

分子を積み上げてデバイスを創る



研究室紹介

中山 健一*

Creating a device by laying molecules

Key Words : organic electronics, organic semiconductor, molecule, device

1. はじめに

今年、日本の電機メーカー各社から大型の「有機ELテレビ」が発売されることになりそうだ。昨年3月に、有機電子材料科学領域としてスタートした当研究室は、このような「有機エレクトロニクス」という分野の研究を行っている。通常は電気を流さないと考えられてきた有機分子を半導体材料として用いて、さまざまな電子デバイスを実現するという、まさに化学と物理の融合分野である。筆者は、現在所属する生命先端工学専攻の前身である物質・生命工学専攻の出身であるが、大学院重点化の折りに化学・物理・生物の融合分野を指向して立ち上がった当専攻の卒業生であることを誇りに思っている。

有機エレクトロニクスという分野は大まかに言っ

て、図1に示す概念で構成されている。まず、本分野の金科玉条として「フレキシブル」と「プリンタブル」があり、それを実現する材料として図2に示すような低分子材料と高分子材料がある。前者は多様な分子デザインが可能で結晶性薄膜の作製に向いており、後者は成膜性が良く塗布プロセスに用いることができる。出口（応用）としては、有機EL、有機トランジスタ、有機太陽電池の三つのターゲットが研究されており、最近、熱電変換への展開も見られる。基本的な原理はシリコンなどの無機半導体に倣いながら、薄く軽く、やわらかい、新しいエレクトロニクス応用を切り拓こうというのが本分野である。

冒頭でも述べたように、有機ELデバイスは携帯

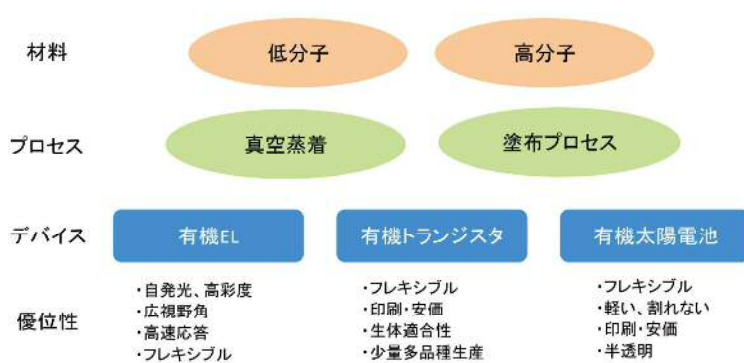


図1 有機エレクトロニクス分野の重要概念

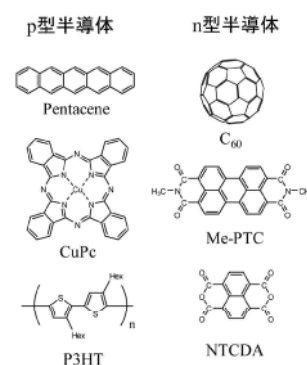


図2 典型的な有機半導体材料



* Ken-ichi NAKAYAMA

1972年9月生
 大阪大学大学院工学研究科 物質・生命工学専攻 (2000年)
 現在、大阪大学 大学院工学研究科生命先端工学専攻 教授 博士(工学)
 有機電子材料、有機半導体デバイス
 TEL : 06-6879-7368
 FAX : 06-6879-7370
 E-mail : nakayama@mls.eng.osaka-u.ac.jp

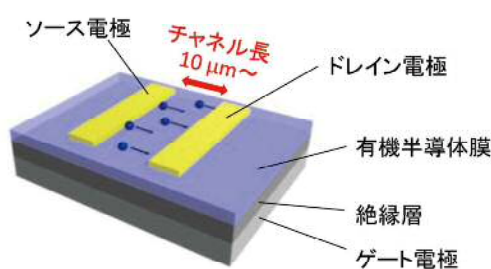
電話やスマートフォンといった小型のディスプレイから実用化が始まり、ついに悲願の大型テレビの商品化まで漕ぎ着けた。現在のような薄膜有機ELの歴史は、1987年のC. W. Tangらの論文[1]からスタートしたが、そこから今年でちょうど三十年である。新しい技術の実用化とはかくも難しい。有機トランジスタや有機太陽電池もそれに続け、と言いたいところだがなかなか簡単にはいかない。ほぼ液晶

との一騎打ちである有機ELに比べて、強力な競合技術が存在するこれらの応用分野には、より明確な優位性が求められる。近年急速に発展し、近い将来巨大産業に成長すると言われているIoT (Internet of Things) もより薄く軽く安価なデバイスを要求しており、有機エレクトロニクス分野にとっての追い風になると期待している。

2. 新しい原理に基づく縦型有機トランジスタ

当研究室では有機トランジスタ分野において、独自の新しい原理に基づくデバイスの研究を行ってきた [2, 3]。現在研究されている有機トランジスタは基本的に図3(a)に示すような電界効果型トランジスタ (Field Effect Transistor, FET) であり、性能に最も大きな影響を与えるチャンネル長は電極のパターニング精度によって決まる。これに対して筆者らは、図3(b)に示すような全く異なる素子構造を持つ縦型メタルベース有機トランジスタ (MBOT) を考案し、その性能の向上、新しい応用の開拓を行ってきた。MBOTは膜厚方向に電流を流すため、チャンネル長が膜厚に対応することから、100 nm程度の極めて短いチャンネル長を容易に実現できる。さらに、面全体がチャンネルとして働くことから、本質的に大電流・低電圧動作に適した構造である。

(a) 通常の有機FET構造



(b) 縦型メタルベース有機トランジスタ

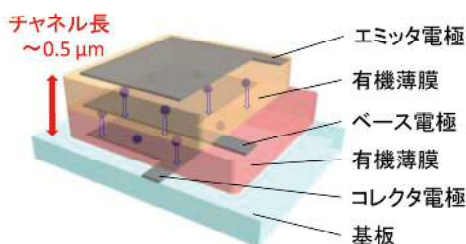


図3 (a) 通常の横型有機FETの構造と、
(b) 縦型有機トランジスタの構造

実際MBOTは、有機デバイスとしては極めて高い出力電流密度 ($1 \text{ A/cm}^2 \sim$) を実現し、有機トランジスタが最も苦手とする高周波動作 ($1 \text{ MHz} \sim$) も実現している。また、面状構造であるために有機EL材料を半導体層に用いることにより、電流を増幅しつつ発光するという「発光トランジスタ」を実現することもできる [4]。動作メカニズムの観点から見ると、本デバイスは単純な積層構造でありながら、バイポーラトランジスタと同じような電流増幅特性を示す。ベース電極における高確率の電流透過という奇妙な現象は、界面の欠陥などが問題になりにくい有機デバイスならではのメカニズムと言える。

このような特性を持つMBOTが狙う応用のターゲットとして、大電流・高周波を必要とする無線通信回路が挙げられる。現在、有機トランジスタを使った13.56 MHz帯のRF-IDタグに関する研究がさかに行われているが、これらは基本的にパッシブ型であり、有機トランジスタ回路を使って電波を発生させるアクティブ型の研究はほとんど行われていない。これに対して縦型有機トランジスタは、異なる素子構造に基づくスケーリングによってこれを解決できる可能性がある。

3. 有機薄膜太陽電池の新しい材料探索

当研究室では、有機薄膜太陽電池の研究も行っている。JSTのCRESTプロジェクト (研究代表者：奈良先端大 山田容子教授) において、通常の高分子を用いたバルクヘテロ型素子ではない新しい系として、低分子塗布系の太陽電池材料の探索を行なっ

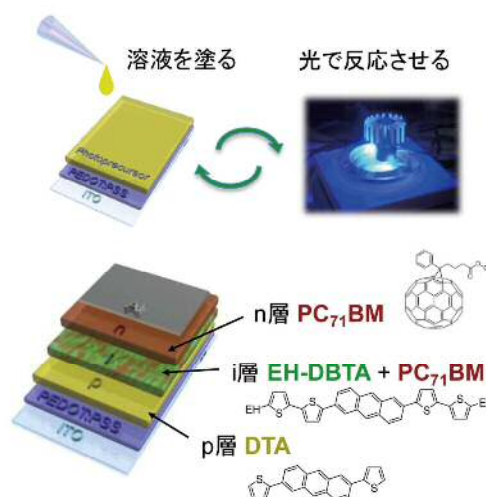


図4 光前駆体を用いた、塗布積層型p-i-n有機太陽電池

てきた。その中で、光前駆体という特徴的な材料を用いた塗布積層型の p-i-n 有機太陽電池の作製に成功した (図 4)。光前駆体は可溶で塗布成膜が可能であり、その後光化学反応により不溶性の半導体膜を得ることができる。これにより次の層を再び重ね塗りすることができ、塗布系でありながら異種接合を持つ素子を実現した [5]。これにより、電荷発生層と電荷輸送層の機能分離を実現でき、それぞれの機能に特化した材料の設計が可能になる。

4. 分子からデバイスへの階層構造

有機エレクトロニクスという分野を学問として捉えた場合、その核心は「有機分子によって構成された薄膜の中で、電子や光がどのように振る舞うか?」という点にある。有機物は基本的には絶縁体であり、そもそも有機物にどのように電気が流れるかという問題は古くから議論されてきたが、まだ明らかにすべきことがたくさんある。本分野の究極の目標は、「分子構造を見ればデバイス性能が予測できる」ことにあるが、その間には図 5 に示すような深い階層構造が横たわっており、その道はなかなか険しい。有機化学の視点から一分子の性質だけを見てもデバイス特性の予測は困難であるし、半導体工学の理論

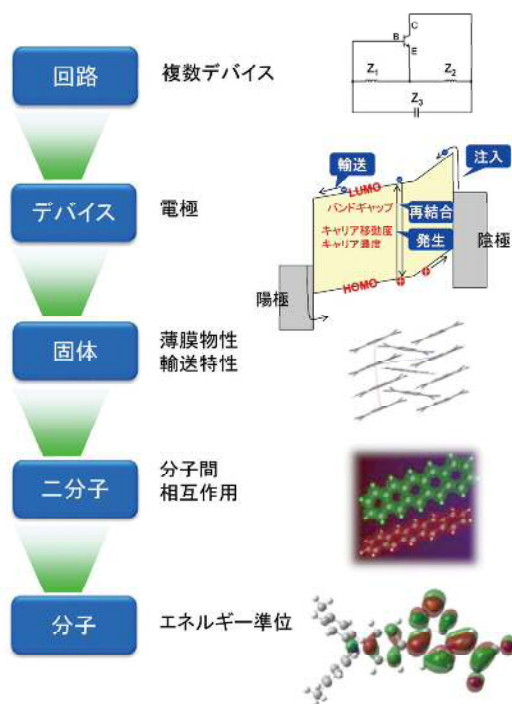


図 5 有機半導体デバイスを理解するための学問的階層構造

でデバイス特性をいくら説明してみたところで、その材料の性質と結びつけられなければ性能向上にはつながらない。しかしこの難しさこそが逆に本分野の魅力でもある。 π 共役系分子を生み出す有機合成化学と、固体物理化学、そしてデバイス特性を記述する半導体工学、さらには電子回路に至るまで、極めて広い学際的な融合分野である。

5. おわりに

有機物に電気が流れる、その素朴な意外性が研究者を惹きつけ、やがてそれが実用的意味を持つことが実証され、有機導電体・半導体の歴史は発展してきた。しかし、産業として真に成功するかどうかは数々の競合技術とのせめぎ合いにかかっており、世の中の動向とも密接に関係している。有機半導体は、共有結合と周期構造により力強く広がった無機半導体の電子状態には、電気伝導性や耐久性という点で本質的には勝てないのだろうか? ファンデルワールス固体の可能性がどれほどのものであるのか、化学と物理のさまざまな視点を駆使して見極めていくことが当研究室の目標である。有機分子には無限のバリエーション、そして可能性がある。有機エレクトロニクスの発展により、 π 共役系の有機化学も大きく進展した。世界中の有機合成化学者が味方についてくれていることを信じて、有機エレクトロニクスの新しい可能性を探求していきたい。

最後に、これまで研究を一緒に進めてくれたポスドク・学生諸君、支援をいただいた JST、NEDO、学術振興会、そして共同研究者の皆様に感謝の意を表したい。

(参考文献)

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
- [2] K. Nakayama, S. Fujimoto, and M. Yokoyama, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 153512 (2006).
- [3] K. Nakayama, R. Akiba, and J. Kido, *Appl. Phys. Express*, **5**, 094202 (2012).
- [4] K. Nakayama, Y. -J. Pu, and J. Kido, *J. Soc. Inf. Disp.*, **19**, 602-607 (2011).
- [5] Y. Yamaguchi, M. Suzuki, T. Motoyama, S. Sugii, C. Katagiri, K. Takahira, S. Ikeda, H. Yamada, and K. Nakayama, *Sci. Rep.*, **4**, 7151 (2014).