

令和 4 年 10 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17866

研究課題名（和文）有機トランジスタの電荷トラップ機構の解明

研究課題名（英文）Research toward elucidation of charge trap mechanism in organic transistor

研究代表者

荒木 徹平 (Teppe, Araki)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：10749518

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）：有機半導体は、機械的柔軟性を有する電界効果トランジスタ（FET）をシンプルな湿式プロセスにより形成可能であり、無機系半導体では達成しえなかった生体調和性の高いデバイスを実現可能である。しかし、実用化に向けて、特性向上や機能性付与を行う余地がまだある。本研究では、「有機トランジスタの電荷トラップ機構の解明」という目標を掲げ、トランジスタの電気伝導阻害機構を定量的に評価することを主な目的とし、同時に、オール印刷によるフレキシブル透明有機FETの構築に向けた開発も進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回、フレキシブル透明有機FETの電気伝導阻害機構を定量的に評価しながら、オール印刷FETに向けた高性能化技術を多く構築した。例えば、FETの移動度向上、ON電流向上、バラツキ低減などの因子を、界面現象を評価しながら理解した。そこで使用した電極用ナノ材料に対しては、FETの高特性化につながる配向制御や表面処理技術が構築されており、界面での電荷阻害を低減した。さらに、技術応用として、生体信号計測に向けた低電圧駆動のトランジスタ、アンプ回路、インプラントセンサが実現した。将来、フレキシブル透明FETに関する知見は、医療・ヘルスケアセンサの開発へ貢献できるため、社会的インパクトは大きい。

研究成果の概要（英文）：Organic semiconductor can become a field effect transistor (FET) having mechanical flexibility using a simple wet process, and can realize a device with high biocompatibility that could not be achieved using an inorganic semiconductor. However, there is still room to improve characteristics and to impart functionality toward practical use of the FET. In this research subject, we proceed with a goal of an elucidating charge trap mechanism in the organic transistor to quantitatively evaluate the electric conduction inhibition mechanism in the transistor, and also to create a flexible and transparent organic FET using print methods.

研究分野：材料科学

キーワード：有機トランジスタ 金属ナノワイヤ 電荷トラップ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、印刷によりエレクトロニクス製造を行う「プリンタブルエレクトロニクス」の研究開発が行われている。印刷技術は、グーテンベルグにより 15 世紀に発明された後、現代にいたるまで、文字や画像などを扱う情報社会の中で発展してきた。最近では、ICT (Information and Communication) や IoT (Internet of Things) の発展に伴い、スマートフォンやタブレットなどのポータブル端末が主流となっている。プリンタブルエレクトロニクスはその情報端末を薄膜化・軽量化することに貢献でき、次世代エレクトロニクス技術となる。さらに、プリンタブルエレクトロニクスは、通常プラスチック基板上にデバイス形成するため機械的柔軟性を有するアプリケーションへつながる。また、印刷技術は、所望の箇所に必要量を形成するため省資源である。印刷により高コスト効率に製造される軽薄・柔軟な電子デバイスは、ウェアラブル端末やインプラント端末など、高い生体調和性が要求される医療・ヘルスケア用 IoT センサとして応用が期待されている。

柔軟な電子デバイスにおける配線材料の候補としては、金属性カーボンナノチューブ (CNT) やグラフェン、導電性ポリマー、金属粒子などがある。その中でも、銀ナノワイヤは、印刷性や導電性に優れており、微細パターンニングに際しても高い導電性を維持できるため有利である。また、高アスペクト比 (直径 90 nm、長さ 44 μ m) な銀ナノワイヤは、導電性ネットワークを容易形成すると同時に、ネットワークの隙間から光透過も許容する^[1]。そのため、銀ナノワイヤは柔軟性を備えた高導電かつ高透明な配線材料としても魅力的である。一方、柔軟な半導体としては有機半導体があげられる^[2]。中でも、複素五員環芳香族化合物を有する有機半導体の中でもジアルキル誘導体の C_n -BTBT (ベンゾチエノベンゾチオフェン) は、有機溶媒への高い溶解性によりプリンタブルエレクトロニクスへの展開が期待され、アモルファスシリコンを超えて IGZO に迫る移動度 5-16 cm^2/Vs を単結晶素子で実現している^[3,4]。 C_n -BTBT は深い HOMO (最高被占有分子軌道) および大きい HOMO-LUMO (最低非占有分子軌道) ギャップにより高い安定性と透明性を有する^[5]。医療・ヘルスケアに向けて、金属ナノワイヤ配線および C_n -BTBT 有機半導体を用いた場合、生体組織の直接観察と信号取得を同時に実現する画期的な透明電子デバイスを実現できる。

これまで開発を進めてきた銀ナノワイヤ電極を用いた有機トランジスタは、微細加工性、短チャネル化、有機半導体へ低負荷、ナノワイヤ交点での高低差など考慮し、ボトムコンタクト・トップゲート型とした電界効果トランジスタ (FET) である。しかし、トランジスタ素子ばらつきや低い移動度が課題であった。それらの原因として、主に電極側には、ナノワイヤのランダムネットワーク、ナノワイヤ間のホッピング伝導、銀自身の安定性などが挙げられる。有機 FET 内には、銀ナノワイヤと有機半導体の間に生じるエネルギーギャップやキャリアの非整流性、ナノレベルでの表面凹凸などが原因として挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、「有機トランジスタの電荷トラップ機構の解明」という目標を掲げ、銀ナノワイヤ電極を用いた有機 FET (AgNW-OFET) における電気伝導阻害機構を定量的に評価することが主な目的である。同時に、AgNW-OFET の電荷輸送および有機-無機、有機-有機、無機-無機界面の相互作用を体系的に理解するための研究を進めた。さらに、オール印刷による透明 AgNW-OFET の構築に向けた開発も進めた。

3. 研究の方法

今回、銀ナノワイヤへの表面処理、表面処理済み銀ナノワイヤ電極の電気特性評価、銀ナノワイヤの配向制御、配向制御手法を用いた AgNW-OFET の特性評価を行った。AgNW-OFET の評価にはトランジスタの伝達特性や出力特性、四端子測定によるチャネル抵抗・接触抵抗測定^[6,7]、熱刺激電流 (TSC) 測定^[8] 等が含まれる。

銀ナノワイヤの表面処理として無電解金めっきを試みた(図 1、開発 1)。銀ナノワイヤをポリパラキシレン (パリレン) 基板上へ塗布して電極形成後、基材の密着性を高めるための熱処理を経てめっき処理を行った。めっきは、銀ナノワイヤ電極を酸洗浄槽、Pd 触媒槽、金めっき槽の順に浸漬させて行った。めっき処理前後の銀ナノワイヤ電極を用いて、I-V 特性評価およびインピーダンス評価を行うことによりホッピング導電の低減状況 (無機-無機界面現象) を確認した。さらに、低ノイズな信号伝送配線として使用可能かの実証するためインプラントセンサへの応用を行った。

銀ナノワイヤ配向制御は、親液性と撥液性のコントラストをつけた基板上に銀ナノワイヤ分散液を塗布することで行った(図 1、開発 2)。この手法では、基板上的親液性の高い領域に塗布パターンニング工程において、親液表面の表面エネルギー制御、インクの表面エネルギー、塗布方向や速度、周囲環境を調整することにより AgNW の配向制御を行った。この塗布型銀ナノワイヤを用いてボトムコンタクト・トップゲートのトランジスタを作製した。蒸着 C_8 -BTBT を半導体層、銀ナノワイヤを印刷電極層 (ソース・ドレイン・ゲート)、パリレンをゲート絶縁膜層とした構造である。この AgNW-OFET の評価として、トランジスタの伝達特性と出力特性、トランジスタのソース-ドレイン間に流れる TSC 測定、および四端子測定を行った。前者の TSC 測定では、試料にゲート電圧およびドレイン電圧を加えてトランジスタを駆動させ、駆動中のトランジスタを、100 K まで冷却させて電荷を蓄積する (ポーリング処理工程)。冷却

後、ゲートを開放し、ドレイン電圧を 0 V として、昇温 9K/min にて行っている最中の微小電流を計測した。試験中、トランジスタは、ヘリウム置換を数回したのち真空状態になっているチャンパー内にある。この試験により、冷却固定されたチャンネル内のキャリアおよび電荷トラップを調査できると予想した。四端子測定に関しては、パリレン絶縁膜界面近傍の有機半導体中のチャンネル抵抗(有機-有機界面現象に相当)、ソースおよびドレイン電極界面の接触抵抗(無機-有機界面現象に相当)を評価した。また、銀ナノワイヤ電極を蒸着金電極へ変更したトランジスタを用いた比較評価も行っている。本研究では、作製したトランジスタに対しては、① TSC 測定および四端子測定。②トランジスタ内の接触抵抗や電荷トラップに関する評価。③補助データとしてポーリングなし TSC 測定、温度依存性の評価。④トランジスタ特性の測定。⑤電気伝導阻害機構に関する総合評価、などを主に行っている。

上記以外でも、本研究では、オール印刷による透明 AgNW-OFET の実現に向けた塗布型半導体を用いたトランジスタやダイオード構造を作製し、評価を行っている。しかし、紙面の関係で割愛する。

4. 研究成果

図 1 の開発 1 に示すように、金めっき処理銀ナノワイヤ電極は、未処理銀ナノワイヤに比べて、線形な I-V 特性および 1Hz-20kHz において一定なインピーダンスを示した。さらに、機械的な負荷下(伸縮中)においても、金めっき処理銀ナノワイヤ電極は、インピーダンスは一定でありキャパシタ成分がほとんどなかった。そのことから、ホッピング伝導などによる電荷流れの乱れがないことが示唆された。金めっき処理銀ナノワイヤ電極を信号伝送配線とした透明インプラントセンサにおいても、1-100 μV の微小な生体電位が問題なく取得された。この金めっき処理銀ナノワイヤ電極は、透明 AgNW-OFET 中の電極としても応用可能であり、高特性・高機能な OFET へ将来貢献できる。

図 1 の開発 2 に示すように、銀ナノワイヤをチャンネル幅方向へ配向し、さらにチャンネル端に銀ナノワイヤを堆積させた際、このチャンネル幅配向 AgNW-OFET の ON 電流向上および電極-半導体の接触抵抗減少、移動度の向上が認められた。この透明有機トランジスタの飽和領域伝達特に関しては、ON/OFF 比は $<10^6$ であり、移動度は $<0.4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であった。チャンネル長方向へ銀ナノワイヤを配向させた電極を用いた場合に比べて、いずれも 10 倍近い向上を示している。さらに、チャンネル幅配向 AgNW-OFET 内の接触抵抗は $0.7 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ となり、これもチャンネル長配向 AgNW-OFET に比べて 10 倍近く低かった。チャンネル幅配向 AgNW-OFET は、チャンネル端に銀ナノワイヤが堆積していることから、チャンネルと銀ナノワイヤの距離が物理的に近接あるいは実質的なチャンネル幅方向の電極面積増加により、高い ON 電流、移動度、接触抵抗の減少が確認できたと予想される。また、配向調整することによりトランジスタ素子ばらつきも低減された。

次に、金電極を用いた OFET (金-OFET) とチャンネル幅配向 AgNW-OFET を比較した。金-OFET とチャンネル幅配向 AgNW-OFET の四端子測定において、半導体中のチャンネル抵抗がほとんど同じであった。つまり、半導体内のキャリアやトラップの状況は同程度であると予想される。一方で、TSC 測定においては、チャンネル幅配向 AgNW-OFET が複数の温度領域にピークを有していた。半導体と銀ナノワイヤの界面に何らかの電荷トラップや障壁が存在していることを示唆している。ここで、エネルギー準位を考える。Cs-BTBT において、HOMO は -5.4 eV 、LUMO は -1.6 eV 。金のエネルギー準位は -5.4 eV 、および銀は -4.6 eV である。これらのことから、金-OFET の半導体-電極界面に障壁が少ないことが容易に類推できる。AgNW-OFET においては、エネルギー障壁が大きく、電荷注入が困難になっていることが分かる。AgNW-OFET の TSC 測定中に複数のピークが存在した原因の一つと推測される。さらに、銀ナノワイヤ電極のメッシュ構造やナノレベルでの凹凸なども、電荷流れの妨げになっていることも原因として挙げられる。

今回、電気伝導阻害機構を定量的・定性的に評価しながら、オール印刷 AgNW-OFET に向けた高性能化技術を多く構築できたことは、最大の成果である。特に、チャンネル幅配向 AgNW-OFET は、80%の可視光透過率と $<1 \text{ mm}$ の曲げ耐久性を示しながら、インバーターなどの電子回路に使用出来ることも確認した。さらに、Au めっき銀ナノワイヤ電極を用いることで、ストレッチャブルかつ低電圧駆動の電気化学トランジスタの実現性が高いことも初期検討出来た。本研究で協力や議論頂いた、研究協力者および協力機関(大阪大学産研・解析センターおよび NOF、JX 金属商事(株)、ダイキン工業(株)、昭和電工(株)、(株)東陽テクニカ)の皆様に深い感謝の意を表する。

引用文献

- [1] T. Araki, et al., Nano Research, 7, 236-245, (2014). [2] T. Sekitani et al., Nature Materials, 9, 1015-1022 (2010). [3] H. Minemawari et al. Nature, 475, 364-367 (2011). [4] T. Uemura et al., Appl. Phys. Exp. 2, 111501 (2009). [5] K. Takimiya et al., Sci. Tech. Adv. Mater., 8, 273-276 (2007). [6] P. V. Podzorov, et al., Appl. Phys. Lett., 83, 3504, 2003. [7] P. V. Podzorov, et al., Appl. Phys. Lett., 96, 7312, 2004. [8] Y. Yamashita et al., Adv. Mater., 26, 8169-8173 (2014)

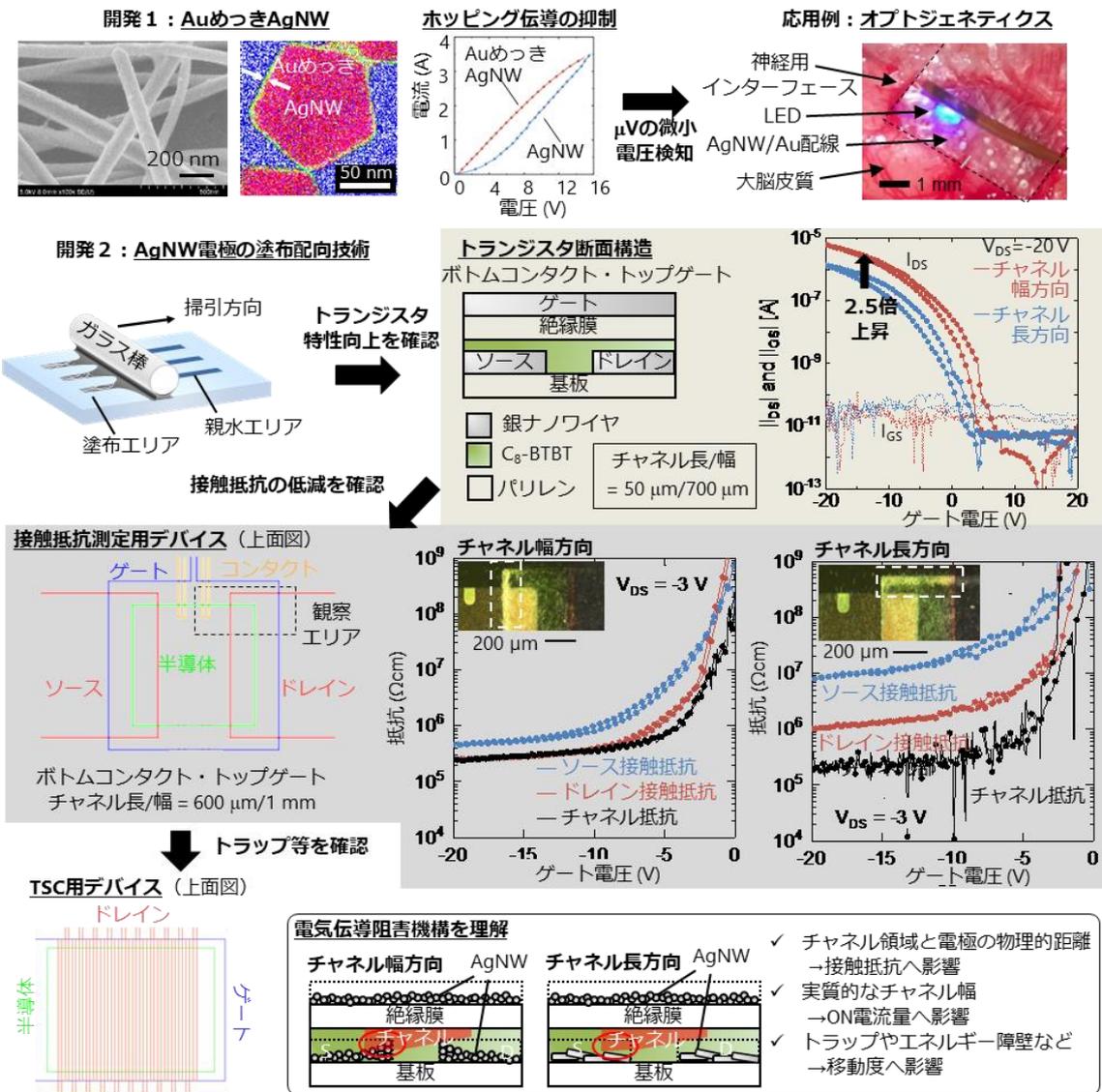


図 1 主な成果のまとめ

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件) その他投稿中 1 件

- [1] Printable Transparent Microelectrodes toward Mechanically and Visually Imperceptible Electronics (査読あり国際誌へ投稿準備中)
- [2] Fine Printing Method of Silver Nanowires Electrodes with Alignment and Accumulation Ashuya Takemoto, Teppe Araki, Yuki Noda, Takafumi Uemura, Shusuke Yoshimoto, Robert Abbel, Corne Rentrop, Jeroen van den Brand and Tsuyoshi Sekitani Nanotechnology, in press (査読あり国際誌、共第一著者)
- [3] フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロクスむけた柔軟な導電性材料と実装技術の開発 荒木徹平, 関谷毅 金属, 最先端エレクトロニクスのための接合技術, 89, 3, 238-242, 2019.3 (総説)
- [4] Long-Term Implantable, Flexible, and Transparent Neural Interface Based on Ag/Au Core-Shell Nanowires Teppe Araki, Fumiaki Yoshida, Takafumi Uemura, Yuki Noda, Shusuke Yoshimoto, Taro Kaiju, Takafumi Suzuki, Hiroki Hamanaka, Kousuke Baba, Hideki Hayakawa, Taiki Yabumoto, Hideki Mochizuki, Shingo Kobayashi, Masaru Tanaka, Masayuki Hirata, Tsuyoshi Sekitani Adv. Healthcare Mater., 1900130, 2019.4.4 (査読あり国際誌)
- [5] Design of ultraflexible organic differential amplifier circuits for wearable sensor technologies Masaya Kondo, Takafumi Uemura, Mihoko Akiyama, Naoko Namba, Masahiro Sugiyama, Yuki Noda, Teppe Araki, Shusuke Yoshimoto, Tsuyoshi Sekitani, International Conference on Microelectronics Test Structures (ICMTS), M_4_5, 79-84, Austin, Texas, USA, 2018.6.14 (国際会議論文)

- [6] Enhanced Electrical Durability and Mechanical Stretchability of Ag Nanowire-Based Transparent Electrodes by Nanometer-Thick Metal Plating
Teppei Araki, Yuki Noda, Ashuya Takemoto, Shusuke Yoshimoto, Takafumi Uemura, Tsuyoshi Sekitani
International Display Workshops, Electrode Material and Photoresist Technologies FMC5-1, 24, 541-544, 2017.12.8 (国際会議論文)
- [7] Flexible electronics for bio-signal monitoring in implantable applications
Shusuke Yoshimoto, Teppei Araki, Takafumi Uemura, Yuki Noda, Tsuyoshi Sekitani
IEICE Electronics Express, 14, 20172003, 2017.10.25 (総説)
- [8] Flexible Organic Tft Bio-Signal Amplifier Using Reliable Chip Component Assembly Process with Conductive Adhesive
Shusuke Yoshimoto, Takafumi Uemura, Mihoko Akiyama, Yoshihiro Ihara, Satoshi Otake, Tomoharu Fujii, Teppei Araki, Tsuyoshi Sekitani
International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 1849 -1852, Jeju Island, Korea, 2017.9.17 (国際会議論文)
- [9] Flexible Sensor Sheet for Real-Time Pressure Monitoring in Artificial Knee Joint During Total Knee Arthroplasty
Fumika Tanabe, Shusuke Yoshimoto, Yuki Noda, Teppei Araki, Takafumi Uemura, Yoshinori Takeguchi, Masaharu Imai, Tsuyoshi Sekitani,
International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 1591-1594, Jeju Island, Korea, 2017.9.17 (国際会議論文)
- [10] A Sheet-Type Wireless Electroencephalogram (EEG) Sensor System Using Flexible and Stretchable Electronics
Tsuyoshi Sekitani, Shusuke Yoshimoto, Teppei Araki, and Takafumi Uemura
SID Symposium Digest of Technical Papers, 48, 143-146 2017.6.2 (総説)

[学会発表] (計 14 件、うち招待講演 6 件、国際学会 6 件)

- [1] Printable strain gauge of high sensitivity and wide range for simple structural health monitoring implemented with wireless measurement system
Teppei Araki, Shusuke Yoshimoto, Yuki Noda, Takafumi Uemura, Yuko Kasai, Shintaro Izumi, Tsuyoshi Sekitani
2018 Materials Research Society (MRS) fall meeting & exhibit, Symposium PM02.03.06, Conductive Materials Reliability in Flexible Electronics, Boston, the United State, 2018.11.28 (Oral)
- [2] レーザ技術によるストレッチャブル配線パターンニング
荒木徹平, 関谷毅
第 89 回講演会レーザ加工学会, パターンニング技術 24B3, 大阪大学 吹田, 2018.5.24 (口頭, 招待)
- [3] 荒木 徹平, “ウェアラブルデバイスに向けたストレッチャブル配線基材の開発,” JST 第 1 回 COI 学会大阪, 中ノ島, 2018.10.26 (口頭とポスター)
- [4] Bio-Conformable Organic Differential Amplifier on Ultraflexible Polymer Substrate for Low-Noise Biosignal Monitoring
Masahiro Sugiyama, Takafumi Uemura, Shusuke Yoshimoto, Mihoko Akiyama, Masaya Kondo, Teppei Araki, Yuki Noda, and Tsuyoshi Sekitani,
2018 Material Research Society (MRS) Spring meeting & exhibit, Symposium, EP08.07.02, Phoenix, Arizona, the United States, 2018.4.5
- [5] 2-months-implantable neural interface integrated with transparent and stretchable metal-nanowire-based tracks
Teppei Araki, Fumiaki Yoshida, Yuki Noda, Takafumi Uemura, Shusuke Yoshimoto, Taro Kaiju, Takafumi Suzuki, Hiroki Hamanaka, Masayuki Hirata, Tsuyoshi Sekitani
2018 Materials Research Society (MRS) Spring meeting & exhibit, Symposium SM03.02.02, Bioelectronics 11, Phoenix, the United State, 2018.4.3 (Oral)
- [6] 銀ナノワイヤ印刷電極を用いたフレキシブル透明有機トランジスタの開発
竹本 明寿也, 荒木 徹平, 野田 祐樹, 吉本 秀輔, 植村 隆文, 関谷 毅
第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 18p-D102-8, 早稲田大学・西早稲田キャンパス, 2018.3.18 (口頭)
- [7] 柔らかい電極シートを用いた生体計測デバイス
荒木徹平, 吉本秀輔, 植村隆文, 野田祐樹, 関谷毅
平成 30 年電気学会全国大会, シンポジウム講演 S25-3, 福岡 九州大学伊都キャンパス, 2018.3.14 (口頭, 招待)
- [8] Enhanced Electrical Durability and Mechanical Stretchability of Ag Nanowire-Based Transparent Electrodes by Nanometer-Thick Metal Plating
Teppei Araki, Yuki Noda, Ashuya Takemoto, Shusuke Yoshimoto, Takafumi Uemura,

Tsuyoshi Sekitani

International Display Workshops, Electrode Material and Photoresist Technologies FMC5-1, 24, 541-544, 2017.12.8 (国際会議論文、招待)

- [9] ウェアラブル技術の最新動向
荒木徹平, 関谷毅
第2回日本画像学会技術研究会 電子ペーパー/フレキシブル技術研究会「ウェアラブルと電子ペーパーの新展開」, 日本化学会, 東京 千代田区, 2017.10.20 (口頭, 招待)
- [10] 親水撥水パターン表面を用いた銀ナノワイヤ透明電極の微細形成
竹本 明寿也, 荒木 徹平, 野田 祐樹, 吉本 秀輔, 植村 隆文, 関谷 毅
第27回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 1C2-4, 中京大学, 愛知, 2017.8.29 (口頭, 研究奨励賞受賞)
- [11] フレキシブルディスプレイの進展
荒木徹平
第13回サマーセミナー, S I D日本支部主催, 東京 港区, 2017.8.25 (口頭, 招待)
- [12] 50- μ m-Wide Silver Nanowire Electrodes Patterned on Hydrophilic/Hydrophobic Treated Surface for Transparent Organic
Ashuya Takemoto, Teppei Araki, Yuki Noda, Shusuke Yoshimoto, Takafumi Uemura and Tsuyoshi Sekitani
2017 Materials Research Society (MRS) Spring meeting & exhibit, Symposium SM1.3.24, Bioelectronics-Materials, Processes & Applications, Engineering and Applications, Phoenix, the United State, 2017.4.18 (Poster)
- [13] A several-nanometers-thick gold layer on silver nanowires enhancing migration durability on stretchable electrodes for long therapeutic bio-applications
Teppei Araki, Ashuya Takemoto, Yuki Noda, Takafumi Uemura, Shusuke Yoshimoto, Tsuyoshi Sekitani
2017 Materials Research Society (MRS) Spring meeting & exhibit, Symposium SM1.5.08, Bioelectronics-Materials, Processes & Applications, Engineering and Applications, Phoenix, the United State, 2017.4.19 (Oral)
- [14] 医療機器の計測精度を持つパッチ式脳波センサの開発
荒木徹平, 野田祐樹, 植村隆文, 吉本秀輔, 関谷毅
第27回ファインテックジャパン プリンテッドエレクトロニクスフォーラム, 東京 ビックサイト, 2017.4.6 (口頭, 招待)

[図書] (計1件)

- [1] パッチ式脳波センサのためのストレッチャブル配線
荒木徹平, 関谷毅
CMC 出版, プリンテッドエレクトロニクス実用化最前線, 239-242, 2018.9 (分担図書)

[産業財産権] 出願状況 (計1件)

- [1] 親撥液パターンニング剤

[その他]

○受賞 2件

- [1] 優秀ポスター賞: フレキシブル有機トランジスタによる差動増幅回路実現に向けた検討
杉山真弘, 植村隆文, 吉本秀輔, 秋山実邦子, 荒木徹平, 関谷毅
電子情報通信学会・集積回路研究会・若手研究会, 2017年5月
- [2] 最優秀ポスター賞: 生体埋込型64チャンネル皮質脳波無線計測システム
吉本秀輔, 荒木徹平, 植村隆文, 根津俊一, 濱中裕喜, 吉田史章, 鈴木隆文, 平田雅之, 関谷毅
電子情報通信学会・集積回路研究会・LSIとシステムのワークショップ, 2017年5月

○ホームページ

所属研究室 HP: <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/aed/>

Research map HP: https://researchmap.jp/teppe_i_araki/

6. 研究組織

(1) 研究分担者: 該当なし

(2) 研究協力者:

関谷毅 (SEKITANI, Tsuyoshi) 大阪大学産業科学研究所・教授

植村隆文 (UEMURA, Takafumi) 大阪大学産業科学研究所・特任准教授

竹本明寿也 (TAKEMOTO, Ashuya) 大阪大学大学院・博士後期課程

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。