

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22340080

研究課題名（和文）

有機電界効果デバイス界面の電子・スピン機能とその制御

研究課題名（英文）

Electronic and spin functions of pi-electron interface in organic field-effect devices

研究代表者

黒田 新一 (KURODA SHINICHI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20291403

研究成果の概要（和文）：

有機トランジスタ (FET) ではデバイス界面でのキャリアの伝導機構や電子・スピン機能が注目されている。本研究では、電子スピン共鳴 (ESR) 法により FET 界面におけるキャリアのスピンを直接観測し、キャリアダイナミクス、界面分子配向等を決定し、デバイス機能との相関をミクロな観点から解明した。特に高移動度を示すチエノチオフェン系 FET では極低温でもキャリアが明瞭に運動していることをはじめて明らかにした。また超薄膜高分子 FET では主鎖配向と移動度異方性との相関を、またルブレン単結晶 FET では界面の化学修飾の効果を明らかにした。さらに高濃度キャリア注入下では、分子構造に依存したバイポーラロン生成などスピン状態制御の可能性を示すことに成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, field-induced electron spin resonance (FI-ESR) method is applied to directly detect the spins of charge carries at the interface of organic FETs. Microscopic information such as electronic and spin states of charge carries and local molecular orientation is obtained, which is crucial in understanding the device functions. In high-mobility thin-film transistors of a thienothiophene-based molecule C8-BTBT, FI-ESR has provided evidence for the charge carrier motion even at 4K within highly crystalline domains. Correlation between mobility anisotropy and uniaxial orientation of polymer chains has been clarified in ultrathin polymeric transistors and correlation between the interface chemical treatments and mobility enhancement has been revealed in crystalline transistors of rubrene. Further, in high-density carrier injections, crossover from polarons with spins to spinless bipolarons or polaron pairs is suggested in both polymeric and molecular FETs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：磁気共鳴、有機固体

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：有機半導体、電子スピン共鳴、有機電界効果トランジスタ、非線形素励起、導電性高分子、理論計算

1. 研究開始当初の背景

有機 FET は高移動度分子の開発などによる性能向上が著しく応用研究が盛んに行われる一方、高い移動度の起源や伝導機構について物性的な観点からも注目される。ホール伝導測定などにより、従来のホッピング伝導からバンド的な伝導機構を支持する結果が得られつつあったが、ポーラロン効果などを含めたキャリアの全体描像はまだ十分確立していない。研究代表者らは、FET 界面の注入キャリアを直接検出する新しい実験手法として ESR 法の適用を提案し、高移動度高分子 FET のデバイス界面に蓄積されたキャリアの ESR 観測に世界ではじめて成功した。さらに、高移動度低分子として注目されるペンタセンの FET での電界注入キャリアの ESR にも成功し、キャリア波動関数が 10 分子に広がっていることを明らかにしバンド的な伝導をミクロに支持する結果を得ていた。

そこで、本研究では、この独創的な手法を、新しい分子の導入やデバイス界面の化学修飾などにより性能が著しく向上している新規な FET へ系統的に展開することにより、キャリアの電子状態と伝導特性との相関を解明し、キャリア伝導機構をミクロに解明することを主要な目標とした。さらに我々は高分子 FET でキャリア注入を高めると、キャリアがスピンを持たないバイポーロン（またはポーラロン対）へ変化する現象も見出しつつあったが、このようなスピン転移や絶縁体 - 金属転移などの新規な物性を探索し、有機デバイス界面の電子・スピン機能を開拓して行くことも重要な目標であった。

2. 研究の目的

有機デバイス界面の電子・スピン機能の開拓を、電場誘起 ESR 法によるキャリアの観測によりすすめることが本研究の目的である。このため、塗布型の π 共役系高分子などの有機薄膜材料や、ルブレンなどの単結晶材料を用いて高移動度 FET を構築する。さらに絶縁膜界面の化学修飾を併用し、高分子系では主鎖配向制御を行うことによりデバイス特性の制御を目指した。

ESR によりデバイス界面のキャリアを観測し、ESR 信号のパラメータである π 電子の g 値や超微細相互作用による ESR 線幅とその異方性を決定する。これらパラメータを理論計算と比較することにより、キャリアの電子状態やデバイス界面における分子配向を評価する。また、キャリアの熱運動による ESR 線幅の先鋭化効果からキャリアダイナミクスを評価する。

高濃度に注入されたキャリアによる新規現象の探索として、高誘電率の Al_2O_3 や耐電圧の高い有機・無機絶縁膜に高電界を印加し

て高濃度の電荷注入を行い、キャリア間の相互作用を促進し、ポーラロン・バイポーロン転移や絶縁体 - 金属転移などを高分子系および低分子系について探索する。

3. 研究の方法

FET 材料としては、低分子系では高移動度材料として注目されるチエノチオフェン系分子 C8-BTBT を用いた薄膜 FET およびルブレンを用いた結晶 FET などを作製した。また高分子系では従来のポリヘキシルチオフェン (P3HT) に加え、発光性も有する MEH-PPV などを用い、高分子鎖を配向制御した超薄膜 FET も作製した。FET の絶縁膜としては、 Al_2O_3 膜や低ドーブ Si/SiO_2 膜、高分子膜パリレンを使用した。また、 SiO_2 絶縁膜の表面には、移動度向上の目的で、自己組織化単分子膜による化学修飾を行った。

電場誘起 ESR スペクトルから g 値の主値を決定し、DFT 計算による理論値と比較することにより FET 界面におけるキャリアの電子状態を明らかにした。また、 π 電子の異方性にもとづき、ESR 信号の角度依存性をスペクトルシミュレーション法で解析し、絶縁膜界面での分子配向を評価し、移動度との相関を検討した。さらに C8BTBT やルブレンなどの高移動度 FET では、キャリアの熱運動による ESR 線幅の先鋭化を観測しキャリアのトラップ時間を評価した。

キャリアの高濃度注入時におけるスピン状態を評価するため、ESR 信号からスピン数を高精度で求め、注入キャリア数と比較することにより、キャリアがスピンと電荷をもつポーラロンから、スピンを持たないバイポーロン等への変化の有無について調べた。これらの測定以外にもデバイス動作状態における測定や、タイトバインディングモデルによるペンタセンのポーラロン広がりモデル計算なども行った。

4. 研究成果

(1) チエノチオフェン系分子 C8BTBT を用いた薄膜 FET の ESR

チエノチオフェン系分子は硫黄原子を介した分子間相互作用が強く、高い結晶性を有し、高移動度 FET が得られる。また、ホール効果測定から多結晶薄膜でもバンド的伝導機構を示すことから注目される。しかし低温ではグレインの影響によるトラッピングのため伝導特性の観測は困難となる。一方、電場誘起 ESR では、グレインに影響されることなくデバイス界面のキャリア状態がミクロに観測できる。特に極低温における結晶ドメイン内でのキャリア特性は極めて興味深い問題である。広島大の瀧宮教授と共同で C8BTBT の薄膜 FET を作製し極低温まで電場誘

起 ESR を測定した。

ESR 信号はペンタセンやルブレソなどと比較して大きな g シフト値を示し、DFT 計算から硫黄原子のスピン軌道相互作用の寄与であることが示された。さらに、ESR 信号は顕著な角度依存性を示し、ESR シミュレーションによる解析の結果、C8BTBT 分子は分子長軸が基板にほぼ垂直な end-on 配向を持つことがわかった。また、 g 主軸は基板法線より 5° 傾いた高秩序の配向を示し、基板界面での高い結晶性を裏付けた。一方、電場誘起 ESR 信号は 4 K においても運動による線幅の先鋭化を明瞭に示した。極低温における FET 界面でのキャリアの運動の観測に成功したのはこれが初めてであり、C8BTBT 分子の高い結晶性に起因するキャリアの運動性をマイクロに示すものと言える。

(2) P3HT 超薄膜 FET の ESR

名大の永野准教授、関教授らと共同し、P3HT の配向超薄膜 FET を作製した。一軸配向膜は液晶分子を混合展開する Langmuir-Blodgett (LB) 法を用い、単分子膜単位で高分子鎖を一軸配向することを可能にした。1-5 分子層累積したトランジスタは $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の良好な移動度を示した。高分子鎖方向に平行の移動度は、垂直方向に比べ、2 倍程度大きいことがわかり、このような弱い異方性は π - π スタックが発達した P3HT のラメラ構造の形成による擬 2 次元伝導異方性を明らかにしたものである。

ESR 信号の角度依存性を測定し、基板法線方向に加え、高分子鎖が一軸配向した基板面内で、高分子鎖方向と、それと直交する π -スタック方向で異なる g 値・線幅が観測された。 g 主値は高分子鎖方向で最小値をとり、DFT 計算とよく一致し、チオフェン系高分子における π 電子の異方性を直接観測することに初めて成功した。また、スペクトルシミュレーションを用いて、非対称性を示す面内方向の ESR 信号を解析することで、基板面内の配向分布を高精度に決定し、配向制御された超薄膜トランジスタの形成を裏付けた。

(3) ルブレソ単結晶 FET の ESR

大阪大の竹谷教授、東大の岩佐教授らと共同し、ルブレソ単結晶の FET を貼り付け法で SiO₂ 絶縁膜上に作製した。異なる種類の自己組織化単分子膜 (SAM) を用いた界面の化学修飾により、移動度の異なるデバイスを作製して ESR を観測した結果、キャリアの運動で先鋭化した ESR 線幅と、FET 移動度の間に明瞭な相関性が見いだされた。ESR 線幅の解析から、キャリアのトラップ時間が短いほど FET 移動度が高くなることが明らかになった。

一方、 g 主値の異方性は DFT 計算でよく再現された。ESR 信号の角度変化から、デバイス界面における分子配向すなわち結晶性は

SAM 処理により変化していないことが明瞭に示され、移動度の向上は絶縁膜界面におけるキャリアのトラッピングの低減効果であることがマイクロに示された。

(4) 高キャリア注入下におけるスピン飽和現象

P3HT の FET へ高濃度のキャリア注入をおこないキャリア濃度が 0.2% を超えると、キャリアのバイポーラロン等へ変化によるスピン飽和現象が見出されていたが、この現象は絶縁膜の種類によらない P3HT 固有の現象である事が確かめられた。このような変化はペンタセンでは低温まで含めて生じない。さらに、最近、イオン液体による高キャリア注入下での P3HT トランジスタの研究が開始され、乱れた金属状態を示す VRH 伝導が観測されるとともに、イオンゲル P3HT トランジスタの ESR では、固体絶縁膜 FET 系と符合したスピン飽和現象、さらには 2 次元伝導磁気相互作用が確認された。

一方、C8BTBT の FET での低温における新規な現象として、これまで高分子系の P3HT の FET のみで観測されていた、高キャリア濃度におけるポーラロンからバイポーラロンへの変化を示唆するスピンの飽和現象が極低温ではじめて観測され、低分子系でも分子構造に依存する現象であることが確認された。

(5) 有機 FET 研究の新たな展開と今後の展望
電場誘起 ESR は、発光高分子超薄膜 FET、フラーレン複合体、さらにチエノチオフェン系 PBTTT や低分子誘導体などへの展開がすすめられている。またスピン飽和現象のモデル化も興味深い課題であり、ポーラロン波動関数や相互作用の次元性などを取り入れた理論も期待される。一方、デバイス動作状態の ESR 研究なども有機 FET 界面の機能制御に新たな知見をもたらす可能性がある。

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 23 件)

- 1) 黒田新一、「有機エレクトロニクス材料・デバイスの ESR 研究」、電子スピンスサイエンス、第 11 巻 春号(通号 20) 30-35 (2013). 査読有
- 2) H. Ito, T. Iwata, S. Watanabe, and S. Kuroda, “Balanced Ambipolar Transport of the Composite Film of a Carbazole-Benzothiadiazole Copolymer with a Fullerene Derivative”, Appl. Phys. Express 6, 051601-1-3 (2013). DOI: 10.7567/APEX.6.051601. 査読有
- 3) S. Obata and Y. Shimoi, “Control of Molecular Orientations of Poly(3-hexylthiophene) on

- Self-Assembled Monolayers: Molecular Dynamics Simulations”, Phys. Chem. Chem. Phys. (2013) Advance Article. DOI: 10.1039/C3CP44150D. 査読有
- 4) H. Tanaka, M. Hirate, S. Watanabe, K. Kaneko, K. Marumoto, T. Takenobu, Y. Iwasa, and S. Kuroda, “Electron spin resonance observation of charge carrier concentration in organic field-effect transistors during device operation”, Phys. Rev. B 87, 045309-1-7 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.045309. 査読有.
 - 5) Y. Takahashi, M. Tsuji, Y. Yomogida, T. Takenobu, Y. Iwasa, and K. Marumoto, “Electron Spin Resonance Study of Organic Interfaces in Ion Gel-Gated Rubrene Single-Crystal Transistors”, Appl. Phys. Express 6, 041603-1-4 (2013). DOI: 10.7567/APEX.6.041603. 査読有
 - 6) M. Tsuji, Y. Takahashi, Y. Sakurai, Y. Yomogida, T. Takenobu, Y. Iwasa, and K. Marumoto, “Two-dimensional magnetic interactions and magnetism of high-density charges in a polymer transistor”, Appl. Phys. Lett. 102, 133301-1-5 (2013). DOI: 10.1063/1.4800550. 査読有
 - 7) S. Obata and Y. Shimoi, “Preferable Molecular Orientation of Poly(3-hexylthiophene) on Self-Assembled Monolayers: Molecular Dynamics Simulation”, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 印刷中. 査読有
 - 8) Y. Ando, H. Ito, S. Watanabe, and S. Kuroda, “Variable-Range Hopping Conduction in Ion-Gel-Gated Electrochemical Transistors of Regioregular Poly(3-hexylthiophene)”, J. Phys. Soc. Jpn. 37, 114721-1-4 (2012). DOI: 10.1143/JPSJ.81.114721. 査読有
 - 9) S. Obata and Y. Shimoi, “Molecular Arrangements of Regioregular and Regiorandom Poly(3-hexylthiophene): Molecular Dynamics Simulations”, Trans. MRSJ. 37, 311-314 (2012). 査読有
 - 10) Y. Shimoi, K. Marumoto, and S. Kuroda, “Theoretical ESR g Values in Rubrene and Oligoacenes: Implication to Molecular Orientation at Interfaces in Organic FETs”, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 566, 33-37 (2012). DOI: 10.1080/15421406.2012.701113. 査読有
 - 11) K. Azuma, D. Son, K. Marumoto, M. Kijima and Y. Shimoi, “Electron Spin Resonance of Thin Films of N,N'-di(1-naphthyl)-N,N'-diphenylbenzidine (NPB) Doped by Iodine Vapor”, Chem. Lett. 41, 191-193 (2012). DOI: 10.1246/cl.2012.191. 査読有
 - 12) H. Tanaka, S. Kuroda, H. Iguchi, S. Takaishi, and M. Yamashita, “Electron spin resonance observation of dehydration-induced spin excitations in quasi-one-dimensional iodo-bridged diplatinum complexes”, Phys. Rev. B 85, 073104-1-5 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.073104. 査読有
 - 13) 田中久暁, 「電子スピン共鳴法による擬一次元金属錯体および導電性高分子における素励起の研究」、電子スピンサイエンス、第10巻 春号 (通号18) 19-25 (2012). 査読有
 - 14) S. Watanabe, H. Tanaka, S. Kuroda, A. Toda, H. Tomikawa, S. Nagano, and T. Seki, “Charge transport anisotropy due to interfacial molecular orientation in polymeric transistors with controlled in-plane chain orientation”, Appl. Phys. Express 5, 021602-1-3 (2012). DOI: 10.1143/APEX.5.021602. 査読有
 - 15) H. Tanaka, M. Kozuka, S. Watanabe, H. Ito, Y. Shimoi, K. Takimiya, S. Kuroda, “Observation of field-induced charge carriers in high-mobility organic transistors of a thienothiophene-based small molecule: Electron spin resonance measurements”, Phys. Rev. B 84, 081306-1-4 (R) (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.081306. 査読有
 - 16) H. Ito, Y. Nishikawa, J. Suzuki, A. Suzuki, S. Watanabe, H. Tanaka, H. Kishida, A. Nakamura, S. Kuroda, “Quadrimeric Recombination of Persistent Photocarriers in Surface-Type Photocells of Regioregular Poly(3-hexylthiophene)/Methanofullerene Composites”, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 091602-1-4 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.091602. 査読有
 - 17) M. Tsuji, N. Arai, K. Marumoto, J. Takeya, Y. Shimoi, H. Tanaka, S. Kuroda, T. Takenobu, Y. Iwasa, “Electron Spin Resonance Study of Interface Trap States and Charge Carrier Concentration in Rubrene Single-Crystal Field-Effect

- Transistors”, *Appl. Phys. Express* 4, 085702-1-3 (2011). DOI: 10.1143/APEX.4.085702. 査読有
- 18) 下位幸弘, 関和彦, 今村裕志, 「国立研究所は今 産業技術総合研究所 有機デバイス材料・オプトエレクトロニクスに対する理論展開」, *O plus E* 23, 630-633 (2011). 査読無
- 19) S. Watanabe, H. Tanaka, H. Ito, S. Kuroda, T. Mori, K. Marumoto, and Y. Shimoi, “Direct determination of interfacial molecular orientations in field-effect devices of P3HT/PCBM composites by electron spin resonance”, *Org. Electr.* 12, 716-723 (2011). DOI: 10.1016/j.orgel.2011.01.024. 査読有
- 20) K. Marumoto, J. Takeya, Y. Shimoi, H. Tanaka, S. Kuroda, T. Takenobu and Y. Iwasa (他 7 名), “Microscopic mechanisms behind the high mobility in rubrene single-crystal transistors as revealed by field-induced electron spin resonance”, *Phys. Rev. B* 83, 075302-1-6 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.075302. 査読有
- 21) Jie Lei, Y. Shimoi, “Tight-Binding Study of Polarons in Two-Dimensional Systems: Implications for Organic Field-Effect Transistor Materials”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 034702-1-7, (2011). DOI: 10.1143/JPSJ.80.034702. 査読有
- 22) S. Watanabe, H. Tanaka, S. Kuroda, A. Toda, S. Nagano, T. Seki, A. Kimoto, J. Abe, “Electron spin resonance observation of field-induced charge carriers in ultrathin-film transistors of regioregular poly(3-hexylthiophene) with controlled in-plane chain orientation”, *Appl. Phys. Lett.* 96, 173302-1-3 (2010). DOI: 10.1063/1.3421538. 査読有
- 23) H. Tanaka, Y. Yokoi, N. Hasegawa, S. Kuroda, T. Iijima, T. Sato, T. Yamamoto, “Quadrimeric recombination kinetics of photogenerated charge carriers in the composites of regioregular polythiophene derivatives and soluble fullerenes”, *J. Appl. Phys.* 107, 083708-1-9 (2010). DOI: 10.1063/1.3380839. 査読有
- 中のキャリア ESR 観測」, 日本化学会第 93 春季年会、2013 年 3 月 24 日、立命館大学 (滋賀県) (招待講演)
- 2) K. Marumoto, “Charge transport and ESR spectroscopy in organic semiconductors”, OFET 2012: an International Symposium on Fundamental Electronic Processes in Organic Semiconductors and Functional Interfaces, October 30, 2012, Princeton Doubletree (米国). (Invited)
- 3) H. Ito, “Photocurrent of Polymer/fullerene Composites in Surface-Type Photocells”, BIT’s 2nd Annual World Congress of Nanoscience and Nanotechnology, October 26-28, 2012, Qingdao, China. (Invited)
- 4) H. Tanaka, “ESR Observations of Charge Carrier Dynamics in Thienothiophene-Based High-Mobility Transistors”, 8th Asia-Pacific EPR/ESR Symposium (APES2012), October 11-15, 2012, Beijing (China). (Invited)
- 5) H. Ito, “Variable-Range Hopping Transport in Ion Gel-Gated Electrochemical Transistors of Regioregular Conjugated Polymers”, IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), September 23-28, 2012, 横浜 (神奈川県)
- 6) K. Marumoto, “Microscopic Characterization of Printable Low Voltage Electrolyte Gated Transistors by Electron Spin Resonance”, The 2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE2012), September 6, 2012. 東京大学 (東京都) (Invited)
- 7) H. Tanaka, “ESR Observation of Low-Temperature Carrier Dynamics in High-Mobility Organic Transistors of a Thienothiophene-Based Small Molecule C₈-BTBT”, The 2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE2012), September 6, 2012. 東京大学 (東京都) (Invited)
- 8) S. Kuroda, “ESR Studies of Charge-Carrier g-values and Interfacial Molecular Orientation in High-Mobility Organic Transistors”, The Second International Symposium on Electron Spin Science (ISESS), July 24, 2012, 仙台 (宮城県)

[学会発表] (計 86 件)

- 1) 黒田新一, 「高移動度有機トランジスタ

- 9) S. Kuroda, “Direct Observation of Charge Carrier Concentration in Operating Organic Transistors by Electron Spin Resonance”, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2012), July 11, 2012, アトランタ (米国)
- 10) Y. Shimoi, “Theoretical ESR g Values in Rubrene and Oligoacenes: Implication to Molecular Orientation at Interfaces in Organic FETs”, KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF 2011), September 15-18, 2011, Hotel Hyundai (韓国・慶州)
- 11) Y. Shimoi, “Theoretical Aspects of Structural and Electronic Properties in Organic Thin-Film Device Materials”, 5th International Conference on Thin Films (ICTF-15), November 10, 2011, 京都テルサ (京都府) (Invited)
- 12) S. Kuroda, “Direct Determination of the In-Plane Chain Orientation in Charge Accumulation Layer of Regioregular Poly(3-hexylthiophene) Monolayer Transistors by ESR”, 7th Asia-Pacific EPR/ESR Symposium (APES2010), October 12, 2010, (济州島、韓国) (Invited)
- 13) S. Kuroda, “ESR Spectroscopy of Field-Induced Charge Carriers in Organic Transistors”, 13th International Conference on Organized Molecular Films (LB13), July 21, 2010, Quebec, Canada
- 14) S. Kuroda, “ESR Observations of Charge Carriers in Regioregular Poly(3-hexylthiophen) Field-Effect Transistors”, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2010), July 6, 2010, 京都国際会議場 (京都)
- 15) S. Watanabe, “ESR Observations of Field-Induced Polarons on Ultrathin-Film Transistors of Poly(3-hexylthiophene) with In-Plane Preferential Chain Orientations”, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2010), July 6, 2010, 京都国際会議場 (京都)
(Synthetic Metals Young Scientist Award 受賞)

その他 国際会議 22 件、国内会議 49 件

[図書] (計 1 件)

1) S. Kuroda and K. Marumoto, “Electron Spin Resonance of Organic Devices”, in Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology (second edition), ed. H. S. Nalwa (American Scientific Publishers, California, 2011) Vol. 13, 481-496.

[その他]

受賞

1) 田中久暁、平成 23 年度電子スピンスイエンズ学会 (SEST) 奨励賞 (電子スピン共鳴法による擬一次元金属錯体および導電性高分子における素励起の研究)

ホームページ等

<http://www.nuap.nagoya-u.ac.jp/~kurodalab/ESRdevice/ESRdevice-index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 新一 (KURODA SHIN-ICHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20291403

(2) 研究分担者

伊東 裕 (ITO HIROSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10260374

田中 久暁 (TANAKA HISAAKI)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50362273

丸本一弘 (MARUMOTO KAZUHIRO)
筑波大学・大学院数理物質科学科・准教授
研究者番号：50293668

下位幸弘 (SHIMOI YUKIHIRO)
産業技術総合研究所・ナノシステム研究部門・上級主任研究員
研究者番号：70357226

(3) 連携研究者 なし