



縦型有機トランジスタの開発と応用展開

工藤 一 浩 ・ 中 村 雅 一

有機材料は柔軟性、軽量といった特徴を有し、低温・低環境負荷かつ大面積デバイス製造に適した塗布・印刷法が適用でき、無機半導体にはない革新的材料系である。本研究報告では、従来の有機薄膜トランジスタの課題を解決できる可能性を秘めている縦型有機トランジスタを中心に、筆者らが進めている最近の研究紹介と期待される応用分野について述べる。

Keywords : organic field-effect transistor, vertical-type transistor, organic semiconductor, flexible device, thin-film transistor

1. ま え が き

有機材料は柔軟性、軽量といった特徴を有し、低温・低環境負荷かつ大面積デバイス製造に適した塗布・印刷法が適用できるという点で無機半導体にはない革新的材料系である。大面積フレキシブルエレクトロニクスにおいて、有機半導体を用いたトランジスタは、それを構成する能動素子の有望な候補である。最近では国内外の研究グループから高いキャリア移動度をもつ有機トランジスタの報告が相次ぎ、Si, 化合物半導体に続く第三の半導体材料として期待されるようになった^{1,2)}。特に、有機発光デバイス (Light Emitting Diode : LED, Electroluminescence : EL) や有機トランジスタの特性向上に伴い、スマートカード、情報タグ、ペーパーディスプレイなどのフレキシブル携帯電子機器への応用が注目されるようになった。

しかしながら、実用的デバイス応用には性能面と寿命・安定性など、早急に解決すべき課題は多い。材料面からは有機合成技術、材料設計の進展が著しい一方で、従来のデバイス構造にとらわれない特徴的な材料、プロセスを生かした素子構造も課題解決には重要となる。身の回りの壁やテーブルなど、至るところの「表面」がまだエレクトロニクスの空白地帯である。筆者らは、“Electronics on Any Surface” をキャッチフレーズに、フレキシブルエレクトロニクスにかかわるさまざまな要素技術や回路素子を生み出していくことで、いずれエレクトロニクスの空白地帯を埋めていけると考えている。

ここでは、これまでの有機薄膜トランジスタの課題を解決できる可能性を秘めている縦型有機トランジスタを中心に、筆者らが進めている最近の研究紹介と期待される応用分野について述べる。

2. 素子構造面から見た有機縦型トランジスタ

有機半導体材料を用いた有機トランジスタの概念はかなり古くからあったものの、電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor : FET) の静特性から有機薄膜物性の評価手法^{3,4)}としての役割が大きかった。実際、最初に求められた有機薄膜の電界効果移動度は当初 $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$ 程度³⁾であったが、最近では $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を超えるようになり¹⁾、ルブレンなどの単結晶では $20\sim 40 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の高い値⁵⁾が得られている。有機半導体材料の多くは蒸着法が使われているが、期待されている塗布法、印刷法においては、高分子系材料が主に検討されている。

しかしながら、低コスト化が期待される印刷プロセスを通常の FET 構造に適用すると、短チャネル化が難しく、有機半導体材料の低キャリア移動度のため、高速・大電流素子の実現が難しいのが現状である。一方、無機半導体デバイスでも多種多様な応用目的に適した素子構造が提案されており、メモリーや論理演算を目指すデバイスと超高速、大電力用トランジスタでは設計思想が大きく異なる。

筆者らはトランジスタのデバイス構造をキャリアの流れる方向が基板に垂直、あるいは薄膜を貫く膜厚方向に流れる素子を縦型トランジスタと定義している。縦型トランジスタの最大の特徴は、短チャネル化により有機トランジスタ動作で課題となっている低電圧化、大電流化、高速化が期待される点にある。さらに、縦型トランジスタ構造のチャネル長はサブミクロンオーダーとなり、ペンタセン蒸着膜の結晶グレインサイズ以下となる。すなわち、結晶粒界がキャリア伝導を制限している場合、グレイン間の粒界を極力少なくすることができる。また、フレキシブルデバイスにおいて、伸縮によってチャネル部の粒界亀裂が問題となる場合、横型に比べて縦型トランジスタのほうが折り曲げに対しても強い構造⁶⁾といえる。

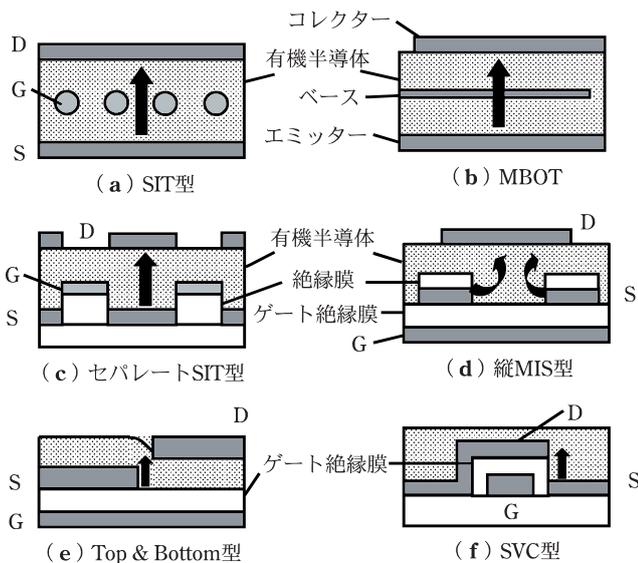


図1 縦型トランジスタの素子構造。

最近では、多くの研究グループから数多くの縦型トランジスタが提案され、良好な特性が報告されるようになった。図1にその代表的縦型トランジスタの素子構造を示す。図1(a), (c)は静電誘導トランジスタ (Static Induction Transistor: SIT)^{6~8)}、図1(b)はパーミアブルベーストランジスタ (Permeable Base Transistor: PBT)^{9,10)}、図1(d)は縦MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) 型FET¹¹⁾と呼ばれる。また、図1(e)に示すトップ&ボトム型や図1(f)のゲート電極段差を利用した素子構造^{12~15)}は上部と下部電極間が実質的チャンネル長になり、短チャンネル化を可能にしたデバイスである。これら縦型構造素子の多くはすでに無機半導体デバイスにおいても提案されていたが、製造プロセスなどの問題点から主流となっていなかった。

横型有機FETと縦型トランジスタである有機SITの素子特性を比較した結果、有機SITは横型有機FETに比べて動作電圧は1/10程度(1~3V)、動作電流は100倍、動作速度は約3けた向上することが実験的に示された^{6,8)}。また、メタルベーストランジスタ (Metal Base Organic Transistor: MBOT)¹⁶⁾ (図1(b))では高いオン電流が得られている。

3. コロイダルリソグラフィによる縦型トランジスタ

有機トランジスタの応用範囲を広げるためには、オン抵抗が小さく負荷駆動能力の高い素子が必要となる。そのような観点から、われわれは縦型並列動作構造の有機SITを、低コストプロセスで作製する方法「自発的高次構造形成法」を検討してきた。その一つが、図2(a)に示すように基板上に付着させたナノ微粒子をシャドーマスクとし、図2(b), (c)のような薄膜形成と微粒子除去によって作製する「コロイダルリソグラフィ法」^{17~19)}である。この方法によ

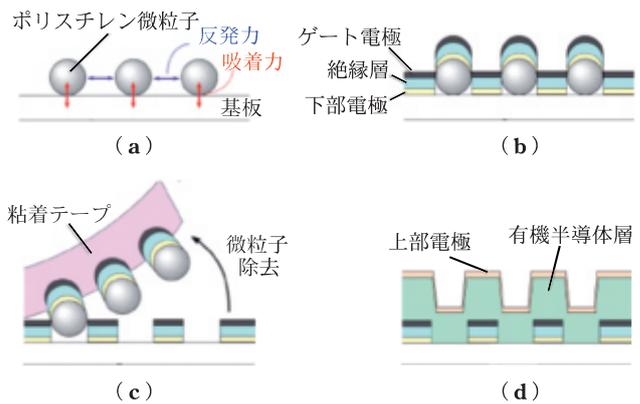


図2 コロイダルリソグラフィ法。

れば、フォトリソグラフィに頼ることなく、LSI (Large Scale Integration) に匹敵する微細構造 (図3) を有するSIT型素子 (図1(a)) を高密度 (現状で5億セル/cm²前後) で大面積素子中に作り込むことができる。これまでに、銅フタロシアニン (CuPc) やペンタセンを活性層に用いて、低電圧動作と高出力電流が得られることや¹⁸⁾、大気に対して性能安定性を有する高いイオン化ポテンシャル材料を用いることで、雰囲気気に左右されずに高い性能 (動作電圧数V, オン電流密度330 mA/cm², 大気中電流オン/オフ比6200) を実現¹⁹⁾した。

4. 段差型電界効果トランジスタ

筆者らは、SIT型の縦型トランジスタ以外にゲート電極の段差を利用して100nm前後のチャンネルをセルフアラインする段差型電界効果トランジスタ (Step-edge Vertical Channel Organic Field-Effect Transistor: SVC-OFET) の研究^{14,15)}も続けてきた。図4に示す素子の特長は、ゲートラインエッジ部に自己整合的に縦方向チャンネル部を形成することにより、短チャンネル化が可能となるばかりではなく、ディスプレイパネルの画素スイッチング・駆動用トランジスタや情報タグ用のアクティブアンテナ素子としての組み込みが容易である点にある。キャリア注入障壁などに改善の余地が残る段階ではあるが、1.5MHzの変調速度が確認¹⁵⁾されている。

5. 有機トランジスタの期待される応用分野

縦型トランジスタは有機薄膜の膜厚方向にキャリアを流

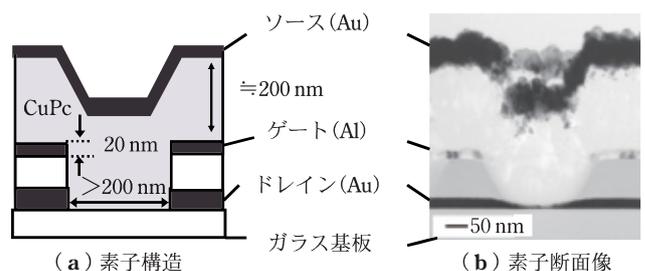
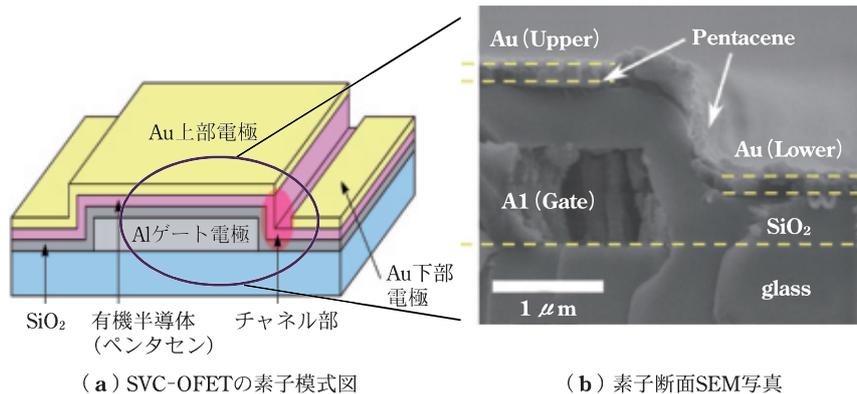


図3 縦型有機トランジスタ (SIT型) 構造と断面写真。



(a) SVC-OFETの素子模式図 (b) 素子断面SEM写真

図4 SVC-OFETの素子構造と素子断面図。

す素子であり、高速、低電圧、大電流動作が可能なることから、有機発光素子と複合化することによって効率的な動作が期待できる。複合型有機発光トランジスタ (Organic Light Emitting Transistor: OLET)²⁰⁾は有機発光素子とほぼ同じ作製プロセスで素子作製が可能、1画素内の開口率向上、1~2 V程度のゲート電圧で輝度変調が可能といった利点がある。一例として、フレキシブル基板上に作製したOLETの発光写真を図5に示す。また、図1(d)に示したMIS型FETとOLEDを組み合わせたMIS型OLETにおいて、フレキシブル基板上でアクティブマトリクス動作を確認¹¹⁾している。

一方、縦型トランジスタは高速動作と配線とのアライメントが容易といった特長を有するため、無線情報タグ (Radio-Frequency Identification Tag: RFID Tag)のアクティブアンテナとしての応用が期待できる。図6に示すようにSVC-OFETを送受信アンテナラインの段差部に作製することにより、アンテナの共振周波数、指向性をSVC-OFETにより変調することが可能である。

6. む す び

縦型有機トランジスタを中心とした有機半導体デバイス応用について述べてきた。今後、有機半導体デバイスを実用的な電子機能と簡易プロセスにて実現できれば、広範囲

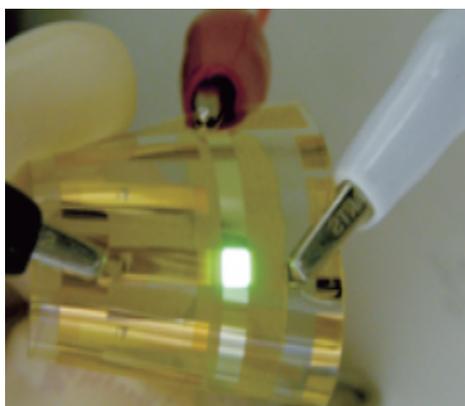


図5 複合型有機発光トランジスタ素子の発光写真。

な応用分野に向けた波及効果が期待できる。しかしながら実用化には、材料物性評価技術、印刷法などの低コストプロセス技術、素子安定性、寿命など、早急に解決すべき課題が残されており、研究開発のよりいっそうの進展が望まれる。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果は多くの学生や共同研究者との実験、議論に基づくものであり、特に渡邊康之氏、中村健二氏、藤本潔氏のご協力に感謝いたします。

文 献

- 1) C. D. Dimitrakopoulos and P. R. L. Malenfant: *Adv. Mater.* **14**, 99 (2002).
- 2) 工藤一浩監修: 有機トランジスタの動作性向上技術, 技術情報協会編 (2003).
- 3) K. Kudo, M. Yamashina and T. Moriizumi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **23**, 130 (1984).
- 4) A. Tsumura, H. Koezuka and T. Ando: *Appl. Phys. Lett.* **49**, 1210 (1996).
- 5) J. Takeya, M. Yamagishi, Y. Tominari, R. Hirahara, Y. Nakazawa, T. Nishikawa, T. Kawase, T. Shimoda and S. Ogawa: *Appl. Phys. Lett.* **90**, 102120 (2007).
- 6) Y. Watanabe and K. Kudo: *Appl. Phys. Lett.* **87**, 223505 (2005).
- 7) J. Nishizawa, T. Terasaki and J. Shibata: *IEEE Trans. Electron. Devices* **ED-22**, 185 (1975).
- 8) K. Kudo, D. X. Wang, M. Iizuka, S. Kuniyoshi and K. Tanaka: *Thin Solid Films* **331**, 51 (1998).
- 9) C. O. Bozler, G. O. Alley, R. A. Murphy, D. C. Flanders and W.

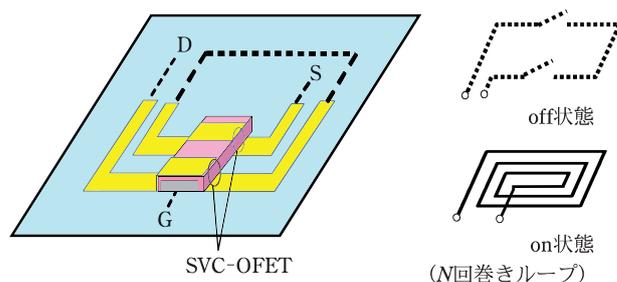


図6 SVC-OFETを用いたRFIDタグ用アクティブアンテナの模式図。

- T. Lindley : *IEEE Tech. Dig. Int. Electron Device Meet., Washington, D.C., 1979*, p. 384.
- 10) Y. Yang and A. J. Heeger : *Nature* **372**, 344 (1994).
- 11) K. Nakamura, T. Hata, A. Yoshizawa, K. Obata, H. Endo and K. Kudo : *Appl. Phys. Lett.* **89**, 103525 (2006).
- 12) H. Naruse, S. Naka, and H. Okada : *Appl. Phys. Express* **1**, 011801 (2008).
- 13) M. Uno, I. Doi, K. Takimiya, and J. Takeya : *Appl. Phys. Lett.* **94**, 103307 (2009).
- 14) T. Takano, H. Yamauchi, M. Iizuka, M. Nakamura and K. Kudo : *Appl. Phys. Express* **2**, 071501 (2009).
- 15) K. Kudo, T. Takano, H. Yamauchi, M. Iizuka, and M. Nakamura : *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 04DK03 (2010).
- 16) K. I. Nakayama, S. Y. Fujimoto, and M. Yokoyama : *Appl. Phys. Lett.* **88**, 153512 (2006).
- 17) Y. Takenouchi, S. Masuda, M. Sakai, K. Kudo and M. Nakamura : *Solid State Devices and Materials 2008, Tsukuba, 2008*, I-9-6.
- 18) K. Fujimoto, T. Hiroi, K. Kudo and M. Nakamura : *Adv.*

Mater. **19**, 525 (2007).

- 19) T. Sawabe, K. Okamura, T. Sueyoshi, T. Miyamoto, K. Kudo, N. Ueno, and M. Nakamura : *Appl. Phys. A* **95**, 225 (2009).
- 20) K. Kudo : *Current Applied Physics* **5**, 337 (2005).

(2010年7月1日 受理)



くどう かずひろ
工藤 一浩

1982年3月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了, 同年4月松下電器産業(株)入社, 87年千葉大学工学部助教授, 98年同教授, 有機半導体薄膜および化合物半導体薄膜の形成と評価に関する研究に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会会員。



なかむら まさかず
中村 雅一

1990年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士前期課程修了, 同年(株)東レリサーチセンター入社, 00年より千葉大学助教授, 博士(工学)。無機および有機薄膜成長, 表面・界面制御, 走査型プローブ顕微鏡による電気物性評価に関する研究に従事。応用物理学会, 表面科学会, 米国材料科学会会員。