LSI 上 MEMS によるヘテロ集積化

江刺 正喜*, 田中 秀治**

Heterogeneous Integration of MEMS on LSI

Masayoshi ESASHI* and Shuji TANAKA**

* 東北大学マイクロシステム融合研究開発センター (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 519-1176)

** 東北大学大学院工学研究科ロボティクス専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)

* Micro System Integration Center, Tohoku University (519-1176 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-0845)

** Department of Robotics, Graduate School of Engineering, Tohoku University (01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579)

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を用いると、センサのようなシステムの鍵を握る部品を、半導体微細加工技術で小形に製作し低価格に供給できる^{1),2)}。MEMS は情報処理のための LSI と組み合わせて用いられることが多く、このヘテロ集積化と呼ばれる技術が盛んに研究されている^{3),4)}。図 1 には MEMS と LSI のヘテロ集積化の方法を示す。(a) は表面マイクロマシニングと呼ばれる方法で、LSI ウェハ上に MEMS を形成するものである。LSI を壊さないように MEMS を作る必要があり、温度などで制約されるが、MEMS と LSI の結線数を多くできるため、例えばビデオプロジェクト用のミラーアレイなどに用いられている。(b) は MEMS と LSI を別に作り組み合わせるもので、MEMS 製造時の制約は少ないがワイヤボンディングなどで接続するため、その結線数などでは制約を受ける。スマートフォンのユーザインターフェースに用いる MEMS などに使われる。(c) のキャリヤウェハに形成した MEMS を LSI ウェハ上へ転写する方法は、上記のそれぞれの欠点を補うことができる⁵⁾。また (d) のように MEMS ウェハと LSI ウェハを

重ね、TSV (Through Si Via) と呼ばれる Si の貫通配線を用いる方法も、ヘテロ集積化に優れた方法といえる。以下で述べるように、(c) で LSI ウェハ上に MEMS を転写するときに、ウェハレベルで一括転写する方法 (2.1)、およびキャリヤウェハからチップレベルで転写する方法 (2.2) がある。また (d) の TSV も LSI ウェハに形成するもの (3.1)、MEMS ウェハに形成するもの (3.2)、および両ウェハに形成するもの (3.3) がある。本稿ではこれらを具体例と共に紹介する。

なお MEMS をウェハ工程でパッケージングすることが有効であるため、このウェハレベルパッケージングを同時に考えることが重要である⁶⁾。

2. キャリヤウェハに形成した MEMS の LSI ウェハ上への転写

2.1 ウェハレベル転写

図 2 はオペアンプを 20×20 配列した LSI 上にボロン添加ダイヤモンド (BDD) 電極を配列させた、生体物質検知センサである⁷⁾。ダイヤモンドは触媒活性を持たないため、水を電気分解する電圧が高い。このため生体関連物質などを電気化学的に酸化・還元する電圧を印加して、これらを検出するのに適している。ダイヤモンドを堆積するには 800°C の温度が必要で、LSI を壊さないようにこれをキャリヤウェハに形成し LSI に転写している。

図 3 は LSI 上に、圧電性の PZT [Pb(Zr,Ti)O₃] のバイモルフによるスイッチを形成したものである⁸⁾。この PZT はゾル・ゲル法で形成してあるが、どの形成方法でも 700°C 程度の高温が必要で、LSI を壊さないようにウェハレベルの転写で製作した。

2.2 チップレベル転写

キャリヤウェハ上の MEMS を LSI チップの一部にだけ転写し、残りの MEMS を別の LSI チップに用いることができる。これには図 4 に示す選択転写技術を使用する⁹⁾。MEMS ウェハをレジストでガラスのキャリヤウェハに張り付けておき、LSI ウェハ上のパンプに接合した後、ガラス裏面か

図 1. MEMS と LSI のヘテロ集積化, (a) 表面マイクロマシニング, (b) MEMS と LSI の組立, (c) キャリヤウェハに形成した MEMS の LSI ウェハ上への転写, (d) MEMS ウェハと LSI ウェハを重ねて貫通配線 (TSV) 利用

図2. LSI上の20×20ダイヤモンド電極アレイ, (a)製作工程, (b)チップ写真とその拡大, (c)ヒスタミンを中央に滴下したときの広がる様子(利用例)

図3. LSI上のPZTバイモルフによるスイッチ, 製作工程と写真

らレーザ光でレジストを炭化し剥離させる(レーザデボンディング)。

図5はこの方法でLSI上にSAW(Surface Acoustic Wave)フィルタを転写したもので, 異なる共振周波数の複数のSAWフィルタをチップ上に形成してある¹⁰⁾。占有面積が小さくなるだけでなく, 配線による寄生インダクタンスや寄

図4. 選択転写工程

図5. LSI上に選択転写したSAWフィルタの写真, 異なる共振周波数のフィルタ特性

図6. BST可変容量をSAW用LiTaO₃基板上に選択転写した可変帯域フィルタ(回路, 写真, 特性)

生容量を減らせる効果がある。

LiTaO₃を用いたSAWフィルタの基板の上に, 強誘電体のBST[Ba(SrTi)O₃]を用いた可変容量素子を選択転写して, 可変帯域フィルタを製作した¹¹⁾。図6にその回路(電圧印加用抵抗は省略)と写真, およびBSTへの電圧を変えたときの可変帯域特性を示している。

3. MEMS ウェハと LSI ウェハを重ねて貫通配線(TSV)利用

3.1 LSI ウェハの貫通配線

介護ロボットを目的として, 人と接触しても安全のように体表に形成する触覚センサネットワークを開発している。図7には, センシングと45 MHzクロックでのパケット通信機能を持つLSI上に形成した容量型触覚センサの製作工程, および写真と動作例を示している¹²⁾。LSIにBCB樹脂(Benzocyclobutene)で触覚センサ構造を張り付けており, LSIウェハの裏面にTSVで取り出して, フレキシブルの共通配線に接続している。

3.2 MEMS ウェハの貫通配線

100×100に配列した電子源としてのMEMSウェハにLSIを貼り合わせた, 超並列電子ビーム描画用アクティブマトリックス電子源を開発している¹³⁾。図8には, その製作工

図7. LSIにTSVを形成した触覚センサネットワーク, (a) 製作工程, (b) 写真, (c) 動作例

図8. 貫通配線付nc-Si電子源を用いた100×100アクティブマトリクス電子源アレイ, (a) 製作工程, (b) 構造と写真, (c) 1/100縮小型超並列電子ビーム描画実験装置

図9. LSIの絶縁分離と貫通配線 (拡大平面構造と製作工程)

図10. LSI貫通配線の製作工程

程, 構造と写真, および描画実験装置を示してある。

電子源としては, SiをHF中で陽極酸化して形成したポーラスSiを酸化し, トンネル接合のカスケード構造とした, ナノクリスタルSi(nc-Si)を用いた。電子が10V程の電圧で加速されて放出される。それぞれの電子源から, そのMEMSウェハに形成したpoly-SiによるTSVで裏面の駆動用LSIに接続される。

3.3 MEMSウェハとLSIウェハの貫通配線

この駆動用LSIには, 図8(b)のように同心円状のパターンが見える。これは電圧を印加して電子的な収差補正を行うものである。このため図9のようにLSIチップには絶縁

分離用の溝や、電気的接続のための TSV を形成した¹³⁾。この TSV 付 LSI ウェハを、TSV 付 nc-Si の MEMS ウェハと重ねて用いる。

LSI に形成する TSV の製作工程を図 10（前ページ掲載）に示す。LSI 表面の金属配線層に裏面から Cu の TSV がつながるようになっている。

4. おわりに

キャリヤウェハに形成した MEMS の LSI ウェハ上への転写、および MEMS ウェハと LSI ウェハを重ねて TSV により接続したり配線を取り出したりする方法について、具体例を示した。多様な目的に応え、高性能化をもたらすヘテロ集積化技術として有用である。

(2017.6.17- 受理)

文 献

- 1) 江刺正喜：“はじめての MEMS,” 森北出版, 2011
- 2) 江刺正喜, 小野崇人：“これからの MEMS—LSI との融合—,” 森北出版, 2016
- 3) M. Esashi and S. Tanaka: “Heterogeneous Integration by Adhesive Bonding,” *Micro and Nano Systems Letters*, Vol. **1**, No. 3, 2013
- 4) A. C. Fischer, F. Forsberg, M. Lapisa, S. J. Bleiker, G. Stemme, N. Roxhed, and F. Niklaus: “Integrating MEMS and ICs,” *Microsystems & Nanoengineering*, Vol. **1**, p. 15005, 2015
- 5) M. Esashi and S. Tanaka: “Stacked Integration of MEMS on LSI,” *Micromachines*, Vol. **7**, No. 8, p. 137, 2016
- 6) M. Esashi: “Wafer Level Packaging of MEMS,” *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. **18**, No. 7, p. 073001, 2008
- 7) K. Y. Inoue, M. Matsudaira, M. Nakano, K. Ino, C. Sakamoto, Y. Kanno, R. Kubo, R. Kunikata, A. Kira, A. Suda, R. Tsurumi, T. Shioya, S. Yoshida, M. Muroyama, T. Ishikawa, H. Shiku, S. Satoh, M. Esashi, and T. Matsue: “Advanced LSI-based Amperometric Sensor Array with Light-shielding Structure for Effective Removal of Photocurrent and Mode Selectable Function for Individual Operation of 400 Electrodes,” *Lab on a chip*, Vol. **15**, pp. 848–856, 2015
- 8) K. Matsuo, M. Moriyama, M. Esashi, and S. Tanaka: “Low-voltage PZT-actuated MEMS Switch Monolithically Integrated with CMOS Circuit,” *Technical Digest IEEE MEMS 2012*, pp. 1153–1156, 2012
- 9) T. Samoto, H. Hirano, T. Somekawa, K. Hikichi, M. Fujita, M. Esashi, and S. Tanaka: “Wafer-to-wafer Transfer Process of Barium Strontium Titanate Metal-insulator-metal Structures by Laser Pre-irradiation and Gold-gold Bonding for Frequency Tuning Applications,” *Transducers2013 & Eurosensors XXVII*, pp. 171–174, 2013
- 10) S. Tanaka, M. Yoshida, H. Hirano, and M. Esashi: “Lithium Niobate SAW Device Hetero-transferred onto Silicon Integrated Circuit Using Elastic and Sticky Bumps,” *2012 IEEE International Ultrasonics Symposium*, pp. 1047–1050, 2012
- 11) H. Hirano, T. Kimura, I. P. Koutsaroff, M. Kadota, K. Hashimoto, M. Esashi, and S. Tanaka: “Integration of BST Varactors with Surface Acoustic Wave Device by Film Transfer Technology for Tunable RF Filters,” *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. **23**, No. 2, p. 025005, 2013
- 12) M. Makihata, S. Tanaka, M. Muroyama, S. Matsuzaki, H. Yamada, T. Nakayama, U. Yamaguchi, K. Mima, Y. Nonomura, M. Fujiyoshi, and M. Esashi: “Integration and Packaging Technology of MEMS-on-CMOS Capacitive Tactile Sensor for Robot Application Using Thick BCB Isolation Layer and Backside-grooved Electrical Connection,” *Sensors and Actuators A*, No. 188, pp. 103–110, 2012
- 13) M. Esashi, A. Kojima, N. Ikegami, H. Miyaguchi, and N. Koshida: “Development of Massively Parallel Electron Beam Direct Write Lithography Using Active-matrix Nanocrystalline-silicon Electron Emitter Arrays,” *Microsystems & Nanoengineering*, Vol. **1**, p. 15029, 2015

著者紹介

江刺正喜（えさし まさよし）

昭和 46 年東北大学工学部電子工学科卒。51 年同大学院博士課程修了。同年より東北大学工学部助手。56 年助教授、平成 2 年より教授となり現在（マイクロシステム融合研究開発センター）、（兼）革新的イノベーション研究機構（COI）（リサーチフェロー）に至る。半導体センサ、マイクロシステム、MEMS の研究に従事。

田中秀治（たなか しゅうじ）

平成 11 年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専攻 博士課程修了。同年より東北大学大学院工学研究科助手、13 年講師、15 年助教授、25 年教授となり現在（大学院工学研究科ロボティクス専攻）に至る。産業に関連する MEMS 技術、特に集積化技術、MEMS パッケージング技術、弾性波デバイス、圧電デバイス・材料などの研究に従事。