

機関番号：24403
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009 ～ 2010
 課題番号：21710140
 研究課題名（和文） ナノスケール有機トランジスタの分子機能による特性制御と電気伝導機構解明
 研究課題名（英文） Control of characteristics of nano-scale organic transistors by molecular functionality and the investigation of their electrical conduction mechanism
 研究代表者
 永瀬 隆 (NAGASE TAKASHI)
 大阪府立大学・工学研究科・助教
 研究者番号：00399536

研究成果の概要（和文）：本研究では、有機材料の機能性を利用した特性制御により、明確な動作を示すナノスケール有機トランジスタを実現することを目的とした。ナノスケール有機トランジスタの電気特性は有機半導体の電子状態に強く依存し、電極/半導体界面を制御することで短チャンネル効果の低減が可能であることを明らかにした。また、有機トランジスタの動作機構を調べるため、温度依存性及び周波数依存性の測定、接触抵抗の数値シミュレーションを行った。

研究成果の概要（英文）：We have studied the control of the characteristics of nano-scale organic transistors using the functionalities of organic materials to realize clear device operation in nano-scale organic transistors. It is found that the electrical characteristics of nano-scale organic transistors depend largely on the electronic states of organic semiconductors and short-channel effects can be reduced by controlling electrode/semiconductor interfaces. We have also performed the temperature and frequency dependence measurements and the numerical simulations of contact resistance to investigate the operation mechanism of organic transistors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：有機エレクトロニクス、分子デバイス

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：有機トランジスタ、ナノギャップ電極、短チャンネル効果、自己組織化単分子膜、キャリア輸送機構、有機半導体電極界面

1. 研究開始当初の背景

有機電界効果トランジスタ(有機 FET)は、フレキシブルかつ軽量の薄膜トランジスタを低コスト、低温プロセスで作製できるという利点から、フラットパネルディスプレイ、

RF-ID タグ、センサー等への応用が期待されている。有機 FET では、既にアモルファスシリコンを超える移動度が達成されており、フレキシブル有機 EL ディスプレイが試作されている。しかしながら、その実用化には、よ

り高い精細度が必要であり、また、RF-ID タグやドライバーIC 等の高速素子への応用には、有機 FET 素子のチャンネル長の縮小化が求められている (FET 素子の出力電流や動作周波数は移動度やチャンネル長に大きく依存する)。また、有機 FET では、一般に微結晶性の有機半導体薄膜が用いられるため、チャンネル長の縮小化により移動度そのものが向上する可能性がある。従って、ナノチャンネル化によって大幅な特性向上が期待できる。しかしながら、ナノチャンネル有機 FET では、一般に空間電荷制限電流 (SCLC) が支配的になることでオフ電流が高くなり、また、ゲート制御が行えなくなるという問題 (短チャンネル効果) が生じることが知られている。

2. 研究の目的

本研究では、有機材料の多様な機能性を利用することで、ナノチャンネル有機 FET の短チャンネル効果を抑制し、それらの電気伝導機構を明らかにし、明確な動作を示すナノスケール有機 FET を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

有機 FET では、化学設計により半導体層の電子状態や構造を容易に変えることができるという無機 FET には無い長を有する。また、半導体と絶縁膜との界面や電極界面を自己組織化単分子膜 (SAM) を用いてナノレベルで化学修飾することで、電気特性を大きく変えることが可能である。これらの有機材料の機能性を利用することで、ナノチャンネル有機 FET の特性制御を検討した。

また、ナノチャンネル有機 FET の動作機構を明らかにするため、温度依存性及び周波数特性の測定及び半導体-電極界面を考慮した数値シミュレーションを行った。

4. 研究成果

有機 FET のチャンネル縮小化による影響を明らかにするため、各種の有機半導体を用いて、チャンネル長 5 μm から 30 nm を有する有機 FET を作製し、そのトランジスタ特性を系統的に評価した。デバイス構造には、図 1(a) に示す様な SiO_2 ゲート絶縁膜 (200 nm 及び 50 nm) を有するボトムゲート・ボトムコンタクト構造を用い、有機半導体には、図 1(b) に示す高分子半導体 (P3HT, pBTTT, F8T2) を用いた。また、ナノスケール有機 FET の作製においては、図 1(c) のナノギャップ電極を用いた。

図 2 に各有機半導体を用いた有機 FET のチャンネル長に対する出力特性の変化を示す。有機 FET の出力特性は有機半導体の種類やチャンネル長により大きく変化していることが分かる。有機半導体として P3HT を用いた場合には、チャンネル長の縮小に伴って、電流電圧

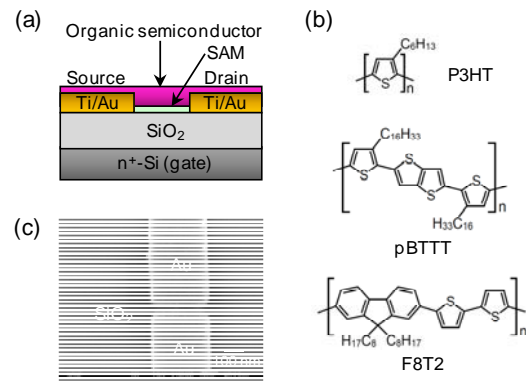


図 1: (a) ナノチャンネル有機 FET のデバイス構造. (b) 高分子半導体. (c) ナノギャップ電極.

特性の非線形性が増加し、ゲート電圧による電流変化が減少する短チャンネル効果が顕著に現れていることが分かる。一方、pBTTT FET では、電流電圧特性の非線形性が減少し、F8T2 FET では、チャンネル長を縮小した場合でも明確な飽和特性を有する FET 特性を示すことが分かった。このような振る舞いは、Au 電極と各有機半導体に形成される電位障壁の違いで説明できる。即ち、P3HT では比較的低いイオン化ポテンシャル (4.9 eV) を有することで、電極界面でオーム性接触が形成され、SCLC に支配されることで、短チャンネル効果が顕著になるが、より高いイオン化ポテンシャルを有する pBTTT (5.1 eV) や F8T2 (5.5 eV) では、ショットキー障壁が形成されることで SCLC が減少し、また、チャンネル領域での電界強度が減少し、ゲート電界の影響が相対的に

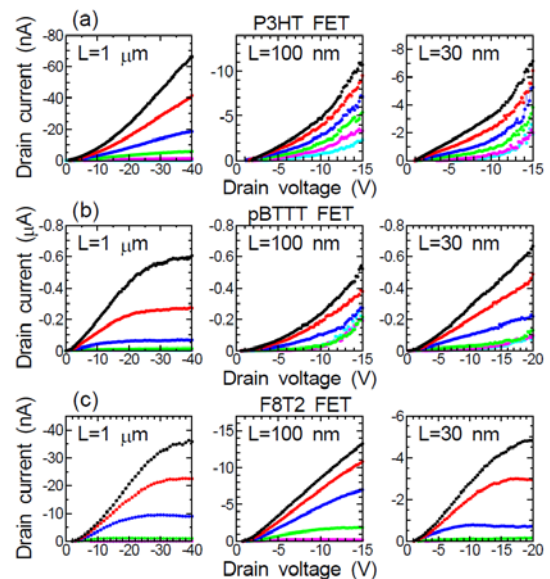


図 2: (a) P3HT, (b) pBTTT 及び (c) F8T2 を用いた有機 FET の出力特性のチャンネル長依存性.

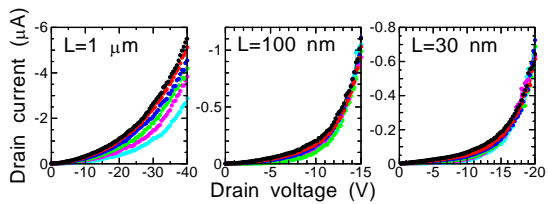


図 3: 電極を SAM 処理した pBTTT FET の出力特性のチャンネル長依存性。

強くなることで短チャンネル効果が低減されたものと考えられる。これを検証するため、pBTTT FET において、電極/半導体間に SAM 処理を施すことでショットキー障壁を減少させたところ、大きな非線形性を有する出力特性に変化することが分かった (図 3)。

図 4 に膜厚 50 nm の SiO_2 ゲート絶縁膜を用いた場合のチャンネル長 30 nm の pBTTT FET の電気特性を示す。30 nm のチャンネル長においても 10^3 を超えるオンオフ比、 $0.014 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の高移動度が得られ、有機半導体/電極界面を制御することで、ナノチャンネル有機 FET においても明確なトランジスタ特性を得ることが可能であることが分かった。

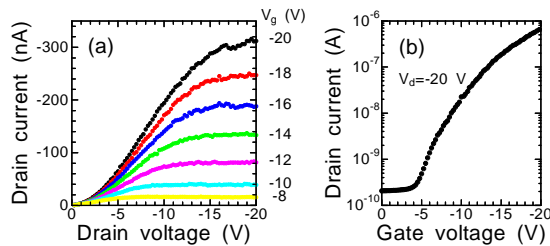


図 4: 30 nm のチャンネル長を有する pBTTT FET の (a) 出力特性及び (b) 伝達特性。 SiO_2 膜厚は 50 nm。

有機 FET の動作機構に関する知見を得るため、温度依存性及び周波数特性の評価を行った。図 5 に P3HT FET 及び pBTTT FET において得られた電界効果移動度のアレニウスプロットを示す。移動度は室温近傍では熱活性型の温度依存性を示し、低温領域では殆ど温度に依存しなくなることが分かった。これらの結果は、有機 FET のキャリア輸送が有機半導体の有する裾準位を介するホッピング伝導により行われていることを強く示唆している。一方、ナノチャンネル有機 FET では、より強い温度依存性が現れることが分かった。これは、ナノスケール化により実効的なゲート電界が弱まることで、キャリア捕獲の影響が大きく現れたためであると考えられる。

周波数特性評価においては、ゲート電極と

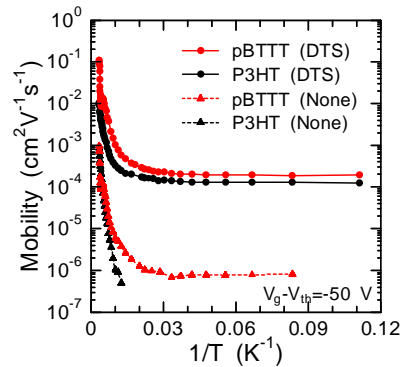


図 5: P3HT FET 及び pBTTT FET の電界効果移動度の温度依存性。

ソースドレイン電極の間に存在する寄生容量をセルフライン法を用いた作製により低減させることで、蓄積キャリアによる生じる静電容量をインピーダンス分光法により測定した。図 6 に pBTTT FET 素子の静電容量の周波数依存性を示す。図より、ゲート電圧を負側に増加させることで静電容量が増加し、また、高周波を増加させることで徐々に静電容量が減少していく様子が分かる。これは、電極から注入されたホールによるチャンネル形成過程を反映しており、静電容量の増加はチャンネル領域へのホール蓄積に起因する。高周波領域では周波数にキャリア移動が追従できなくなることで、チャンネル領域に均一にホール蓄積が行われなくなり、静電容量が減少することとなる。従って、寄生容量に依存しない動作周波数の評価が可能である。以上の結果より、有機 FET のチャンネル形成過程や周波数特性に関する知見が得られることが分かった。

また、有機 FET の電気特性における接触抵抗の影響を明らかにするため、トップコンタクト構造及びボトムコンタクト構造での数値シミュレーションを行った。トップコンタクト型有機 FET の接触抵抗は有機半導体の局

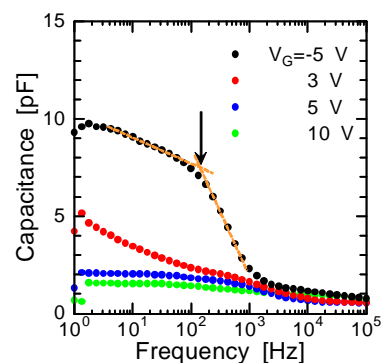


図 6: セルフライン法により作製した pBTTT FET の静電容量の周波数依存性。

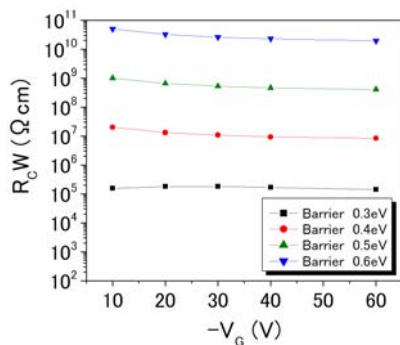


図 7: 電極/半導体界面の電位障壁を変化させた場合に数値計算したボトムコンタクト型有機 FET の接触抵抗のゲート電圧依存性。

在準位密度が増加するほど増加し、バルク領域でのキャリアトラッピングが接触抵抗に大きく関与することが分かった。一方、ボトムコンタクト型有機 FET では、接触抵抗は局在準位密度に殆ど影響を受けずに、電極/半導体界面の電位障壁の高さに強く依存することが分かった (図 7)。ボトムコンタクト型有機 FET では、電極/有機半導体界面がデバイス特性を大きく左右することが分かった。

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 4 件)

- (1) T. Nagase, H. Hatta, Y. Miyagawa, T. Kobayashi, S. Murakami, M. Watanabe, K. Matsukawa, and H. Naito, “Frequency characteristics of solution-processed organic field-effect transistors with self-aligned electrodes”, Proceedings of the 17th International Display Workshops, pp. 739-742 (2010). 査読無
- (2) T. Hirose, T. Nagase, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, “Device characteristics of short-channel polymer field-effect transistors”, Applied Physics Letters **97**, 083301 (2010). 査読有
- (3) S. Wakuta, H. Hatta, M. Yoshikawa, T. Nagase, T. Kobayashi, M. Ikeda, K. Takimiya, and H. Naito, “High-mobility organic field-effect transistors based on soluble small molecules dispersed polymers”, Proceedings of the 31st International Congress on Imaging Science, pp. 699-702 (2010). 査読無
- (4) T. Nagase, T. Hirose, S. Nishigami, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, “Device characteristics of nanoscale

organic field-effect transistors”, Proceedings of the 16th International Display Workshops, pp. 1785-1788 (2009). 査読無

[学会発表] (計 26 件)

- (1) T. Terui, T. Nagase, S. Tanaka, R. Ueda, Y. Quan-Lin, H. Yoshikawa, and K. Awaga, “Development of submicron gap electrodes fabrication and electric transport property of magnetic hollow sphere”, 9th International Conference on Nano-Molecular Electronics, 2010 年 12 月 14 日, 神戸
- (2) T. Nagase, H. Hatta, Y. Miyagawa, T. Kobayashi, S. Murakami, M. Watanabe, K. Matsukawa, and H. Naito, “Frequency characteristics of solution-processed organic field-effect transistors with self-aligned electrodes”, The 17th International Display Workshops, 2010 年 12 月 2 日, 福岡
- (3) 高木謙一郎, 八田英之, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 渡辺 充, 松川公洋, 内藤裕義, “セルフアライン法による塗布型有機電界効果トランジスタの作製と周波数特性評価”, 平成 22 年電気関係学会関西支部連合大会, 2010 年 11 月 13 日, 滋賀
- (4) H. Hatta, Y. Miyagawa, T. Nagase, T. Kobayashi, S. Murakami, M. Watanabe, K. Matsukawa, and H. Naito, “Frequency response of solution-processed organic field-effect transistors with self-aligned electrode configurations”, Plastic Electronics Conference & Exhibition 2010, 2010 年 10 月 20 日, ドイツ
- (5) T. Nagase, T. Hirose, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, “Electrical characteristics of short-channel organic field-effect transistors based on solution-processable organic semiconductors”, Plastic Electronics Conference & Exhibition 2010, 2010 年 10 月 20 日, ドイツ
- (6) S. Nishigami, T. Nagase, T. Kobayashi, and H. Naito, “Numerical simulation of contact resistance in organic field-effect transistors”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010 年 9 月 23 日, 東京
- (7) H. Hatta, Y. Miyagawa, T. Nagase, T. Kobayashi, S. Murakami, M. Watanabe, K. Matsukawa, and H. Naito, “Frequency response of polymer field-effect transistors fabricated by a self-aligned method”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010 年 9 月 23 日, 東京

- (8) M. Yoshikawa, T. Banno, T. Nagase, T. Kobayashi, S. Murakami, and H. Naito, "Temperature dependence of charge transport in polythiophene-based field-effect transistors", 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010年9月23日, 東京
- (9) 八田英之, 宮川雄飛, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 渡辺 充, 松川公洋, 内藤裕義, "セルフアライン法により作製した塗布型有機トランジスタのインピーダンス分光", 第71回応用物理学学会学術講演会, 2010年9月14日, 長崎
- (10) 西上修平, 永瀬 隆, 小林隆史, 内藤裕義, "有機電界効果トランジスタの接触抵抗解析", 第71回応用物理学学会学術講演会, 2010年9月16日, 長崎
- (11) 吉川真史, 伴野拓也, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 内藤裕義, "有機電界効果トランジスタにおけるキャリア輸送の温度依存性評価", 第105回日本画像学会年次大会, 2010年6月9日, 東京
- (12) 八田英之, 宮川雄飛, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 内藤裕義, "セルフアライン法を用いて作製した塗布型有機トランジスタの特性評価", 第105回日本画像学会年次大会, 2010年6月9日, 東京
- (13) S. Wakuta, H. Hatta, M. Yoshikawa, T. Nagase, T. Kobayashi, M. Ikeda, K. Takimiya, and H. Naito, "High-mobility organic field-effect transistors based on soluble small molecules dispersed polymers", "The 31st International Congress on Imaging Science, 2010年5月12日, 中国
- (14) 永瀬 隆, 伴野拓也, 八田英之, 小林隆史, 村上修一, 内藤裕義, "低温領域における有機トランジスタのキャリア輸送特性", 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月19日, 神奈川
- (15) 西上修平, 永瀬 隆, 小林隆史, 内藤裕義, "デバイスシミュレーションによる有機トランジスタの接触抵抗に関する考察", 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月19日, 神奈川
- (16) T. Nagase, T. Hirose, S. Nishigami, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, "Device characteristics of nanoscale organic field-effect transistors", The 16th International Display Workshops, 2009年12月11日, 宮崎
- (17) 八田英之, 伴野拓也, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 内藤裕義, "低温領域における有機半導体のキャリア輸送特性", 平成21年度電気関係学会関西支部連合大会, 2009年11月8日, 大阪
- (18) 和久田翔悟, 永瀬 隆, 小林隆史, 瀧宮和男, 池田征明, 内藤裕義, "可溶性低分子C8-BTBTポリマー分散膜を用いた塗布型有機トランジスタの作製と評価", 平成21年度電気関係学会関西支部連合大会, 2009年11月8日, 大阪
- (19) 西上修平, 永瀬 隆, 小林隆史, 内藤裕義, "有機電界効果トランジスタの接触抵抗に関する考察", 平成21年度電気関係学会関西支部連合大会, 2009年11月8日, 大阪
- (20) T. Hirose, T. Nagase, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, "Device characteristics of short-channel organic field-effect transistors", 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2009年10月8日, 宮城
- (21) 伴野拓也, 八田英之, 西上修平, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 内藤裕義, "FET構造による有機半導体薄膜のキャリア輸送の温度依存性", 薄膜材料デバイス研究会第6回研究集会, 2009年11月3日, 京都
- (22) 廣瀬偉志, 永瀬 隆, 西上修平, 小林隆史, 上田里永子, 大友 明, 内藤裕義, "分子機能によるナノチャンネル有機トランジスタの特性制御", 薄膜材料デバイス研究会第6回研究集会, 2009年11月2日, 京都
- (23) 伴野拓也, 八田英之, 西上修平, 永瀬 隆, 小林隆史, 村上修一, 内藤裕義, "FET構造を用いた有機半導体の移動度の温度依存性評価", 第70回応用物理学学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山
- (24) 廣瀬偉志, 永瀬 隆, 西上修平, 小林隆史, 上田里永子, 大友 明, 内藤裕義, "ナノチャンネルポリマー有機トランジスタのデバイス特性制御", 第70回応用物理学学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山
- (25) T. Banno, H. Hatta, S. Nishigami, T. Nagase, T. Kobayashi, and H. Naito, "Low-temperature behavior of charge transport in organic semiconductors studied by field-effect measurements", The 1st Asian Conference on Organic Electronics, 2009年9月3日, 福岡
- (26) T. Hirose, T. Nagase, S. Nishigami, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, "Downscaling of organic field-effect transistors into sub-100 nm regime", The 1st Asian Conference on Organic Electronics, 2009年9月3日, 福岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永瀬 隆 (NAGASE TAKASHI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：00399536