

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01812

研究課題名(和文)人の視覚と同じ高次情報処理を実現する眼球内完全埋め込み型人工網膜システムの開発

研究課題名(英文) Development of fully-implantable retinal prosthesis system realizing the same visual information processing as human vision

研究代表者

田中 徹 (TANAKA, Tetsu)

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：40417382

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,000,000円

研究成果の概要(和文)：高次情報処理を実現する超低消費電力三次元積層人工網膜LSI回路において、視覚再建に寄与しない40Hz以下の刺激及び両極性電流パルス間において回路動作を止める機構を考案し、62%の消費電力削減に成功した。また、暗電流補償や温度検出の回路設計と試作を行って動作を検証した。人工網膜の光電変換感度向上のためにAl-doped ZnO (AZO)を用いて透明刺激電極を開発した。その結果、網膜刺激電極として適切な電荷注入能力と電極インピーダンスの値を有し、積層化プロセスに対応可能な透明AZO電極の開発に成功した。これにより画素当たりの刺激電極面積(光電変換感度)を3倍以上に増やすことが可能になった。

研究成果の概要(英文)：In order to restore visual sensation of blind patients such as age-related macular degeneration and retinitis pigmentosa, a fully-implantable retinal prosthesis have been developed in this research. The fully implantable retinal prosthesis consists of an intraocular and extraocular units. The intraocular unit has a coupling coil, a stimulus electrode array, and a 3-D stacked retinal prosthesis chip. The 3-D stacked retinal prosthesis chip is composed of a photoreceptor chip and a stimulus current generator chip. In this research, power dissipation of the stimulus current generator chip with an edge enhancement function successfully decreased to 62% due to no idling function. Other functions such as dark current compensation and temperature compensation were implemented into the circuit. A transparent stimulus electrode using Al-doped ZnO was successfully developed and showed appropriate CIC and electrical impedance values, which leads to x3 photoelectric conversion performance.

研究分野：半導体工学・神経工学

キーワード：人工網膜 三次元集積回路 医用システム 生体医工学

### 1. 研究開始当初の背景

高齢化の進行に伴い加齢黄斑変性や網膜色素変性症による失明患者が、我が国においても急増している。これらの疾病では光を神経電気信号に変換する網膜の視細胞が死滅して失明に至るが、有効な医学的治療法はまだ確立されていない。しかし、視細胞とともに網膜を構成する水平・双極・アマクリン・神経節細胞や視神経は正常のまま一定期間存在している。そこで微小電極アレイを用いて残存する神経節細胞を電気刺激することで視覚を再生する人工網膜システムの研究が欧米を中心にして世界各地で精力的に進められている。

人工網膜システムは撮像カメラ(光電変換素子)/画像信号処理回路/刺激電流生成回路/網膜刺激電極/電力・画像信号送信用コイル/接続用フレキシブルケーブル等の部品から構成されている。従来の人工網膜システムでは、網膜刺激電極だけが眼球内に埋め込まれ、他の部品は眼球外や体外に設置されている。これは人工網膜 LSI チップを設置する眼球内中心窩近傍の直径が 3mm 程度しかなく、光電変換素子や他の回路を平面上に並べる通常の人工網膜 LSI チップは大きすぎて設置できないためである。従って、人工網膜システムの構造は複雑であり患者の負担が非常に大きい。信号送受信容量の制約から網膜刺激電極数が百個程度に限られるために、低解像度で顔の認識も難しい。また、光電変換素子が眼球外にあるため、眼球のサッカドや固視微動、ピント調整機能が使えない。光電変換素子を装着している頭部を眼球の代わりに動かして画像を走査入力することは患者にとって大きな負担となる。一方、2010年に光電変換素子と刺激電流生成回路を平面上に配置して眼球内に設置する人工網膜がドイツから発表された。光電変換素子を眼球内に埋め込むため、画像解像度とサッカド等に関する問題はある程度解決されている。しかし、画像信号処理回路が無いために明暗順応やエッジ強調による輪郭抽出等の高次情報処理機能が無く、高い QOL を望むことは難しい。

### 2. 研究の目的

本研究では光電変換素子/高次情報処理回路/刺激電流生成回路を積層し、シリコン貫通配線

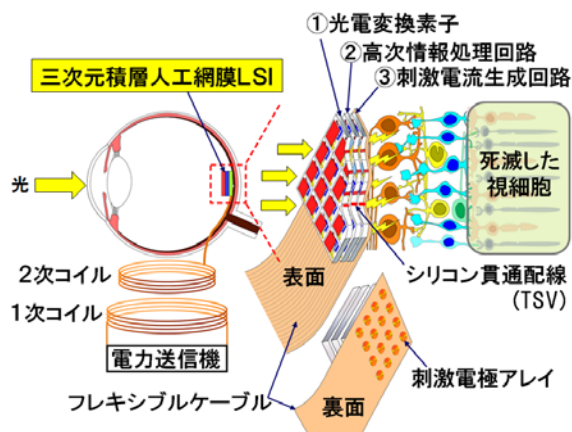


図1 本研究の眼球内完全埋め込み型人工網膜システム

(Through-Si-Via:TSV)で電気接続して眼球内に埋め込むことで、前述の問題を全て解決し、患者に高い QOL を提供できる「人の視覚と同じ高次情報処理を実現する眼球内完全埋め込み型人工網膜システム」を開発する(図1)。

図1の1次コイルと電力送信機は体外に、2次コイルは側頭部の頭皮下に設置する。眼球内には三次元積層人工網膜 LSI と網膜刺激電極を埋め込む。三次元積層人工網膜 LSI は人の網膜と同じ層構造を有している(図2)。外界光は最上層の光電変換素子によって電気信号に変換され、電気信号は TSV によって下層に伝わる。高次情報処理回路によって認識精度を高める等の画像処理を行った後、最下層で正負両極性の刺激電流パルスが生成される。電流パルスはフレキシブルケーブル裏面の微小刺激電極アレイから網膜の神経節細胞を刺激する。人の網膜と同じ構造の三次元積層人工網膜 LSI を採用することで、チップ上面を全て受光領域(光電変換素子)にできるため、小面積で高解像の視覚を再建できる。また、チップ面積を増やさずに明暗順応やエッジ強調等の高次情報処理機能を搭載できるために、より明瞭な視覚を再生することが可能である。さらに三次元積層人工網膜 LSI を眼球内に完全に埋め込むため、人の視覚にとって重要な眼球のサッカドや固視微動、ピント調整機能を利用できる。なお、図1と図2は網膜上刺激の三次元積層人工網膜 LSI であるが、全く同じ機能を有する網膜下刺激の三次元積層人工網膜 LSI も作製可能である。

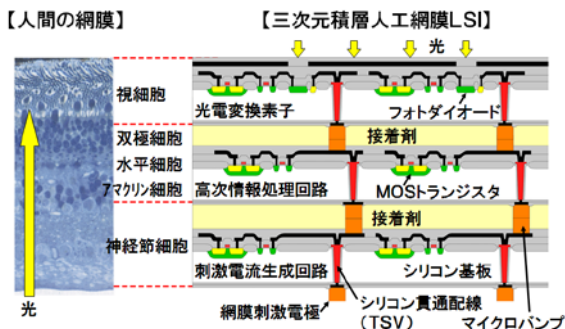


図2 人の網膜と三次元積層人工網膜 LSI の断面構造

これまで研究代表者らは科研費基盤研究(A)「高次視覚情報処理機能を有する完全埋込型低電力三次元積層人工網膜システムの研究(平成24~26年度)」において、1300画素(3mm角)の光電変換素子、4近傍簡易ラプラシアンフィルタによるエッジ強調処理回路を設計・試作して基本電気特性の取得に成功している。また、光電変換素子と刺激電流生成回路を平面上に並べた16画素の単層人工網膜 LSI を視細胞を変性させたウサギの眼球に埋め込み、外光に応じた両極性電流パルスで神経節細胞を刺激して脳内誘発電位の記録に成功している。研究代表者らは三次元積層 LSI 技術に関して世界をリードしており、直径 10µm の TSV 作製を含む LSI チップ積層の基本技術を開発している。また、IrOx 刺激電極やピラー型刺激電極付きのフレキシブルケーブルの作製に成功し、網膜への高密着・高密度刺激を実現している。

本研究ではこれまでの研究成果を進展させ、国内外の他の人工網膜では実現し得ない「明暗順応と高性能エッジ強調の高次情報処理機能を有する 2000 画素以上の眼球内完全埋め込み型人工網膜システム」を開発する。

### 3. 研究の方法

「人の視覚と同じ高次情報処理を実現する眼球内完全埋め込み型人工網膜システム」を実現するために、研究内容を以下の 3 つの大項目に分け、大項目に合わせた 3 グループで研究を遂行する

(1) 高次情報処理を実現する超低消費電力三次元積層人工網膜 LSI の回路設計(回路設計 G)

高解像かつ明瞭な視覚を再建するために人の視覚と同様な高次情報処理を行う人工網膜 LSI の最適仕様を決定し、その仕様を超低消費電力で実現する回路設計を行う。特に、眼球内での発熱を抑えるための消費電力の低減手法を考案して LSI に実装する。また、患者の症状や加齢に合わせた供給電力補償・刺激電流補償・起動補償などの安全対策を施した回路を設計する。設計回路をチップ試作し機能・性能検証を行う。

(2) LSI チップ積層化及び眼球内埋め込み用モジュール化技術の開発(積層化・モジュール化 G)

外部ファウンドリ(半導体チップ製造専門会社)で試作した光電変換素子、高次情報処理回路、刺激電流生成回路の各チップを、東北大学において三次元積層化して人工網膜チップを作製する技術を開発する。具体的には、現在開発している 1300 画素(1 画素当たり 80 $\mu\text{m}$  角)を 2000 画素以上(1 画素当たり 60 $\mu\text{m}$  角以下)に高画素化できる微細加工技術を開発する。直径 8 $\mu\text{m}$  のシリコン貫通配線が数千本必要となり、これが作製出来れば間違いなく世界トップクラスの積層化技術かつ世界最高画素数の人工網膜チップとなる。また、三次元積層人工網膜 LSI・刺激電極アレイ・フレキシブルケーブル・受給電コイルの各部品を 1 つにモジュール化する技術を開発する。

(3) In-vitro/In-vivo 実験による人工網膜システムの生体適合性を含む信頼性評価及び性能検証(細胞・前臨床評価 G)

眼球内に埋め込む人工網膜 LSI と刺激電極アレイ、及び眼球外(体内)に設置する受電コイルについて、埋め込みによる拒絶反応の有無を網膜形態に関して組織学的に調べる。また、網膜上(図 1 参照)か網膜下か、刺激電極アレイの設置位置により多少異なるが、本システムを長期間安定して人の網膜に設置するための術式開発を行う。

### 4. 研究成果

(1) 高次情報処理を実現する超低消費電力三次元積層人工網膜 LSI の回路設計

これまでの人工網膜チップは画素間の光電変換特性のばらつきが刺激電流周波数のばらつきに直接反映される回路構成であり、2000 画素以上の人工網膜では大きな問題になると考えられている。本研究では画素間の光電変換特性ばらつきを補償する回路の開発を行った。光電変換特性のばらつきが各画素の暗電流に起因するも

のが大半であることを明らかにし、暗電流のサンプリングと明電流からの減算を利用した補償回路を設計し、実際の回路で動作を検証した。その結果、各画素の暗電流を補償したことにより、エッジ強調の効果が大きくなることを明らかにした。また、「機器が体内に埋め込まれた状態において、通常運転及び 1 箇所の故障が発生した状態での機器の表面温度は体温から温度上昇 2 $^{\circ}\text{C}$  以内」という指針(ISO14708-1)に基づき、三次元積層人工網膜 LSI でも温度測定を行う必要がある。本研究では BGR(Band Gap Reference)回路と電圧電圧変換回路、差動増幅(IA)回路を設計・試作して温度検出を行った。IA ゲインの切替により温度検出感度を調整可能な回路(図 3)を用いることにより、-3.0mV/ $^{\circ}\text{C}$ (IA ゲイン 12dB)の感度を得ることに成功した。これにより三次元積層人工網膜 LSI を使用する場合の温度補償が可能になる。

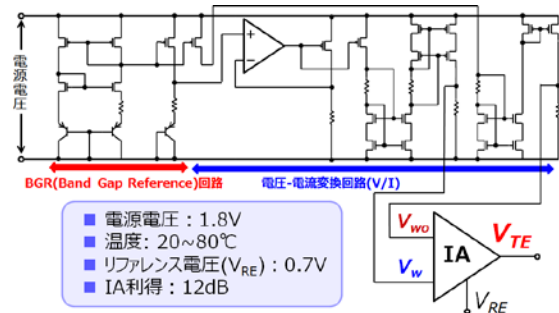


図 3 BGR を用いた温度検出回路

更に、視覚における高次情報処理を実現するラプラシアンエッジ強調回路の動作特性を詳細に評価するために、微小フォトダイオードを付加したエッジ強調機能を有する刺激電流生成回路を設計・試作した。これにより LSI チップ積層プロセスの影響を除いたエッジ強調動作特性の評価が可能になった。評価の結果、本研究のラプラシアンエッジ強調回路で、設計通りに正しくエッジが強調できていることを確認できた。一方で、エッジ強調機能を有する刺激電流生成回路チップの消費電力がシミュレーションに比べて大きいという問題が明らかになった。原因を追求したところ、視覚再建に寄与しない 40Hz 以下のパルス刺激及び両極性電流パルス間(インターフェイズディレイ)においても、刺激電流生成回路が動作しているため(本来は不要)であることが判明した。本研究では、不要時の刺激電流生成動作を止める回路を新たに設計・試作した。

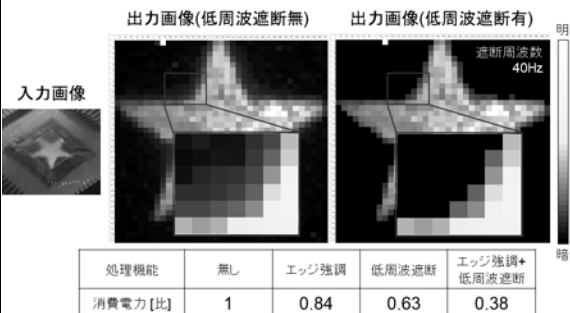


図 4 三次元積層人工網膜 LSI の消費電力比較

その結果、図4に示すように40 Hz以下の電流パルス無くし、エッジの強調効果を強くすることに成功した。更に、エッジ強調時と不要時の低周波刺激電流を遮断することによって消費電力を62%削減することに成功した。本研究によって高次情報処理を実現する超低消費電力三次元積層人工網膜LSI回路を開発できた。

## (2) LSIチップ積層化及び眼球内埋め込み用モジュール化技術の開発

図5に示す網膜下埋め込み用人工網膜モジュールの開発を行った。直径8 $\mu\text{m}$ ・アスペクト比5~6のバックサイドTSVでは、絶縁膜やCuメッキ用バリア/シード膜をビア内に均一に成膜することが難しい。本研究では、プロセス最適化のためにTSV深さ方向の電気特性を評価可能なマルチウェル構造を有するTSVテストパターンを提案した。TSV側壁に接するウェルが深さ毎に異なるために、TSVの種々の特性の深さ依存性を測定可能である。マルチウェル構造TSVを試作評価した結果、TSV底部(M1コンタクト近傍)ほど絶縁膜質が悪く、界面準位が多いことを定量的に明らかにできた。この知見を元にTSVプロセスを最適化し、人工網膜の光電変換素子(受光回路)チップに直径8 $\mu\text{m}$ ・アスペクト比5のバックサイドTSVを作製することに成功した。

本研究の人工網膜LSIを構成する薄化チップでは接着剤の応力によってチップの中心と端部の間に数十マイクロレベルの反りが発生し、積層時に接合不良が発生する主要原因となっていた。本研究では接着強度を劣化させずに接着剤の不要部分を除去する技術を開発し、チップの反りを従来の1/10に抑制することに成功した。その結果、2000個以上のCuSnマイクロバンプの接合不良率を数パーセントまで低減することができた。また、人工網膜LSIチップを一体化実装するフレキシブルケーブルのチップ実装部の有機材料を工夫することにより、実装したチップとフレキシブルケーブルとの電気接続の成功率を98%以上にすることに成功した。

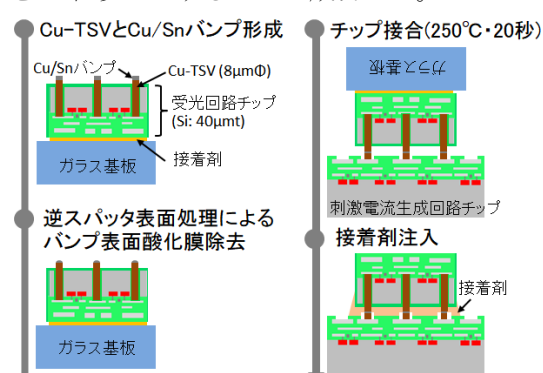


図5 三次元積層人工網膜LSIの作製プロセス

人工網膜LSIチップの開口率向上と刺激電流値の確保を両立するために、新しい刺激電極材料の開発を行った。刺激電極材料のキーとなるのは透明刺激電極である。本研究では、透明刺激電極材料としてAl-doped ZnO (AZO)を用いて刺激電極を作製した。AZO成膜時の基板温度を積層化プロセスに適用可能な温度内で最適化して刺激電極膜を作製し、85%以上の可視光透過

率(図6)と0.07mC/cm<sup>2</sup>以上のCharge injection capacity (CIC)を得ることに成功した。現状の画素サイズにおいて1回の刺激で2nC以上の電荷供給が可能であり、刺激電極として使用可能である。AZO刺激電極により、画素当たりの刺激電極面積と光電変換感度をそれぞれ3倍以上に増やすことに成功した。

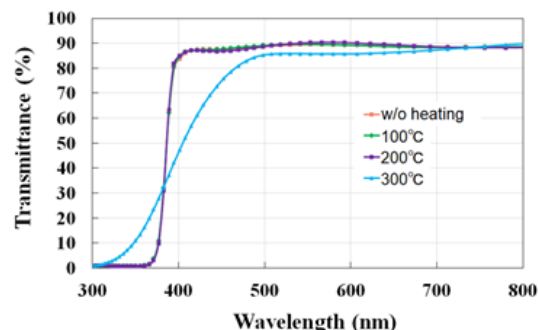


図6 AZO電極における光透過率の波長依存性

## (3) 人工網膜システムの生体適合性を含む信頼性評価

Pt/IrO<sub>x</sub>/AZO/Cu刺激電極材料の生体適合性を比較評価した。石英基板上に刺激電極アレイを模した凸部を形成し、凸部表面に電極材料を成膜した。それを用いてIn vitroとIn vivoでの評価を継続中である。現時点では、In vitro評価の結果からPt/IrO<sub>x</sub>/AZOの短期生体適合性に問題はないことが明らかになっており、さらに評価を継続している。また、三次元積層人工網膜LSIを安全に人の網膜に刺入し、かつ長期間安定して網膜に固定するため、ディンプル付きフレキシブルケーブルを用いた低背化人工網膜モジュールを提案した。試作評価の結果、人工網膜LSIチップを眼球に刺入する際に問題となっていた細胞損傷を低減できることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

- ① Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, and Tetsu Tanaka, Study of Al-doped ZnO Transparent Stimulus Electrode for Fully Implantable Retinal Prosthesis with Three-dimensionally Stacked Retinal Prosthesis Chip, Sensors and Materials, 査読有, Vol. 30, 2018, pp. 225-234, DOI: 10.18494/SAM.2018.174
- ② 菅原陽平, 木野久志, 福島誉史, 田中徹, マルチウェル構造TSVを用いたTSV側壁界面評価方法の開発, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, J101-C巻, 2018, pp. 58-65, [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j101-c\\_2\\_58&category=C&year=2018&lang=J&abst=](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j101-c_2_58&category=C&year=2018&lang=J&abst=)
- ③ 福島誉史, マリアッパン ムルゲサン, 裴志哲, 李相勲, 李康旭, 田中徹, 小柳光正, 三次元集積用テンポラリー接着剤の特性とウエハエッジの影響, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, J99-C巻, 2016, pp. 493-500, [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-c\\_11\\_493](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-c_11_493)

- ④ Takafumi Fukushima, Hideto Hashiguchi, Hiroshi Yonekura, Hisashi Kino, Mariappan Murugesan, Ji-Chel Bea, Kang-Wook Lee, Tetsu Tanaka and Mitsumasa Koyanagi, Oxide-Oxide Thermocompression Direct Bonding Technologies with Capillary Self-Assembly for Multichip-to-Wafer Heterogeneous 3D System Integration, *Micromachines*, 査読有, Vol.7, 2016, pp.184-1-184-8, DOI: 10.3390/mi7100184
- ⑤ 福島誉史, 李康旭, 田中徹, 小柳光正, 半導体ウエハへの三次元配線加工: TSVと狭ピッチ電極を中心に, 表面技術, 査読有, 67巻, 2016, pp.414-420, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/67/8/67\\_414/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/67/8/67_414/_article/-char/ja/)
- ⑥ Seiya Tanikawa, Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, Mitsumasa Koyanagi, Tetsu Tanaka, Evaluation of In-plane Local Bending Stress Distribution with DRAM Cell Array for Highly Reliable 3D IC, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.55, 2016, pp. 04EC07-1-04EC07-4, DOI: 10.7567/JJAP.55.04EC07
- ⑦ Hisashi Kino, Hideto Hashiguchi, Seiya Tanikawa, Youhei Sugawara, Shunsuke Ikegaya, Takafumi Fukushima, Mitsumasa Koyanagi, Tetsu Tanaka, Effect of local stress induced by thermal expansion of underfill in three-dimensional stacked IC, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.55, 2016, pp. 04EC03-1-4, DOI: 10.7567/JJAP.55.04EC03
- ⑧ Kangwook Lee, Jichel Bea, Takafumi Fukushima, Suresh Ramalingam, Xin Wu, Tetsu Tanaka, and Mitsumasa Koyanagi, Novel Hybrid Bonding Technology Using Ultra-High Density Cu Nano-Pillar for Exascale 2.5D/3D Integration, *IEEE Electron Device Letters*, 査読有, Vol.37, 2015, pp.81-83, DOI: 10.1109/LED.2015.2502584
- [学会発表] (計 42 件)
- ① Tetsu Tanaka, 3D-IC Technology: Reliability Challenges and Biomedical Application, 2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium(招待講演), 2017
- ② Tetsu Tanaka, 3D-IC Technology and Its Application to Fully Implantable Retinal Prosthesis, 14th International Conference on Flow Dynamics(招待講演), 2017
- ③ Kenji Shimokawa, Zhengyang Qian, Yoshiki Takezawa, Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, Koji Kiyoyama, and Tetsu Tanaka, Experimental Evaluation of Stimulus Current Generator with Laplacian Edge-enhancement for 3-D Stacked Retinal Prosthesis Chip, The 13th IEEE Biomedical Circuit and Systems Conference 2017, 2017
- ④ Yoshiki Takezawa, Koji Kiyoyama, Kenji Shimokawa, Zhengyang Qian, Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, and Tetsu Tanaka, Ultrawide range square wave impedance analysis circuit with ultra-slow Ring-Oscillator using gate-induced drain-leakage Current, The 13th IEEE Biomedical Circuit and Systems Conference 2017, 2017
- ⑤ Miao Xiong, Yangyang Yan, Yingtao Ding, Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, Tetsu Tanaka, Characterization of Cu-TSVs Fabricated by a New All-Wet Process, 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2017
- ⑥ 下川賢士, 銭正よう, 竹澤好樹, 木野久志, 福島誉史, 清山浩司, 田中徹, 三次元積層人工網膜チップのためのラプラシアンエッジ強調機能を有する刺激電流生成回路の評価, 第78回応用物理学学会秋季学術講演会, 2017
- ⑦ Tetsu Tanaka, 3D-IC Technology and Reliability Challenges, 17th International Workshop on Junction Technology(招待講演), 2017
- ⑧ Hisashi Kino, Masataka Tashiro, Yohei Sugawara, Seiya Tanikawa, Takafumi Fukushima, and Tetsu Tanaka, Minimized Hysteresis and Low Parasitic Capacitance TSV with PBO (Polybenzoxazole) Liner to Achieve Ultra-High-Speed Data Transmission, IEEE International Interconnect Technology Conference, 2017
- ⑨ Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, Tetsu Tanaka, Remarkable Suppression of Local Stress in 3D IC by Manganese Nitride-Based Filler with Large Negative CTE, IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference, 2017
- ⑩ Koji Kiyoyama, Yoshiki Takezawa, Tatsuya Goto, Keita Ito, Shoma Uno, Kenji Shimokawa, Satoru Nishino, Hisashi Kino, and Tetsu Tanaka, Wide-range and precise tissue impedance analysis circuit with ultralow current source using gate-induced drain-leakage current, 2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, 2016
- ⑪ Yohei Sugawara, Hisashi Kino, Takafumi Fukushima, Kang-Wook Lee, Mitsumasa Koyanagi, and Tetsu Tanaka, Evaluation of Depth-dependent TSV-liner Interface States Using Multi-well Structure TSV and Charge Pumping Technique, 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2016
- ⑫ 下川賢士, 後藤大輝, 木野久志, 福島誉史, 田中徹, 網膜下刺激人工網膜におけるAZO透明刺激電極の基礎評価, 第77回応用物理学学会秋季学術講演会, 2016

- ⑬ 田中徹, シリコンマイクロチップの生体貼付・埋め込み医療分野への応用, 次世代医療システム産業化フォーラム(招待講演), 2016
- ⑭ Kangwook Lee, Chisato Nagai, Jichel Bea, Takafumi Fukushima, Tetsu Tanaka, Mitsumasa Koyanagi, Suresh Ramalingam and Xin Wu, Novel W2W/C2W Hybrid Bonding Technology with High Stacking Yield Using Ultra-Fine, Ultra-High Density Cu Nano-Pillar for Exascale 2.5D/3D Integration, The 66th Electronic Components and Technology Conference, 2016
- ⑮ Takafumi Fukushima, Hideto Hashiguchi, Murugesan Mariappan, Jicheol Bea, Hiroyuki Hashimoto, Hisashi Kino, Tetsu Tanaka, Kangwook Lee, and Mitsumasa Koyanagi, Transfer and Non-Transfer 3D Stacking Technologies Based on Chip-to-Wafer Self-Assembly and Direct Bonding, The 66th Electronic Components and Technology Conference, 2016
- ⑯ 伊藤圭汰, 宇野正真, 後藤竜也, 竹澤好樹, 西野悟, 木野久志, 清山浩司, 田中徹, 画素間ばらつき補正機能を有する3次元積層人工網膜チップの提案, LSIとシステムのワークショップ, 2016
- ⑰ 田中徹, 3D-IC/TSVの信頼性評価技術と将来展望, SEMICON Japan(招待講演), 2015
- ⑱ 福島誉史, 李康旭, 田中徹, 小柳光正, シリコン貫通配線TSVと三次元集積化技術の研究開発動向, 第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(招待講演), 2015
- ⑲ Hisashi Kino, Hideto hashiguchi, Seiya Tanikawa, Youhei Sugawara, Shunsuke Ikegaya, Takafumi Fukushima, Mitsumasa Koyanagi, Tetsu Tanaka, Local Stress Effect due to Operation-Heating-Induced Adhesive Expansion on Transistor Performances in 3D IC, International Conference on Solid State Devices and Materials, 2015
- ⑳ Takafumi Fukushima, Kazuko Taniguchi, Shigeru Watariguchi, Mariappan Murugesan, Chisato Nagai, Ai Nakamura, Hiroyuki Hashimoto, Ji-Chel Bea, Tetsu Tanaka, Mitsumasa Koyanagi, and Kang-Wook Lee, Electroless Nickel Barrier/Seed Layer Deposition on Dielectric Liners for Advanced Cu-TSV Applications, International Conference on Solid State Devices and Materials, 2015
- ㉑ 谷川星野, 木野久志, 福島誉史, 小柳光正, 田中徹, DRAMセルアレイの電荷保持特性を用いた3DICにおける局所曲げ応力の影響評価, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015
- ㉒ 木野久志, 橋口日出登, 谷川星野, 菅原陽平, 池ヶ谷俊介, 福島誉史, 小柳光正, 田中徹, 回路動作の発熱によって三次元集積回路内に生成される局所応力の影響に関する研究, 第25回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 2015
- ㉓ Hisashi Kino, Hideto Hashiguchi, Seiya Tanikawa, Youhei Sugawara, Shunsuke Ikegaya, Takafumi Fukushima, Mitsumasa Koyanagi, Tetsu Tanaka, Consideration of Microbump Layout for Reduction of Local Bending Stress Due to CTE Mismatch in 3D IC, IEEE International 3D Systems Integration Conference, 2015
- ㉔ Yohei Sugawara, Hideto Hashiguchi, Seiya Tanikawa, Hisashi Kino, Kang-Wook Lee, Takafumi Fukushima, Mitsumasa Koyanagi, Tetsu Tanaka, Impact of Deep-Via Plasma Etching Process on Transistor Performance in 3D-IC with Via-Last Backside TSV, IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference, 2015
- ㉕ H. Hashiguchi, H. Yonekura, T. Fukushima, M. Murugesan, H. Kino, K.-W. Lee, T. Tanaka, M. Koyanagi, Plasma Assisted Multichip-to-Wafer Direct Bonding Technology for Self-Assembly Based 3D Integration, IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference, 2015
- [図書] (計1件)
- ① 木野久志, 田中徹, シーエムシー出版, 熱膨張制御材料の開発と応用(新材料・新素材シリーズ), 2018, pp. 161-174
- [その他]
- ホームページ  
<http://www.lbc.mech.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 徹(TANAKA, Tetsu)  
 東北大学・大学院医工学研究科・教授  
 研究者番号: 40417382

### (2) 研究分担者

福島 誉史(FUKUSHIMA, Takafumi)  
 東北大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号: 10374969

富田 浩史(TOMITA, Hiroshi)  
 岩手大学・理工学部・教授  
 研究者番号: 40302088

清山 浩司(KIYOYAMA, Koji)  
 長崎総合科学大学・工学部・准教授  
 研究者番号: 60412722

### (3) 連携研究者

小柳 光正(KOYANAGI, Mitsumasa)  
 東北大学・未来科学技術共同研究センター・名誉教授  
 研究者番号: 60205531

菅野 江里子(SUGANO, Eriko)  
 岩手大学・理工学部・准教授  
 研究者番号: 70375210

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