

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820133

研究課題名(和文) 三次元集積回路の動作発熱に起因する薄化チップの動的局所変形と電気特性変動の研究

研究課題名(英文) The effect of dynamic-local deformation on transistor characteristics by operation heating in 3D-IC

研究代表者

木野 久志 (Kino, Hisashi)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：10633406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の集積回路として三次元集積回路(Three dimensional integrated circuit: 3D IC)が期待されているが、異種材料間の熱膨張係数差により局所応力の影響が懸念される。本研究では局所応力がトランジスタに与える種々の影響を評価した。テスト構造による評価の結果、異種材料間の熱膨張係数差で生じる局所曲げ応力は薄化Si基板に大きな歪を与え、トランジスタ特性にも大きな影響を与えることが判明した。三次元集積回路の実用化展開のためには異種材料間の熱膨張係数差によって生じる機械応力の影響を抑制することが喫緊の課題である。

研究成果の概要(英文)：A three-dimensional (3-D) IC has many lots of through-Si vias (TSVs) and metal microbumps to achieve electrical connections between stacked thinned LSI chips, and also has organic adhesives to obtain completely bonded thinned IC chips. However, these elements, especially microbumps and organic adhesives, induce static and dynamic local bending of the thinned IC chips. In this study, for the first time, we investigated impacts of the static and dynamic local bending on MOSFET characteristics using a novel test structure. We demonstrated that the static local bending changed the carrier mobility accordingly with the position between the Si microbump and MOSFET using a novel test structure. We also demonstrated that the dynamic local bending changed the MOSFET performance. These results show that it is necessary to carefully design the layout of microbumps and MOSFETs in order to realize higher performance 3-D IC with suppressing circuit performance fluctuation due to local bending stress.

研究分野：半導体工学

キーワード：3D IC 金属マイクロバンプ アンダーフィル 信頼性 曲げ応力

### 1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会を支えているのは紛れもなく半導体素子で構成された LSI である。LSI の高性能化は LSI を構成している MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) の微細化によってなされてきた。しかしながら、微細化の物理限界が近づいており、微細化以外の手法での高性能化が必要とされている。近年、微細化以外の高性能化手法として LSI の三次元集積化技術に高い関心が集まっている。LSI の三次元積層は薄化 LSI チップを長さ数十  $\mu\text{m}$  の極めて短い Si 貫通配線(Through-Si Via: TSV)と金属マイクロバンプを介して電気的接続が行われることで成される。3D IC は従来の(二次元)IC を根本的に置き換える集積回路として注目されているが、その実現には解決すべき課題が存在していることも事実である。

3D IC の金属マイクロバンプと有機系接着剤間の異なる熱膨張係数差によって静的および動的な局所曲げ応力が発生する。この局所曲げ応力が MOSFET に及ぼす影響は未だ不十分であり、3D IC の普及の妨げとなっている。

### 2. 研究の目的

本研究は、3D IC に特有な、動作回路の発熱に起因する薄化チップの局所変形とそれによる半導体素子の局所特性変動を定量評価する新手法の確立および理論解析を目的とする。3D IC の薄化チップ間には電気的接続用の多数の金属マイクロバンプと機械的接合用の有機系接着剤が存在する。有機系接着材は 100 ppm/ 前後の高い熱膨張係数を有し、動作回路の発熱により大きく膨張する。有機系接着材の熱膨張と金属マイクロバンプは厚さ 50  $\mu\text{m}$  以下のチップに局所的な機械変形を生じさせ、チップ上の半導体素子の特性に影響を与える。本研究は、チップ機械変形の発生箇所と変形量を完全に制御した形で、簡便に薄化チップに印加可能な新手法を提案するとともに、変形による応力が半導体素子に与える影響を機械工学と電子工学の観点から理論・実験解析し、今後の 3D IC の設計指針を確立するものである。

### 3. 研究の方法

本研究では研究代表者が先行研究で提案している図 1 に示す金属マイクロバンプの代わりに Si バンプを有する評価試料を用いる。作製工程を図 2 に示す。Si バンプは Bosch プロセスにより作製した。作製した Si バンプは面積 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 、高さ 20  $\mu\text{m}$ 、ピッチ 50  $\mu\text{m}$  である。この Si バンプが形成された Si 基板上に 35  $\mu\text{m}$  まで薄化した LSI チップを接着し、Si 基板と LSI チップ間にアンダーフィル剤であるエポキシを注入後、エポキシの硬化処理を行った。本評価試料の利点は短期間、低コスト、高評価信頼性を有することである。実際に 3D IC を試作し測定する手法では時間、

コスト、評価信頼性の観点から困難と考えられる。特に評価信頼性の点においては実際の 3D IC には多数の特性変動要因があるため、取得した特性変動から有機系接着剤の熱膨張による影響を抽出することが困難となるからである。

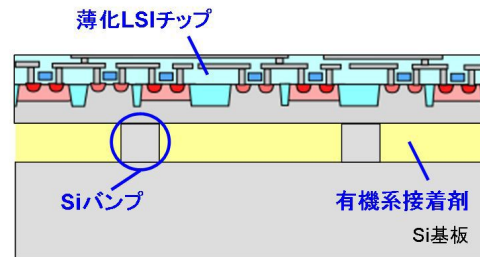


図 1 Si バンプを有する評価試料の断面構造

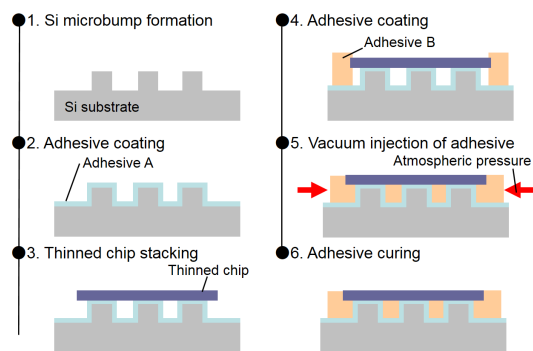


図 2 評価試料の作製工程

作製した評価試料を用いて有機系接着剤の熱膨張による薄化 Si チップの機械的変形量と、機械的変形が与えられた薄化 LSI チップ上の MOSFET の測定を行い電気特性の変動を実測することで種々の評価を行う。

### 4. 研究成果

薄化した Si チップを Si バンプ上に接合し、有機系接着剤を注入後硬化した評価試料の表面形状を測定した。測定は白色干渉計を用いて行った。結果、図 3 に示すように非常に大きな局所曲げを観察した。

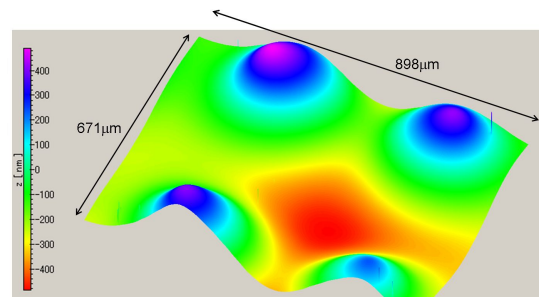


図 3 白色干渉計による評価試料の表面形状測定結果

薄化した IC チップ上に形成された最も基本となる電子回路である CMOS インバータの

入出力特性を測定した。測定結果を図4に示す。局所曲げ応力の印加前後でのCMOSインバータのスイッチング電圧の上昇確認に成功した。CMOSインバータは圧縮応力が印加される箇所に設置されており、圧縮応力に起因したnMOSFETの駆動電流低下とpMOSFETの駆動電流増加がスイッチング電圧の変動原因と考えられる。このようなマイクロバンプと有機系接着剤間の熱膨張係数差によるCMOS回路の特性変動の取得はこれまでに類が無く、非常に有意な知見であるといえる。

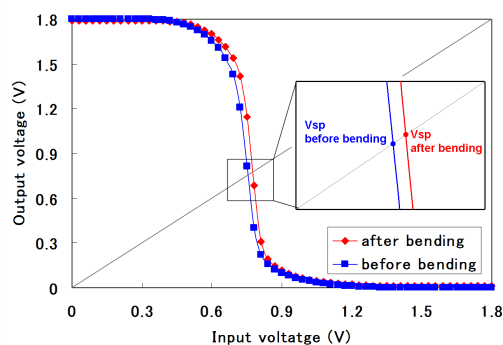


図4 局所曲げ応力によるCMOSインバータの特性変動

さらに、作製した試料をマイクロヒーター上に設置し、温度変化環境下での薄化ICチップ上のMOSFETの電流-電圧特性を測定した。結果、局所曲げ応力を印加していないMOSFETは様に電流値が増減したが、曲げ応力が印加されたMOSFETの電流値の増減には大きなバラツキが観察された。これは有機系接着剤の熱膨張により分布のある曲げ応力が印加されたためと考えられる。

また、有限要素法によるシミュレーションを用いた解析も実施した。シミュレーションにより先に記した熱膨張の効果など実測に近い結果を得た。このことからシミュレーションによる評価も非常に有用であることが判明した。

以上により当初の目標として掲げた3D IC内に発生する熱膨張係数差によって生じる局所変形のシミュレーション、回路の動作発熱により膨張した有機系接着剤がMOSFETに与える影響、マイクロバンプの密度とMOSFETの特性変動の依存関係の解明を成した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

1. M. Murugesan, Y. Imai, S. Kimura, T. Fukushima, J.-C. Bea, H. Kino, K.-W. Lee, T. Tanaka, and M. Koyanagi, "Deteriorated Device Characteristics in 3D-LSI Caused by

Distorted Silicon Lattice," IEEE Transaction on Electron Devices, 61, No. 2, pp. 540-547 (2014)

〔学会発表〕(計 7件)

1. 木野久志, 池ヶ谷俊介, 小柳光正, 田中徹, "三次元集積化における異種材料間の熱膨張係数差がおよぼす影響," 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月12日, 神奈川 (査読無し)
2. 菅原陽平, 橋口日出登, 谷川星野, 木野久志, 福島誉史, 李康旭, 小柳光正, 田中徹, "3D IC用ピアラスト・バックサイドビアプロセスにおけるプラズマダメージのMOSFET特性への影響評価," 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月19日, 北海道 (査読無し)
3. H. Kino, H. Hashiguchi, Y. Sugawara, S. Tanikawa, T. Fukushima, K.-W. Lee, M. Koyanagi, and T. Tanaka, "Minimization of Keep-Out Zone (KOZ) in 3D IC by Local Bending Stress Suppression with Low Temperature Curing Adhesive," 64rd Electronic Components and Technology Conference 2014, 2014/05/28, Florida, USA (査読有り)
4. Y. Sugawara, H. Hashiguchi, S. Tanikawa, H. Kino, K. Lee, T. Fukushima, M. Koyanagi, and T. Tanaka, "Investigation of the Plasma Damage by Etching Process for TSV Formation in Via-last Backside-via 3D IC," Extended abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2014/09/11, Tsukuba, Japan (査読有り)
5. 木野久志, 福島誉史, 小柳光正, 田中徹, "室温硬化樹脂による3D IC内の機械応力低減に関する検討," 第74回応用物理学会学術講演会, 2013年9月20日, 京都 (査読無し)
6. H. Kino, T. Fukushima, K.-W. Lee, M. Koyanagi, and T. Tanaka, "Local Bending Stress Reduction with Room-Temperature Curing Adhesive for Decrease in Keep-out-Zone (KOZ) of 3D IC," Extended abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2013/9/27, Fukuoka, Japan (査読有り)
7. H. Kino, J.-C. Bea, M. Murugesan, K.-W. Lee, T. Fukushima, M. Koyanagi, and T. Tanaka, "Impacts of Static and Dynamic Local Bending of Thinned Si chip on MOSFET Performance in 3-D Stacked LSI,"

63rd Electronic Components and Technology  
Conference 2013, 2013/5/29, Las Vegas,  
USA (査読有り)

〔図書〕(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lbc.mech.tohoku.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

木野 久志 (KINO, Hisashi)

東北大学・学際科学フロンティア研究所

・助教

研究者番号：10633406