

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：84415

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24350099

研究課題名(和文) 3次元有機トランジスタを用いた有機チャネル高周波特性解明と高速デバイスの開発

研究課題名(英文) High-frequency measurements of organic semiconductor channels utilizing 3-dimensional organic transistors toward the developments of high-speed transistors.

研究代表者

宇野 真由美 (音羽真由美) (Uno, Mayumi)

地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：90393298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：有機トランジスタを用いた高速有機回路を構築する上で重要となる、チャネル内での動的なキャリア伝導機構を明らかにすることを目的として、世界最高速級の有機トランジスタを実現し、その過渡応答特性を評価した。サブミクロン長の縦型チャネルを集積化した3次元有機トランジスタ、及び塗布型有機単結晶トランジスタを独自に開発し、世界最高の応答特性となる20 MHzの遮断周波数と80MHz以上の整流特性を実現した。またキャリア密度と温度をパラメータとして応答特性を評価し、静的手法で求めた移動度からの計算値と比較した。これらの結果は、将来の有機論理回路の実現のために重要なブレイクスルーとなるものである。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional organic transistors comprising vertical short channels are developed to raise the operational speed of organic transistors. The devices with a short-channel length of 0.8 micrometer and reduced parasitic capacitance operate at up to 20 MHz with an applied drain voltage of -15 V. Organic rectifiers based on the diode-connected 3D-OFETs are also demonstrated to operate at above 80 MHz, even with an applied effective voltage of about 4 V. Furthermore, solution-processed p-type and n-type organic transistors with short channels were developed utilizing single-crystalline organic semiconductor films, minimizing the process damage to organic semiconductors. Transient dynamic responses were measured for the both devices in respect to the dependence on the carrier density and temperature. These findings will accelerate the development of organic logic circuits and contribute to the future realization of practical applications in organic electronics.

研究分野：有機半導体デバイス

キーワード：有機半導体 分子性半導体 有機トランジスタ 応答特性 キャリア密度 高周波測定

1. 研究開始当初の背景

有機半導体薄膜の電子輸送機能を用いる有機トランジスタは、室温付近の低温プロセスや塗布工程でも簡便に作製でき、フレキシブルデバイスなどの魅力的な素子を実現できる点で、次世代エレクトロニクス産業創出の要として重要な位置付けにある。しかし従来、有機半導体中のキャリア移動度は $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度と、単結晶 Si と比べて非常に低い値にとどまっていたため、産業応用のために重要となる高速応答性能を実現させることが困難であった。またこれまでに、有機トランジスタ構造を用いれば、有機半導体の絶縁体に接する界面の半導体チャンネルにおいて、ゲート電界を変調することによりキャリア密度を簡単に変えられるため、分子性界面の物性研究の手法としても用いられてきた。しかし、有機半導体中の移動度が低く高速応答が困難であるため、高周波数でのダイナミックな挙動についての解析はなされていない。

有機論理素子としては、2007 年に 430Hz で動作する有機インバータが提案され[1]、その後の素子改良により有機 CMOS 素子の先駆的研究として最高 1~2 MHz の動作速度が報告されていた[2]。しかし、産業応用上特に重要な数 10 MHz 以上の高速動作を実現させるには、有機半導体のさらなる高移動度化や、チャンネル長の大幅なスケールダウンが必要となるため、実現することは困難であった。このため、有機半導体中でのキャリア蓄積(On)状態と掃き出し(Off)状態の間を高速でスイッチングする際の有機半導体中の電荷の挙動に関する研究はほとんどなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、独自に開発した、高速応答が可能な 3 次元有機トランジスタ構造(図 1)[3]を用いて、有機半導体チャンネルの動特性を精密に測定することにより、有機半導体薄膜の高速キャリア伝導の機構を解明することを目的とする。本構造は縦型チャンネルを有するため、平面方向の微細加工の分解能を超えた短チャンネル構造の作製が可能であり、比較的低い移動度であっても数 10 MHz 以上といった高速動作を実現することができる[3]。一般に、有機半導体のキャリアの電界効果移動度の測定は、ゲート電圧を十分長い時間印加した静

的な状態で行われる。これに対し、トランジスタが産業応用デバイスで用いられる場合は、常にゲート電圧が変化する動的な状態で動作されるものであり、キャリアの動的挙動やその周波数応答の限界値を知ることが非常に重要である。本研究では、世界で最高性能となる高速応答性を有する 3 次元有機トランジスタ構造を用いて、高速でゲート電界を変調させた場合の挙動について詳細に評価を行う。それまでの予備実験において、多結晶有機薄膜トランジスタを用いて高速でゲート電界を変調させた場合、従来の静的な測定手法により求めた移動度の値と一致しないという現象がみられており、本研究では、有機半導体中のキャリア特有の挙動について、高周波での動作機構を解明するための基盤となる知見を得る。また、多結晶薄膜との比較として、塗布手法を工夫することにより、数 cm 以上の大きいスケールで高移動度の単結晶有機薄膜を作製し、同様のダイナミック応答測定を行い、多結晶薄膜特有のトラップされたキャリアによる高周波応答への影響を調べる。これらの解析を通して得られた知見をもとに、100 MHz 級の高速有機演算回路の実現を目指し、次世代エレクトロニクス産業の基盤を築くことを目標とする。

3. 研究の方法

高速応答が可能な 3 次元有機トランジスタ構造を用い、注入されるキャリア密度と温度をパラメータとして変化させ、キャリア応答の周波数特性を評価する。本構造を用いれば、従来よりもはるかに低インピーダンスな素子で、高周波数領域までの有機半導体中のキャリアのダイナミックな挙動の評価が可能となる。測定は、新規に提案された高移動度 p 型、n 型動作の両方について行う。また、多結晶薄膜との比較として、高移動度の単結晶有機トランジスタを作製して同様の評価を行う。最近提案された、高移動度でかつ化学的に安定な新材料を用いて、新たな塗布手法を開発することにより、移動度が $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超えることが可能になっている。本研究では、有機半導体にダメージを与えない作製プロセスを用いてこれらの高移動度膜上で微細加工を行うことにより、短チャンネル・トップコンタクト型の高速有機単結晶トランジスタを作製し、その高速応答特性を測定する。これらを多結晶薄膜でのキャリアの応答特性と比較することにより、結晶粒界でのトラップの影響等についても評価する。

4. 研究成果

(1) 3 次元構造を用いた短チャンネル有機トランジスタの作製とトランジスタ動特性の評価

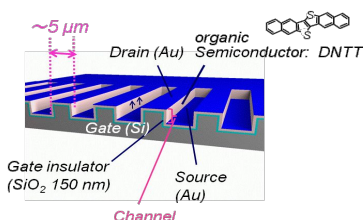


図 1 3 次元有機トランジスタ構造の例

3次元有機トランジスタ(3D-OFETs)構造を用いて、有機多結晶薄膜の動的な伝導性能の測定を行った。蒸着条件を変化させてモフォロジーを変えた多結晶有機薄膜を作製し、そのトランジスタの応答特性についてゲート電界強度を変調して測定した。有機半導体材料としてDNNTを用いて蒸着法により多結晶薄膜を作製し、分子膜の表面つきまわり性が最も良好な条件では、構造体壁面での移動度として $1.0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の値を得た。また、トランジスタの応答速度をさらに高めるために、3D立体構造の側面部のみにゲート電極を残すプロセスを用いて、ゲート寄生容量を格段に低減した新しい構造を開発し、その応答性能を評価した。この結果、これまで $4\sim 7 \text{ MHz}$ の応答性能にとどまっていたところを、ドレイン電圧 15 V で最大応答周波数 20 MHz という、大気中安定動作が可能な有機トランジスタとして世界最高速の応答性能を得ることができた(図2)。

この高速応答3D-OFETs構造を用いて、ゲート電圧、ドレイン電圧値を変化させてトランジスタの高速応答特性の評価を行った。この結果、ゲート電圧が低くキャリア密度が低い場合には、静的な移動度評価から求めた値よりも最大応答周波数が低くなるが、キャリア密度が十分高い場合は静特性から求めた移動度から計算した値とほぼ一致するという結果が得られた。接触抵抗の影響や、多結晶薄膜の粒界部分でのトラップされたキャリア等により、高速応答に寄与しないキャリア成分が存在することを示唆している。

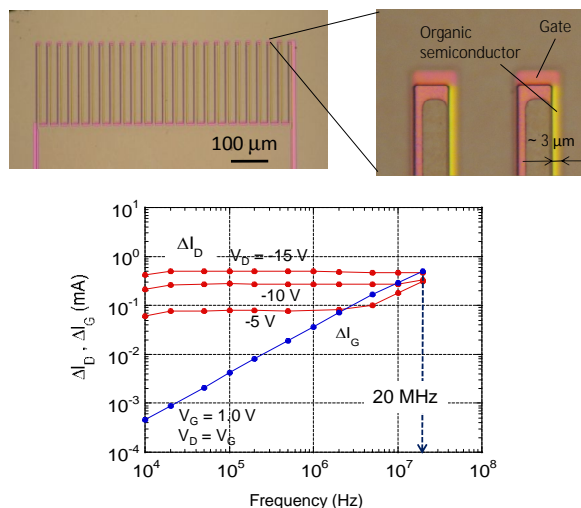


図2 高速応答を実現した3D-OFETsの顕微鏡写真(上)とその周波数応答特性

(2) 塗布法を用いた高速単結晶有機トランジスタの作製とその特性評価

多結晶膜とのキャリア挙動の比較を行うため、新たに開発した塗布法を用いて大面積・

高移動度の有機単結晶膜を作製し、トランジスタ構造を作製してその特性評価を行った。独自に開発した有機半導体上での微細加工プロセスを採用することにより、有機半導体材料が化学的なダメージを受けることなく、トップコンタクト構造を作製することが初めて可能となった。本構造は、電極との接触面積を大きくとることができるため低い接触抵抗を簡単に得ることができるが、従来は有機半導体へのプロセスダメージの影響が大きいため、良好な移動度を得ることが困難であった。本手法を用い、有機半導体として新規に提案された高移動度材料である C_{10} -DNBDTを用いて有機半導体と金属電極との接触抵抗をTransfer Line Methodにより測定した結果、p型動作で $120 \Omega \cdot \text{cm}$ という、これまでに報告例がない非常に低い値を得ることができた。トランジスタの高速応答のためには、短チャネル長で高移動度を実現することが重要であるが、本構造ではこれが実現している。本構造を用いて周波数応答特性を測定した結果、チャネル長 $2 \mu\text{m}$ の場合で 20 MHz という非常に高速の応答特性を得ることができた。キャリア密度に対する周波数応答の依存性は、ドレイン電圧に対して比例した応答特性が得られており、多結晶膜の場合に見られた理論値との不一致は見られなかった。

(3) n型動作有機半導体を用いた高速応答測定

これまでの、有機半導体のn型動作として、大気安定性が高くかつ移動度が高い例はほとんど報告されていなかった。本研究では、最近合成された新規材料で、大気中で安定動作が可能であり、かつ比較的高移動度を得られる有機分子材料を入手し、高移動度を得られるための塗布条件を確立した。さらにドナー材料をキャリア注入電極に用いることにより、接触抵抗が $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ と、従来より大幅に低い接触抵抗のn型トランジスタ動作を得ることができた。移動度は大気中でも $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える値が得られており、n型動作として非常に高移動度のトランジスタ特性を得ることができた。

(4) 低温領域でのトランジスタ動特性の評価

キャリア伝導機構をより詳細に調べるために、室温領域から 50 K 程度の低温域まで温度変化させた状態で、トランジスタのダイナミック応答性能の評価を行った。測定のために12 bit 高速デジタルオシロスコープを導入し、より高速側の 100 MHz 程度まで応答性能の評価を低ノイズで精密に行えるようにした。また、ネットワークアナライザを用いて、Sパラメータ、Hパラメータの温度依存性を評価し、

従来の応答特性の測定方法を用いた場合との比較を行った。動的挙動の測定は、短チャンネル3D-OFETs構造を用いた多結晶薄膜と、塗布法で作製した有機単結晶薄膜の両方について行った。この結果、いずれも高温域では静特性で求めた移動度から計算した値と一致する応答性能が得られたが、低温側では応答特性が計算値からずれていくという結果が得られた。今後、トラップキャリア量との関係等についてさらに詳細に解析する必要がある。

(5)有機トランジスタの高速整流特性の測定

先に述べた縦型チャンネルを有する3次元有機多結晶トランジスタと、塗布型有機単結晶トランジスタとを用いて、トランジスタをダイオード接続した整流素子を形成し、整流特性の周波数応答性能を測定した。有機トランジスタは、Siを用いたMOS-FETとは異なり内部に寄生ダイオードを持たないため、ゲートドレイン間を短絡すれば、交流信号を直流信号に変換可能な整流素子が実現できる。いずれも20 MHz以上の高速応答性能が得られているため、本測定を行うことが初めて可能となったものであり、整流特性を測定することにより有機チャンネル形成速度の評価が可能であると考えた。この結果、3D-OFETs、単結晶有機トランジスタの両方の場合について、80 MHz程度の値を得ることができた。これは一般的に知られている応答遮断周波数の計算値より6倍程度以上の非常に速い応答である。チャンネルサイズやソース・ドレイン電極とゲート電極とのオーバーラップ長を変化させて、同様の応答性測定を行った結果、ゲート寄生容量の値を変化させても同一の応答速度が得られており、先と同様に非常に高速の整流応答性が得られることがわかった。これらは、有機半導体が真性半導体であることに起因する本質的な特性の表れと思われる。チャンネル形成のために必要な時間応答性能の計算を行い、実験とほぼ一致する計算式を提案し論文にて報告した。これらの結果は、将来の有機エレクトロニクス、有機演算回路の実現のために、非常に重要な基礎データとなるものであり、得られた知見により、有機トランジスタを用いたフレキシブルな高速論理素子の研究開発の進展を加速させることができる。

<引用文献>

[1] H. Klauk, U. Zschieschang, et al., *Nature* 445, 745 (2007). [2] K.J. Baeg, et al., *Polymer phys.*49, 62 (2010), M.Kitamura, K. Arakawa, et al., *APEX* 4, 051601 (2011). [3] M.Uno, J.Takeya, et al., *Appl.Phys.Lett.* 94, 103307 (2009), *Appl.Phys.Lett.* 97, 013301 (2010).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

M.Ito, M. Uno, J. Takeya, Low-resistance contacts of electroless-plated metals with high-mobility organic semiconductors: novel organic field-effect transistors with solution-processed electrodes, *Organic Electronics* 27, 2015, 53-58. 査読有
DOI:10.1016/j.orgel.2015.08.025

K. Nakayama, B.S. Cha, Y. Kanaoka, M. Uno, J. Takeya, Thermal sensors and read-out circuits with organic semiconductors, *Proceedings of the 32nd Sensor Symposium 2015*, 29pm3-PS-69-73. 査読無

宇野真由美, 高性能塗布型有機半導体トランジスタと有機論理回路への応用, 応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会誌 26 No.2, 2015, 55-59. 査読無

Mayumi Uno, Yusuke Kanaoka, Bu-Sung Cha, Nobuaki Isahaya, Masaki Sakai, Hiroyuki Matsui, Chikahiko Mitsui, Toshihiro Okamoto, Jun Takeya, Tetsuya Kato, Masayuki Katayama, Yoshihisa Usami, Takeshi Yamakami, Short-channel solution-processed organic semiconductor transistors applied to high-speed organic complementary circuits and organic rectifiers, *Advanced Electric Materials* 1, 2015, 1500178-1500184. 査読有,
DOI: 10.1002/aelm.201500178

宇野真由美、竹谷純一, プリントブルRFIDの現状と展望, 月刊自動認識 1月号, 2015, 39-41. 査読無

S.Sakai, J. Soeda, R. Häusermann, H. Matsui, C. Mitsui, T. Okamoto, M. Ito, K. Hirose, T. Sekiguchi, T. Abe, M. Uno, J. Takeya, All solution-processed organic single-crystal transistors with high mobility and low-voltage operation, *Organic Electronics* 22, 2015, 1-4. , 査読有,
DOI:10.1016/j.orgel.2015.03.015

Mayumi Uno, Bu-Sang Cha, Yusuke Kanaoka, Jun Takeya, High-speed organic transistors with three-dimensional organic channels and organic rectifiers based on them operating above 20 MHz, *Organic Electronics* 20, 2015, 119-124. 査読有,
DOI: 10.1016/j.orgel.2015.02.005

K. Nakayama, M. Uno, T. Uemura, N. Namba, Y. Kanaoka, T. Kato, M. Katayama, C. Mitsui, T. Okamoto, J. Takeya, High-mobility organic transistors with

wet-etch-patterned top electrodes: a novel patterning method for fine-pitch integration of organic devices, *Advanced Materials Interfaces* 1, 2014, 1300124-1300127. 査読有,
DOI: 10.1002/admi.201300124

Mayumi Uno, Yusuke Kanaoka, Takafumi Uemura, Facchetti Antonio, Jun Takeya, High-speed organic single-crystal transistors gated with short-channel air gaps: Efficient hole and electron injection in organic semiconductor crystals, *Organic Electronics* 15, 2013, 1656-1659. 査読有,
DOI: 10.1016/j.orgel.2013.03.009

Kengo Nakayama, Wei Ou-Yang, Mayumi Uno, Itaru Osaka, Kazuo Takimiya, Jun Takeya, Flexible Air-Stable Three-Dimensional Polymer Field-Effect Transistors with High Output Current Density, *Organic Electronics* 14, 2013, 2908-2915., 査読有,
DOI: 10.1016/j.orgel.2013.08.002

Mayumi Uno, Takafumi Uemura, Yusuke Kanaoka, Zihua Chen, Antonio Facchetti, Jun Takeya, High-speed organic single-crystal transistors gated with short-channel air gaps: Efficient hole and electron injection in organic semiconductor crystals, *Organic Electronics* 14, 2013, 1656-1662. 査読有,
DOI:10.1016/j.orgel.2013.03.009

Rie Nakahara, Mayumi Uno, Takafumi Uemura, Kazuo Takimiya, Jun Takeya, Flexible three-dimensional organic field-effect transistors fabricated by an imprinting technique, *Advanced materials* 24, 2012, 5212-5215. 査読有,
DOI: 10.1002/adma.201290234

〔学会発表〕(計 22 件)

宇野 真由美, 有機トランジスタの高性能化技術とフレキシブルセンサへの応用, 大阪産業創造館テクニカルセミナー, H28年3月2日, 大阪産業創造館(大阪府・大阪市)

宇野 真由美, 高性能塗布型有機トランジスタと論理回路・センサへの応用, 応用物理学会関西支部 H27年度第3回講演会, H28年2月5日, 大阪府立大学(大阪府・堺市)

宇野 真由美, 高性能塗布型有機トランジスタを用いた有機論理素子の開発, Sensor EXPO 2016, H27年9月18日, 東京ビッグサイト(東京都・江東

区)

松井 弘之, 山村 祥史, 宇野 真由美, 金岡 祐介, 竹谷 純一, 他 13 名, 塗布有機半導体トランジスタを用いた4ビット無線デジタル伝送, 2015年第76回応用物理学会秋季学術講演会, H26年9月15日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

中山 健吾, 車 溥相, 金岡 祐介, 宇野 真由美, 諫早 伸明, 竹谷 純一, センサ信号読出のための有機ADコンバータ, 2015年第76回応用物理学会秋季学術講演会, H27年9月13日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

宇野 真由美, 高性能塗布型有機半導体トランジスタと有機論理回路への応用, 応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会, H27年5月28日, 富山大学(富山県・富山市)

宇野 真由美, 高性能有機トランジスタと論理回路・センサへの応用, おかやま電池関連技術研究会, H27年7月6日, (岡山県・岡山市)

宇野真由美, 有機トランジスタとそのセンサ応用, 新無機膜研究会 第14次技術調査委員会, H27年3月2日, 大阪府立産業技術総合研究所(大阪府・和泉市)

宇野真由美, 金岡 祐介, 他9名, 竹谷 純一, 短チャネル塗布型有機トランジスタを用いた有機CMOS回路, 2014年第62回応用物理学会春季学術講演会, H27年3月14日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県厚木市)

宇野 真由美, 高性能塗布型有機トランジスタを用いた有機論理素子の開発, Sensor EXPO 2014, H26年9月18日, 東京ビッグサイト(東京都・江東区)

金岡祐介, 宇野 真由美, 中山健吾, 竹谷純一, 松本孝典, 加藤哲弥, 片山雅之, 宇佐美由久, 高速有機整流素子と有機CMOSリングオシレータを用いたRF変調回路, 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, H26年9月18日, 北海道大学 札幌キャンパス(北海道・札幌市)

宇野 真由美, 金岡祐介, 車 溥相, 阿南 裕穂, 加納 一彦, 片山雅之, 3次元有機トランジスタを用いた接触荷重センサ, 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, H26年9月17日, 北海道大学 札幌キャンパス(北海道・札幌市)

宇野 真由美, インプリントによる3次元有機トランジスタ, 応用物理学会シングルナノパターンニング研究グループ第3回講演会, H26年7月14日, 大阪大学産業科学研究所(大阪府・吹田市)

J. Takeya and M. Uno, Technology Development for Printed LSIs Based on Organic Semiconductors, VLSI Symposium 2014 (invited), H26年6月11日, Hilton Hawaiian Village (Honolulu, USA)

宇野真由美, 金岡祐介, 他3名, 竹谷 純一, 短チャネル・高移動度有機塗布結晶トランジスタを用いた高速整流素子, 2014年第61回応用物理学会春季学術講演会, H26年3月17日, 青山学院大学(神奈川県・厚木市)

宇野 真由美, 塗布結晶化による高移動度有機トランジスタと論理素子への応用, セミコン・ジャパン 2013 プリンテッドエレクトロニクス研究会シンポジウム (招待), H25年12月6日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市)

金岡祐介, 宇野 真由美, 中山健吾, 松本孝典, 加藤哲弥, 片山雅之, 竹谷純一, 高移動度有機トランジスタを用いたCMOS回路, 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会, H25年9月20日, 同志社大学 京田辺キャンパス(京都府・京田辺市)

宇野 真由美, 金岡祐介, 竹谷 純一, 高速有機トランジスタを用いたダイオードの高速整流特性, 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会, H25年9月20日, 同志社大学 京田辺キャンパス(京都府・京田辺市)

Mayumi Uno, Bu-sang Cha, Kengo Nakayama, Kazuo Takimiya, Jun Takeya, High-speed and high-power three-dimensional organic field-effect transistors, ISCS 2013 International Symposium on Compound Semiconductors (invited), H25年5月20日, 神戸コンベンションセンター(兵庫県・神戸市)

宇野 真由美, 高性能なフレキシブル3次元有機トランジスタ, JST 推薦シーズ 新技術説明会, 2013年3月11日, JST 東京本部(東京都・千代田区)

21. 宇野 真由美, 車 溥相, 瀧宮 和男, 竹谷 純一, 高速応答 3次元有機トランジスタ, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013年3月27日, 神奈川工科大学(神奈川県・厚木市)

22. 中山 健吾, 宇野 真由美, 尾坂 格, 瀧宮 和男, 竹谷 純一, 3次元構造を利用した高出力フレキシブルポリマー-TFT, 2012秋季 応用物理学会学術講演会, 2012年9月13日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 3次元構造を有する薄膜トランジスタ及びその製造方法

発明者: 宇野真由美、竹谷純一

権利者: パイクリスタル(株) 種類: 特許

番号: 特願 2012-27505(P2012-27505)

出願年月日: 平成24年2月10日

国内外の別: 国内、PCT

取得状況(計1件)

名称: 3次元構造を有する薄膜トランジスタ及びその製造方法

発明者: 宇野真由美、竹谷純一

権利者: パイクリスタル(株) 種類: 特許

番号: 特許第5887591号(P5887591)

取得年月日: 平成28年2月26日

国内外の別: 国内

〔その他〕ホームページ

http://tri-osaka.jp/fields/seigyo_denshi_zairyuu/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇野 真由美 (UNO, Mayumi)

大阪府立産業技術総合研究所 制御・電子材料科 主幹研究員, 研究者番号: 90393298

(2) 研究分担者

金岡 祐介 (KANAOKA, Yusuke)

大阪府立産業技術総合研究所 制御・電子材料科 研究員, 研究者番号: 60443537

(3) 研究分担者

山田 義春 (YAMADA, Yoshiharu)

大阪府立産業技術総合研究所 制御・電子材料科 主任研究員, 研究者番号: 50463625

(4) 研究分担者

植村 隆文 (UEMURA, Takafumi)

大阪大学産業科学研究所 先進電子デバイス研究分野特任准教授, 研究者番号: 30448097

(5) 研究分担者

竹谷 純一 (TAKEYA, Junichi)

東京大学新領域創成科学研究科・物質系専攻教授, 研究者番号: 20371289