

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20350102

研究課題名（和文） 導電性ナノファイバー分岐回路網の構築と電気特性

研究課題名（英文） Electric properties of circuit network made from branched conducting polymer nanofiber

研究代表者

下村 武史 (SHIMOMURA TAKESHI)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40292768

研究成果の概要（和文）：微細電極を用いて孤立ナノファイバー1本レベルの電界効果トランジスタ（FET）を作製し、ナノファイバー内のキャリア移動度が $5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ とフィルムと比して高いこと、またナノファイバーの結晶性と大きな関係があることを見いだした。分岐ユニットを用いて、ポリチオフェンナノファイバーの分岐回路網を実現し、そのトポロジカル次元と電気伝導次元との関係を明らかにした。分岐ユニットに金コロイドを用いた分岐回路網の形成を行い、ファイバー間ホッピングが抑制され、分岐部が有効に機能したことを示したが、分岐ユニットの電子状態を回路網の特性に生かすには至らず、今後の検討課題である。

研究成果の概要（英文）： The field-effect transistor using the isolated nanofiber on fine electrodes was developed, and the carrier mobility of the nanofiber was investigated. The mobility was higher value, $5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, than that of a film state, and had strong relation with the crystallinity of the nanofiber. Furthermore, the circuit network of the polythiophene nanofiber was established using branched center units and we clarified the relation between the topological dimension of structures and dimension of the carrier transport in the nanofiber network. In addition, the circuit network of the polythiophene nanofiber using Au colloids as branched center units was fabricated, but the properties of electronic state of Au colloids was not be observed sufficiently in the electric properties of circuit network and this issue was remained to the future work.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学 ・ 高分子・繊維材料

キーワード：導電性高分子、ナノファイバー、トポロジー、FET、回路網

1. 研究開始当初の背景

導電性高分子のバルク状態における電気伝導にはアモルファス領域のホッピング伝導が寄与するため、導電性高分子が本来もつ電気伝導を観測できないとの観点から、析出

法により自己組織的に形成した導電性ナノファイバーを用いることを考えた。これは太さ10nm以下、長さ1μm以上の導電性高分子の針状結晶である (K. J. Ihn et al., *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* **31**, 735

(1993)。単結晶様の構造を有することから、アモルファス領域の寄与のない低次元系に特有の電気伝導の観測が期待できる。申請者らはこれまでに作製条件によりファイバーの太さを制御できること、高い結晶化度を有し、剛直な構造を有することを明らかにした (S. Samitsu et al., *Thin Solid Films.*, **516**, 2478 (2008))。

さらに、ファイバー形成時の結晶化過程で、導電性高分子と同じ組成のオリゴマーを腕にもつ分岐ユニットを微量混ぜることで、分岐構造が導入され、回路網が構築できることを見いだした。分岐間距離がキャリアの平均自由行程以下となれば、分岐密度や温度を変えた際の電気伝導に分岐トポロジー効果の発現が期待できる。

現在、機能を有する最小単位である分子を組織化・集積化した分子素子実現にとって、機能素子・配線をいかに接続して回路網を構築するかが未解決の問題であり、国内外において実施例はもとよりその有効な処方箋すらほとんど提示されていない。本研究はこの問題に取り組むものである。

2. 研究の目的

本研究の研究期間内の目標を以下に設定した。

- ・導電性高分子としてポリアルキルチオフェン、分岐ユニットとして三本のオリゴアルキルチオフェンの腕をもつベンゼンを用い、三つ又分岐の回路網の構築を行う。導電性高分子と分岐ユニットの濃度比、結晶化時の降温条件の検討を行い、狙った割合で分岐をもつ導電性ナノファイバー回路網作製の条件検討を行う。

- ・回路網の電気伝導特性およびトランジスタ (FET) 特性から、キャリア移動度を決定し、その温度依存性からキャリア輸送と分岐トポロジーの関係を明らかにする。また、高い移動度が期待できることから、ナノファイバーの有機 FET 素子としての可能性を探る。さらに、分岐ユニットに機能性を有するものを用いた分岐回路網の構築を目指す。機能性分岐ユニットを用いた回路網の試作を行い、実際に機能するか否かを検討する。

本研究の独創的な点としては、導電性ナノファイバー形成時に分岐ユニットを微量添加するという極めて簡便なプロセスにより、分岐を導入し、回路網を構築する点にある。バルクの結晶であれば1分子の影響が結晶全体の形に及ぶことは希であるが、太さがナノサイズの針状結晶であるために、微量の添加物が結晶に取り込まれた段階で必ず結晶全体の形を大きく変化させる。さらに、添加量を変えることで、導入する分岐密度を制御したり、分岐ユニットの形 (スター状分子の腕の数) を変えることで、回路網のトポロジ

ーを制御したりすることも可能である。ユニットの分岐が立体的であれば、三次元回路網の実現も期待される。

さらに、分岐ユニットの中心分子を変えるだけで、様々な機能を有する回路網が構築できる点にも特徴がある。分岐ユニットによる機能付与の一例として、ジアリールエテン系色素など固体状態で光異性化する分子を用いれば光スイッチ回路網を作製することができる。

測定面において、これまでに培ってきた100nm程度のギャップをもつ微細加工電極をさらに改良し、4端子電極を有し、さらにFET測定のためのバックゲートを有するものを製作することで、局所領域での導電特性やFET特性測定を行うことも特徴である。これにより回路網内の個々の分岐点の特性を精密に調査することができる。一時期、国内外で盛んに製作が試みられた微細加工電極であるが、微小ギャップと平滑性を兼ね備えたものは少ない。これにより接触抵抗の影響のない導電率と、キャリア移動度を求めることができるようになる。

自己組織的に形成可能な導電性ナノファイバーの分岐構造を用いて回路網を作製し、その伝導機構を明らかにすることは、シリコン半導体の急速な技術的進歩に押され、閉塞感が漂う分子エレクトロニクス研究における起爆剤となると考えている。また、高導電性を有する高分子フィルムであることからフレキシブルシート電極などへの応用も期待できる。

3. 研究の方法

(1) 分子回路網の作製・トポロジー制御の条件検討

まず、導電性高分子にナノファイバー作製が容易なポリアルキルチオフェン、分岐ユニットに三本のオリゴチオフェンの腕をもつベンゼンを用いて、三つ又分岐の回路網の構築を行った。ポリアルキルチオフェンは側鎖がブチル (炭素数4) のものからドデシル (炭素数12) のものまで各種市販されている (アルドリッチ社) ためこれを用いた。分岐ユニットも三本のターチオフェン (チオフェン数3: Ph(3T-Dec)₃) を腕にもつベンゼンが市販されている (ティーエーケミカル社) ためこれを用いた。

ポリチオフェンおよび三本のオリゴチオフェンの腕をもつベンゼンを70℃程度の高温で適当な溶媒に溶解させ、その後、徐冷することでポリチオフェンナノファイバー回路網を得た。溶媒にはパラキシレンやアニソールとクロロホルムの混合溶媒を用いた。

(2) 導電性ナノファイバー1本および回路網の電気物性測定

導電性ナノファイバー1本および回路網

の電気伝導特性および電界効果型トランジスタ (FET) 特性を評価するため、AFM リソグラフィを用いて 200 nm の間隔をもった 4 端子微細電極を作製した。FET 測定でバックゲートに用いるため、基板には表面を 250 nm 程度熱酸化したシリコンを用い、電極には 10 nm のプラチナをスパッタ蒸着した。描画は AFM を用いてリソグラフィを行い、新規に購入した反応性イオンエッチング装置を用いて、ドライエッチングした。電極の厚みが薄いためローレートで安定したプラズマの得られる反応性イオンエッチング装置を新規に導入した。

電極上にまず未ドープの導電性ナノファイバーの分散液を滴下し、4 端子測定で接触抵抗の影響のない導電率測定を行った。測定には既存のクライオスタットおよびピコアン・ソースメータを用いた。さらに、背面シリコンをゲート電極として、FET 特性の測定を行った。測定には電気伝導の測定に用いた装置に加え、ゲート電圧印加およびリーク電流検出用に既存のソース・メジャーユニットを用いた。チャージトラップの影響が大きい場合には、オクタメチルトリメトキシシラン (OTS) などのシランカップリング剤で酸化シリコン表面に単分子膜を形成し、この影響を軽減した。ゲート電圧を変えた際に電極を流れる電流から伝達特性を求め、理論式とあわせてキャリア移動度を求めた。

得られたデータは半導体的な特性を示し、その温度依存性はかなり広い範囲にわたり可変長ホッピング (VRH) モデルで説明される。VRH モデルはキャリア輸送の次元に影響を受けることがよく知られており、分岐効果が現れてくるものと期待される。この測定により分岐を導入した導電性ナノファイバー回路網のトポロジカル次元を決定し、分岐数密度との関係から理論的な予想との比較を行った。

(3) ドーピングした導電性ナノファイバー回路網の電気物性測定

導電性高分子は未ドープでは高い導電性を示さない。このため、ヨウ素や塩化鉄といったドーパントを用いてドーピングを行い、導電率測定を行った。ドーピングを施したものは高温域においてはむしろ金属的な伝導を示すという結果も報告されている。経路の選択は量子的な過程を伴うことや、伝導に量子効果が発現することも期待される。また、分岐が VRH モデルのキャリア輸送次元により影響することが期待される。

(4) 機能性回路網の検討

導電性ナノファイバー回路網は分岐ユニットの中心分子の特性を変えるだけで、回路に様々な機能をもたせることができる。その実証を目指して、分岐ユニットに金コロイドを用いた回路網の試作を行った。導電性高分

子と金コロイドのショットキー接合がキャリア移動度に与える影響を調査した。

4. 研究成果

(1) 分子回路網の作製・トポロジー制御の条件検討

分岐ユニットあるいは分子量の大きく異なるものを混合し、析出法により分岐構造を有するナノファイバーを作製し、原子間力顕微鏡 (AFM) による形態観察を行った。ポリヘキシルチオフェン (P3HT) と分岐ユニット Ph(3T-Dec)₃ とを混ぜ合わせてナノファイバーを作製したものの AFM 画像を図 1 に示した。AFM 画像上で分岐していると思われる部分を拡大してみたところ、ナノファイバーが 3 方向に分岐した構造を形成していることが分かった。

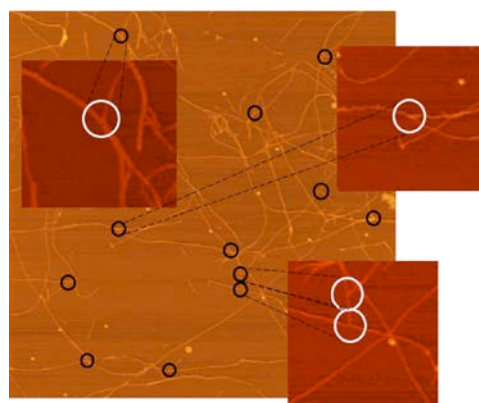


図 1 P3HT と Ph(3T-Dec)₃ からなるナノファイバーの AFM 像 (10×10 μm)

分岐ユニットを添加して作製したナノファイバーと、単一の P3HT から作製したナノファイバーについて分岐数を調査した結果を表 1 に示す。単一の P3HT のみを用いて作製したナノファイバーも分岐している箇所は数ヶ所存在するが、分岐ユニットを添加した場合は、分岐数が大幅に増加していることが分かる。結晶性を有する P3HT ナノファイバー中に似た組成をもつ Ph(3T-Dec)₃ や分子量の異なる P3HT が取り込まれ、3 方向に分岐した構造を形成したと考えられる。すなわち、微量添加した分岐ユニットがナノファイバーを結びつける核の働きをしている。

表 1 分岐ユニットを混合し作製したナノファイバーの分岐数 (画像 30×30 μm 内)

ナノファイバーの種類	分岐数
P3HT (17,500) のみ	7
P3HT + Ph(3T-Dec) ₃	41
P3HT (17,500) +P3HT (87,000)	23

AFM による形態観察によって AFM 画像上で

はT字に分岐していると思われる部分を確認できたが、分岐が電氣的に機能しているかを確認する必要もある。そこで、分岐部分のKFMによる表面電位測定を行った。外部から0.5Vの電圧を電極に印加し、KFM測定を行った。

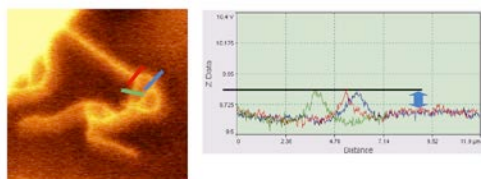


図2 KFMによる分岐点前後の表面電位像と各点のセクションプロット

ナノファイバーは電極と1ヶ所の接点をもっており、分岐が電氣的に機能していれば、分岐前後のナノファイバーはどの点でも電極とほぼ等電位となるはずである。図2に表面電位像と分岐点前後のセクションプロットを示した。分岐前(図2の赤線)と分岐後のナノファイバー(図2の青、緑線)の表面電位は等しいことから、分岐が電氣的にも機能していることが示された。

(2) 導電性ナノファイバー1本および回路網の電気物性測定

① 導電性ナノファイバー1本の測定

まず回路網の検討を行う前に、導電性高分子ナノファイバー1本の導電性およびキャリア輸送特性の評価を行った。貧溶媒であるアニソールと良溶媒であるクロロホルムの混合溶媒を用いてナノファイバーを形成した。混合溶媒比率に関しては、アニソールとクロロホルムの体積比率が10:0、8:2、5:5、3:7(v/v)の4種類のものを作製した。

各ナノファイバーのXRD測定を行い、高角側のピーク幅からシェラーの式を用いて長さ方向のコヒーレント長を算出した結果を表2に示す。良溶媒比率が増加するにつれて、コヒーレント長が長くなる傾向があり、大きい結晶子を有していることがわかった。

表2 各溶媒条件で作製したナノファイバーの長さ方向のコヒーレント長

溶媒条件(アニソール:クロロホルム)	コヒーレント長 / nm
10:0	39.8
8:2	38.3
5:5	48.6
3:7	59.3

シランカップリング剤OTSによって表面修飾した微細電極基板上に、混合溶媒比率10:0~3:7の各ナノファイバーを電極部分に数本

のせ、FET測定を行った。算出した各ナノファイバーの移動度を表3にまとめた。ナノファイバー数本レベルでの移動度は、良溶媒比率が増加するにつれて高くなり、またフィルムよりも高い値を示した。最も高い移動度を示した混合溶媒比率3:7のナノファイバーでは、孤立したナノファイバーの移動度の方が、薄膜に比べ5.6倍ほど高い値を示した。分子間ホッピングが寄与しない孤立したナノファイバーではフィルムと比して高い移動度が得られることがわかった。

表3 ナノファイバーのキャリア移動度(孤立ファイバー数本レベル)

溶媒条件(アニソール:クロロホルム)	移動度 / cm ² /(Vs)	on/off 比
10:0	1.3×10 ⁻²	1.8×10 ³
8:2	2.4×10 ⁻²	2.1×10 ³
5:5	4.0×10 ⁻²	1.7×10 ³
3:7	5.6×10 ⁻²	1.8×10 ³

② 導電性ナノファイバー回路網の測定

分岐箇所が最も多く存在していたP3HT(Mw:87000)とPh(3T-Dec)₃を混合して作製したナノファイバーを用い、回路網の導電特性を調査した。未ドーピング状態の分岐ナノファイバー回路網について、温度を300~100Kまで変化させて温度依存特性評価を行ったところ、いずれも温度が上がると抵抗が下がる半導体的特性を示すことを確認した。これより、分岐構造を有するナノファイバーにおいても1本のナノファイバーと同様に熱活性化伝導が観測されたものと考えられる。それぞれの各温度に対する抵抗を求めてアレニウスプロットを行い、VRHモデルを用いて次元性について解析した。分岐していないナノファイバーでは導電率をT^{-1/2}に対してプロットした場合、よく直線でフィッティングされ、キャリア輸送のトポロジカル次元n=1.3であるのに対して、分岐したナノファイバーも、温度特性はT^{-1/2}に対してよく直線でフィッティングされ、キャリア輸送の次元はn=1.3となり、両者に有意な違いは得られず、キャリア輸送は1次元であった。

(3) ドーピングした導電性ナノファイバー回路網の電気物性測定

高分子鎖から電子を引き抜くアクセプタードーパントとして、FeCl₃を使用した。溶媒としてはアセトニトリル(CH₃CN)を用いてナノファイバーをドーピングし、導電率測定および温度依存特性評価を行った。

ドーピングを施した場合も、分岐していないナノファイバーに関しては次元nが1.3と有意な差は見られなかったのに対して、回路網は2.0に向上し、温度特性もT^{-1/3}に対してよくフィッティングされたため、キャリア輸

送が2次元になったという結果が得られた。

ドーピング前はキャリアの平均自由行程が短く、分岐に出会わないために、その効果がほとんど観測されなかったものが、ドーピング後、キャリアの平均自由行程が伸び、ホッピング伝導の際に分岐点に衝突することで導電経路の選択肢が増え、次元性が向上したものと考えられる。VRHモデルを用いた次元についての解析結果を表4にまとめた。

表4 未分岐ナノファイバーと分岐ナノファイバーのキャリア輸送の次元

ナノファイバー	未ドーピング次元	ドーピング次元
未分岐	1.3	1.3
分岐(回路網)	1.3	2.0

(4) 機能的回路網の検討

P3HT ナノファイバーに分岐構造を発現させる次なる方法として、金コロイドの粒子を混合することを考えた。金表面にチオフェンが吸着するため、ファイバーの直径よりも少し大きめの金コロイド粒子を混合してファイバー作製を行うことで、その界面から結晶成長し、分岐構造が形成されると期待される。そこで、析出法を行う際に金コロイドを混合しナノファイバーを作製した。得られたAFM画像を図3に示す。

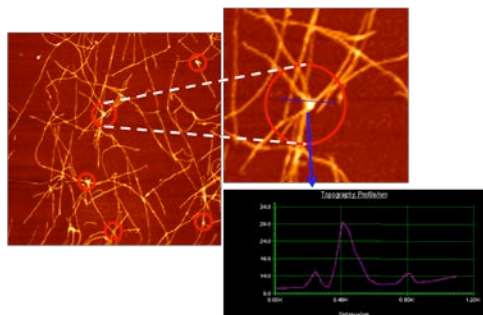


図3 金コロイド混合ナノファイバーのAFM像

金コロイド 20 nm を混合して作製したナノファイバーは、金コロイドを中心として分岐構造が形成された。また、ファイバー作製後に混合したものでは、金コロイドと思われる粒子がファイバー内におらず、単独で確認された。すなわち、結晶化進行後の混合では金コロイドは核として働くことができなかった。このため、金コロイドを核としたエピタキシャルな結晶成長が起こっていることを裏付けるものであると考えられる。

金コロイドを核とする分岐がみられたナノファイバーについて、くし型電極基板に塗

布し I-V 測定を行い、活性化エネルギー ΔE を求めた(表5)。金コロイドを添加したものが活性化エネルギーが低下したことがわかる。添加しないものではファイバー間ホッピングが伝導を律速するが、分岐点の形成によりファイバー間ホッピングの影響が少なくなったと考えられる。

表5 金コロイド添加による活性化エネルギーの変化

金コロイド	活性化エネルギー ΔE /eV
なし	0.174
添加	0.161

金コロイドを混合して作製したナノファイバーについて、OTS で表面修飾を行ったくし型電極基板に塗布し FET 測定を行った。金コロイドを混合していないときと同様、負のゲート電圧で増幅効果が確認された。コロイドの混合により移動度の上昇が確認された。この結果を表6に示す。

金コロイドの混合によってナノファイバーが分岐しネットワーク化したため、ファイバー間ホッピングの影響が小さくなったと考えられる。金コロイドとナノファイバーの間にはショットキー接続があるはずなので、その寄与を移動度にみるために、分岐点個数やコロイドのサイズなどを変更したが、ショットキー効果に起因する成分を十分な精度で確認するには至らなかった。分岐ユニットの電子状態を回路網の特性に生かすことはできなかったため、今後の検討課題である。

表6 金コロイドを混合したナノファイバーのFET特性

コロイド	移動度 /cm ² (Vs)	閾値電圧 /V	on/off 比
なし	2.9×10^{-3}	5.6	6×10^3
添加	4.1×10^{-3}	1.5	4×10^3

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7件)

- ① T. Shimomura, T. Takahashi, Y. Ichimura, S. Nakagawa, K. Noguchi, S. Heike and T. Hashizume, Relationship between structural coherence and intrinsic carrier transport in an isolated poly(3-hexylthiophene) nanofiber, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 83 (No. 11), 2011, pp.115314-1-10
- ② S. Samitsu, T. Shimomura, S. Heike, T. Hashizume and K. Ito, Field-Effect Carrier Transport in Poly(3-alkylthiophene) Nanofiber

Networks and Isolated Nanofibers, *Macromolecules*, 査読有, Vol. 43, No. 19, 2010, pp. 7891-7894,

- ③ 下村武史、導電性高分子ナノファイバーのトポロジー制御と電子性キャリアの輸送特性、機能材料、査読無、Vol. 30, No. 7、2010、pp. 44-49
- ④ K. Minoura, Y. Akama, J. Morita, T. Yasuda T. Kato and T. Shimomura, Supramolecular structure of columnar liquid crystalline pi-conjugated oligothiophenes with highly polarized photoluminescence properties, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 105, No. 111, 2009, 113513-1-6
- ⑤ H. Ichihara, T. Shimomura and K. Ito, Conductivity Measurement of Single Nanowire Obtained by Dehydrofluorination of Nanofibrils of PVdF, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 48, No. 3, 2009, 030213-1-2
- ⑥ K. Yoshida, Y. Masuda, Y. Sakai and T. Shimomura, Adsorption Behavior of Coumarin onto a Concaved Substrate in Water under an Electric Field, *J. Electrochem. Soc.*, 査読有, Vol. 156, No. 1, 2009, D1-D4
- ⑦ S. Samitsu, T. Shimomura, S. Heike, T. Hashizume and K. Ito, Effective Production of Poly (3-alkylthiophene) Nanofibers by means of Whisker Method using Anisole Solvent: Structural, Optical, and Electrical Properties, *Macromolecules*, 査読有, Vol. 41, No. 21, 2008, 8000-8010

[学会発表] (計 3 2 件)

- ① 下村武史、導電性ナノファイバー、日本化学会技術開発フォーラム (化学会館)、2010/11/18
- ② 関佑樹、下村武史、導電性高分子ナノファイバーの分岐構造制御と導電特性、第 71 回応用物理学会学術講演会 (長崎大学)、2010/09/15
- ③ 三木健生、下村武史、電極/絶縁膜修飾した導電性高分子ナノファイバー-FET におけるキャリア輸送特性、第 71 回応用物理学会学術講演会 (長崎大学)、2010/09/14
- ④ 下村武史、導電性高分子ナノファイバーでつくる分子エレクトロニクス、日本化学会関東支部大会 (筑波大)、2010/08/31
- ⑤ 関佑樹、下村武史、導電性高分子ナノファイバーの分岐構造制御と導電特性、繊維学会 2010 年次大会 (タワーホール船堀) 2010/06/17
- ⑥ 関佑樹、下村武史、導電性高分子ナノフ

ファイバーの分岐構造と導電特性、第 59 回高分子学会年次大会 (パシフィコ横浜)、2010/05/26

- ⑦ 下村武史、高橋智之、平家誠嗣、橋詰富博、ポリチオフェンナノファイバー 1 本レベルでの FET 特性、第 57 回応用物理学関連連合講演会 (東海大)、2010/03/17
- ⑧ 下村武史、高分子の実空間観測と顕微鏡の新たな使い方、高分子アドバンス講座 (東工大)、2009/12/12
- ⑨ 関佑樹、下村武史、分岐制御された導電性高分子ナノファイバーの導電特性、第 58 回高分子討論会 (熊本大)、2009/09/17
- ⑩ 高橋智之、三木健生、渡邊千穂、下村武史、ポリチオフェンナノファイバーの移動度に関し電極材料が与える効果、第 58 回高分子討論会 (熊本大)、2009/09/17
- ⑪ 高橋智之、下村武史、平家誠嗣、橋詰富博、ポリチオフェンナノファイバーの移動度に関し電極材料が与える効果、第 70 回応用物理学会学術講演会 (富山大)、2009/09/10
- ⑫ 高橋智之、市村泰孝、下村武史、ポリチオフェンナノファイバー 1 本レベルの FET 特性、繊維学会 2009 年次大会 (タワーホール船堀)、2009/06/10
- ⑬ 高橋智之、市村泰孝、下村武史、ポリチオフェンナノファイバー 1 本レベルの FET 特性、第 56 回応用物理学関係連合講演会 (筑波大)、2009/04/01
- ⑭ 下村武史、分子配線材料としての導電性高分子、ポリマーフロンティア 21 (東工大)、2008/09/05
- ⑮ Takeshi Shimomura, Conducting properties of conducting polymer nanowhiskers, International symposium on Non-Equilibrium Soft Matter (Kyoto Univ.), 2008/06/03
- ⑯ 市村泰孝、下村武史、ポリチオフェンナノファイバー 1 本レベルの電気物性、第 57 回高分子学会年次大会 (パシフィコ横浜)、2008/05/29

[その他]

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/%7Esimo/Publications/v2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下村 武史 (SHIMOMURA TAKESHI)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：40292768