたくさんの動作 PE が集中するため，冷却効率は高くない．

一方，冗長 PE を中心に配置する方式 (図 4(b)) は，欠陥 PE をシフトする方向がウェーハの内側に限定され，高いシステム歩留まりは期待できない．その反面，冷却の観点からは，外縁部にある PE から動作 PE として稼働するため，高い冷却効率が期待できる．

b) シフト方向の重み付け

ウェーハ上の欠陥を救済する手法として，ヒューリスティックにシフト方向を決定する HS 法が沼田らによって提案された [1]．HS 法は，簡単なアルゴリズムで高いシステム歩留りを得ることができる優れた再構成アルゴリズムである．HS 法では，乱数によってどの方向にも均一にシフトするが，冷却の観点からは，できるだけウェーハの外側に向ってシフトする方が高い冷却効率が期待できる．そこで HS 法を改良し，シフト方向を決める乱数に外側方向への重み付けを行なう重み付けシフトを提案する．

```
pattern DetermineBiasedShiftDirection(x, y){
  pattern W;
  d = sqrt(x^2 + y^2);
  P_O = (1.0 + 4 · d · β) × 0.25;
  P_I = (1.0 − 2 · d · β) × 0.25;
  P_R = P_L = (1.0 − d · β) × 0.25;
  if( x ≥ 0 && y ≥ 0 ){
      P_x+ = P_O · x/(x + y) + P_R · y/(x + y);
      P_x− = P_I · x/(x + y) + P_L · y/(x + y);
      P_y+ = P_O · y/(x + y) + P_L · x/(x + y);
      P_y− = P_I · y/(x + y) + P_R · x/(x + y);
  }elsif( x < 0 ···
      (Process for Other Quadrant)
  }
  r = random();    /* return between 0 ∼ 1.0 */
  if( r < P_x+ )
      W = Shift_PE(EAST, x, y);
  elsif( r < P_x+ + P_x− )
      W = Shift_PE(WEST, x, y);
  elsif( r < P_x+ + P_x− + P_y+ )
      W = Shift_PE(NORTH, x, y);
  else
      W = Shift_PE(SOUTH, x, y);
  return( W );
}
```

図 6: 改良型重み付けシフトによるシフト方向の決定

図 5 に，改良型重み付けシフトのシフト方向決定の概念図，図 6 にそのアルゴリズムを示す．ウェーハ外側にシフトする確率 P_O，内側にシフトする確率 P_I，および，円周方向にシフトする確率 P_R, P_L とする．例えば P_O は，HS 法の乱数に重みを加え，欠陥 PE のウェーハ中心からの距離 r_c とシフト重み β に比例して外側にシフトする傾向が強くなるよう設定される．重み係数 β が大きいほど，ウェーハ中心から PE の距離に比例して，外側に向ってシフトしやすくなると同時に，内側方向にシフトする確率が小さくなる．

5　スタック内最高温度

スタック内の最高温度について，温度予測モデルと熱伝導シミュレーションの結果を示す．熱伝導シミュレーションの条件として，差分法を用い，ウェーハの素材に Si を想定，熱伝導率は Si と同じ値 ($\lambda = 168.0(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$) を用いた．また，周囲温度 T_a は 25 ℃，1PE 当りの発熱量を 0.5W とした．PE アレイサイズが $(10+4) \times (10+4)$ の時，1 つの PE の面積を $10mm \times 10mm$，ウェーハの直径

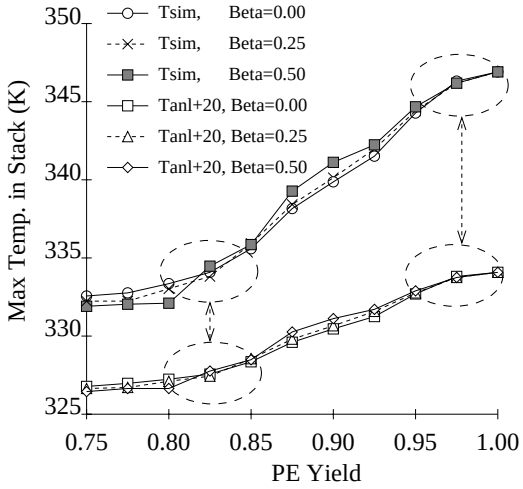


図 7: スタック内最高温度．冗長 PE 周囲配置, $(10+4)\times(10+4)$, $\phi = 195mm$.

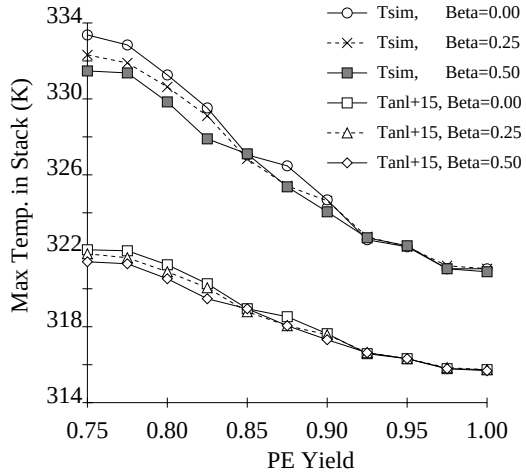


図 8: スタック内最高温度．冗長 PE 集中配置, $(10+4)\times(10+4)$, $\phi = 195mm$

は $195mm$ とする．なお，$(N+R)\times(N+R)$ の表記は，縦横 R 列の冗長 PE を持つアレイから論理的な $N\times N$ の PE アレイを取り出すことを示す．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，中心の 1 枚のウェーハについて二次元的にシミュレーションを行なった．

図 7 に，冗長 PE を周囲に配置した場合のウェーハ内最高温度を示す．図中，T_{anl} が温度予測モデル (式 (2)) による温度予測値，T_{sim} が熱伝導シミュレーションによるウェーハ内最高温度である．PE 歩留まりとは，スタック内の各 PE が正常である確率である．図 7 の場合，PE の歩留まりが高くなるにつれ，冗長 PE が休止 PE としてウェーハ周囲に取り残されるため，スタック内の温度が非常に高くなる．また，外側へのシフト重みがあると再構成が簡単に終わってしまうため，結果として外側に移動する動作 PE が少なくなってしまう．一方，重みが小さい場合，内側に移動した動作 PE が他の動作 PE を押し出すケースがあるため，結果としてウェーハ内の動作 PE の分布が均一になる．PE 歩留まりが低い領域では，シフト重みが有効に作用し，どの PE を用いても欠陥 PE を回避できる時には外側にある PE を使うようになる．図中に破線円で示したように，PE 歩留まりが 0.82 より低い場合はシフト重み $\beta = 0.50$ の方が温度を低くでき，PE 歩留まりが $0.82 \sim 0.84$ の領域で $\beta = 0.25$ が最低となり，PE 歩留まりがこれより高い場合には $\beta = 0.00$ の方が温度を低くできる．この最低温度を与える PE 歩留まりは，温度予測モデルによる結果と熱伝導シミュレーションの結果と一致している．

図 8 に，冗長 PE を集中して配置した場合のウェーハ内最高温度を示す．PE 歩留まりが高いと，中心にある冗長 PE が使われず外周部にある PE が動作 PE になるため，スタック内部温度が低くなる．図 7 と同様に，$\beta = 0.00$ と $\beta = 0.50$ が同じ温度を与える点があるが，この PE 歩留まりを除いて，常に $\beta = 0.50$ の方が低い温度を与える結果となった．PE 歩留まりが大きくなると温度の差は小さくなるが，PE 歩留まりが 0.75 の時，シミュレーションでは 2K の冷却効果が得られた．

また，前 2 例と異なる場合として，PE アレイが $(16+4)\times(16+4)$ で PE サイズが $5mm\times5mm$，各 PE の発熱量を 0.5W，ウェーハ直径が 140mm の場合について評価したところ，シフト重み $\beta = 0.50$ の時，最大で 4K の冷却効果が得られている．

6 結論

本論文では，ウェーハスタック実装の温度予測モデルに基づく冷却手法について議論した．最初にターゲットとなるウェーハスタック実装の構成と冷却モデルを簡単に説明し，この冷却モデルに基づいた冷却手法として，改良型重み付けシフト方式を提案した．熱伝導シミュレーションと温度予測モデルによってウェーハスタック内温度を評価したところ，冗長 PE を集中配置し重み $\beta = 0.50$ とした場合，直径が $195mm$ のウェーハスタックに対して約 2K の冷却効果が得られた．

参考文献

[1] Numata, I. and Horiguchi, S.: “Efficient Reconfiguration Scheme for Mesh-Connected Network: The Recursive Shift Approach”, *Proc. of the Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, pp. 221–227 (1996).