

液晶性半導体を用いた高速動作FET素子

自己組織化性有機半導体開発とその素子化

関東化学（株）との共同研究で開発した新しい液晶性半導体を用いて大阪大学と共同でFET（電界効果トランジスタ）素子を作製した。その動作特性は液晶性半導体素子では最高の $0.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であった。これは有機半導体材料を用いたFET素子では最高速となる。多様な溶媒に対する優れた溶解性とホッピング電荷移動に対する defect-free 性という特徴を持つこの液晶性半導体により、新たな高性能の有機電子素子の開発が期待される。

物部 浩達 ものべ ひろさと (写真右)

monobe-hirosato@aist.go.jp

ナノテクノロジー研究部門 ナノ機能合成グループ 主任研究員 (関西センター)

入所以来一貫して、メソフェーズ状態を活用した円盤状液晶による光電子機能性材料の研究開発に従事している。近年は、高配向秩序液晶の配向制御手法の研究開発に取り組んでいる。1998年東京工業大学生命理工学研究科博士課程修了。同年工業技術院大阪工業技術研究所入所。2001年組織改編により産業技術総合研究所人間系特別研究体、2004年組織改編によりコピキタスエネルギー研究部門、2006年よりナノテクノロジー研究部門所属。

清水 洋 しみず よう (写真左)

yo-shimizu@aist.go.jp

ナノテクノロジー研究部門 ナノ機能合成グループ長 (関西センター)

金属錯体液晶やディスコティック液晶について、化学構造と液晶性の発現、光電導性や半導体特性といった光・電子物性とそれらの配向制御に関する研究に取り組んでいる。1986年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。企業での研究経験を経て1990年、当時の大工試に転職、何回かの組織改編に伴い現在に至る。現在、Liquid Crystals 誌 International Editorial Board、近畿化学協会、高分子学会関西支部等においても活動。



A novel liquid crystal semiconductor (LCS) developed under the collaboration with Kanto Chemicals Co. Ltd. was applied to “top-contact/bottom-gate” type field-effect transistor (FET) to investigate the FET mobility and on/off ratio with Osaka University. The LCS, a long-chain substituted dithienynaphthalene, shows the fast hole mobility of $0.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in the plastic mesophase. Our FET shows the mobility of $0.14 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ at room temperature, which is in the recording class of the LCS-used FET mobility. LCSs characterized both by good solubility into various organic solvents and by “defect-free” property for electronic charge transport are expected to become a novel organic semiconductor for high performance devices.

液晶性半導体

最近の有機エレクトロニクスの進展は、目覚ましいものがある。ポリマー基板上に印刷技術によって回路を作るデバイス作製技術により、大面積でフレキシブルな軽量の電子素子が実現されている。しかもこれは耐衝撃性に優れた低コストな素子で、汎用的に、半ば使い捨て的に使用されるあらたなカテゴリーの電子機器の実現が期待されている。しかし、まだ現状は実用素子として十分な性能ではなく、材料も含めて基本的な研究開発の段階にある。

この分野では、素子としての動作性能に優れかつ生産性に優れた有機エレクトロニクス素子の実現がキーポイントになる。これまでも様々な新しい有機材料や有機薄膜中の粒界制御技術

が開発されており、今も実用化素子の開発への道を探っている。

一方、1990年代半ば、フラットパネルディスプレイ (FPD) を実現した液晶で、アモルファスシリコン並みの高速電荷移動度を示す化合物が見出された。それ以来、液晶性半導体という名とともに、液晶性化合物における電子伝導の機構などの基礎的研究から高効率の有機デバイスへの応用をめざす高移動度化や分子配向の制御に関する研究が進んできた。わが国においても近年、ディスコティック液晶やカラミティック液晶において $10^1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 程度の電荷移動度を持つ新しい材料が報告されており、それらを用いて有機デバイスの研究が始まっている。

液晶性半導体は、ディスコティック

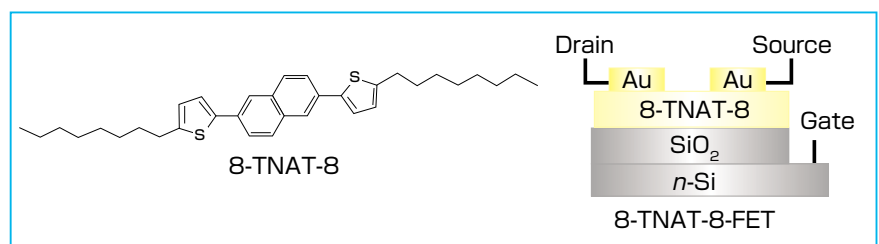


図1 液晶性半導体 8-TNAT-8 の分子構造と FET デバイス構造

液晶やカラミティック液晶の中でも、高い分子配向秩序を持つ。つまり、分子の主骨格である π 電子共役系が互いに向き合う配向をとり、電荷は分子間をホップしながら移動するホッピング機構により移動していると考えられている。この意味では、液晶でなくても結晶性、秩序性のあるソフトマテリアルであれば同様の材料の開発を期待できるという考えもあるが、液晶材料は結晶性材料に比べて分子配向を得たい形に設計することが容易である。また、電荷移動度の高速化のためには液晶における分子配向と分子運動、すなわち凝集系秩序の制御が重要である。

液晶性半導体の利点として、多様な溶媒に溶解することと、電荷移動特性が薄膜中のドメイン粒界にあまり影響されない (defect-free) という特徴があり、材料として信頼性の高い高速電荷移動特性があれば、今後、情報電子分野への新たな応用も期待できる。

液晶性有機FET素子の作製

われわれと関東化学(株)が新しく開発した8-TNAT-8と呼ぶ液晶性半導体材料を用いて、大阪大学と共同でFET素子を作製し、その特性を評価した(図1)。その結果、これまでの典型的な有機半導体材料であるペンタセンに匹敵するFET特性を示すことがわかった。

8-TNAT-8は、飛行時間計測(Time-Of-

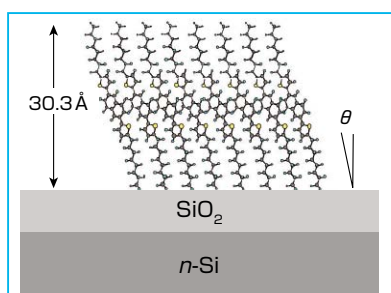


図2 HMDS処理をした SiO_2 膜上に真空蒸着成膜した8-TNAT-8薄膜の分子配向模式図

表 8-TNAT-8とペンタセンのFET特性

用いた材料	正孔移動度 μ ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	On/off 比	閾値電圧 (V)
8-TNAT-8	0.14	1.6×10^3	-27.4
ペンタセン	0.17	3.3×10^4	-10.3

Flight: TOF)法により、室温の結晶相とそれより高温側のメソフェーズにおいて $10^1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ オーダーの電荷移動度を持つp型半導体と確認できた。今回作製したFETの構造は、図1に示すようなボトムゲート・トップコンタクト型である。液晶性半導体8-TNAT-8の薄膜をシリコン基板上に真空蒸着法で成膜し、熱酸化膜表面は、HMDS(ヘキサメチルジシラザン)により処理した。この素子は室温で正孔移動度が $0.14 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、on/off比は1600、閾値電圧は27.4Vを示した(表)。

一方、これまで標準的な有機半導体材料として知られているペンタセンを用いて同様に作製したFET素子は移動度が $0.17 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、on/off比は33000、閾値電圧は10.3Vを示した。このことから、8-TNAT-8を用いたデバイスはon/off比や閾値電圧では劣るものの、高速動作という点ではペンタセンとはほぼ同等の性能をもつことが明らかになった。今回、素子の作製では活性層を蒸着により形成させているが、本来、液晶性半導体の分子構造には長鎖アルキル基など一般的な有機溶媒への可溶性を高める化学構造が含まれており、インクジェットやコンタクトプリント法などの湿式の印刷法への応用が見込める。一方、ペンタセンは、溶媒への溶解性が低いことや、光によ

る酸化反応などの欠点が知られており、有機FETの実用化への大きな妨げになっている。こうしたことから、この材料による結果は液晶性半導体の実用化に大きく貢献するものである。

HMDS処理をした SiO_2 絶縁膜上の厚み100 nmの8-TNAT-8薄膜についてX線回折法で分析したところ、図2に示すように棒状分子が基板に対して傾いて並んでおり、層状構造を形成している。すなわち、ソース・ドレイン電極間においては、棒状分子(の長軸方向)が電極に対してほぼ平行に配向しており、キャリア(正孔)の輸送に有利な分子配向をとっている。このような自己組織化的な性質が、高い電界効果移動度を示す結果につながったものと考えられる。

今後の予定

液晶性有機半導体材料8-TNAT-8は、このように有機半導体デバイスに適用できる優れた材料であるが、今後、絶縁膜表面の修飾、界面における分子配向の制御、粒界制御といった薄膜モルフォロジーなどの検討を通してデバイスとしての性能をいっそう改善し、液晶性材料の特性を活かした有機半導体への開発につなげていきたい。

関連情報:

- 共同研究者: 及川一摩(関東化学株式会社)、横山正明、中山健一(大阪大学)
- 平成18年3月16日産総研プレス発表「液晶性半導体を用いた高速動作FET素子—蒸着・塗布型、自発的配向材料—」
- K. Oikawa, H. Monobe, K. Tsuchiya, J. Takahashi, B. Heinrich, D. Guillon, Y. Shimizu: Chem. Commun., 5337-5339 (2005).