

【緒言】 有機 EL テレビが発売された昨年 2007 年は、有機エレクトロニクスにとって画期的な年であった。テレビという極めて注目度の高い商品の発売は、1980 年代に電界発光素子 (EL)、太陽電池、トランジスタという 3 つの基幹デバイスが提案されて以来、約 20 年後の快挙である。それを契機に、有機エレクトロニクスの認知度が大きく高まり、研究も一段と加速しているように感じられる。実際、実用化という意味で断然先頭を突き進んでいる有機 EL に牽引される形で、有機太陽電池や有機トランジスタにも最近大きな進展が続いている。とくに有機トランジスタは、単結晶材料を用いることができる唯一のデバイスであるため、これを用いた有機半導体物理の研究も本格化しているとともに、有機トランジスタ用分子の開発も大きく発展している。本講演では、有機トランジスタの基礎研究を概観して、その新しい機能としての発光素子への応用、さらには、これらの機能を実現する分子についても述べたいと思う。

【有機トランジスタの伝導機構】

トランジスタとは、要は電流のスイッチング素子である。その素子構造を図 1 に示す。ドレイン (D) - ソース (S) 電極間に流れる電流を第 3 の電極ゲート (G) によってスイッチさせる構造になっている。D-S 電極間に使われている半導体として有機材料を用いる場合、この素子は有機トランジスタと呼ばれる。無機半導体を用いるトランジスタにはさまざまな形態があるが、有機ト

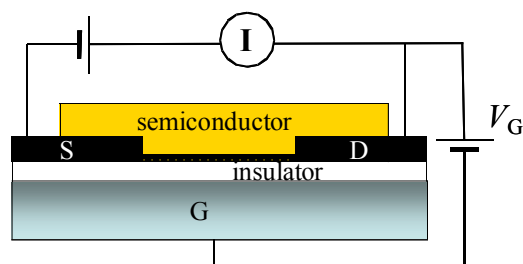
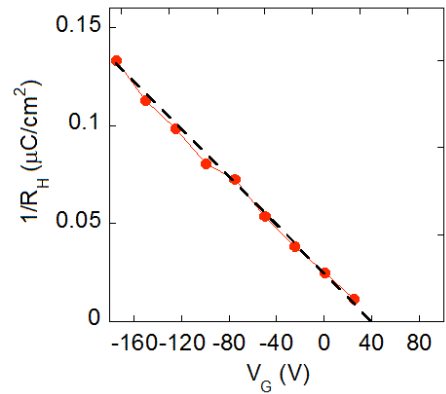


図 1 MISFET の模式図

ランジスタで用いられる素子構造と原理は、ほとんど、Metal-Insulator-Semiconductor Field Effect Transistor (MISFET) とよばれる電界効果型である。MIS 構造とは、コンデンサ構造であり、その片側電極に半導体を用いられているものである。ゲート電極に電圧を印加すると、コンデンサの原理で電荷 (キャリア) が蓄積されるが、片側の半導体は、蓄積されたキャリアによって伝導度が大きく変調される。有機半導体部分に用いられる材料は、高分子、低分子の薄膜材料のほか、最近ではカーボンナノチューブなども使われ始めている。有機エレクトロニクスに用いられる有機半導体の伝導機構は、基本的にホッピング伝導と理解されてきた。ところが、有機エレクトロニクスで用いられる有機半導体の形態は基本的に多結晶かアモルファスであったため、キャリアのホッピングが 1 個 1 個の分子間で起きる本質的なものか、結晶粒の間で起こる外因的なものかを区別することは原理的に不可能であった。ところが、有機半導体ルブレンの単結晶を用いたトランジスタでは、従来にない高易動度を $40\text{cm}^2/\text{Vs}$ が報告され、バンド伝導に限りなく近いことが予想される。実際、易動度が $1\text{cm}^2/\text{Vs}$ を越える高品質なトランジスタでは、温度依存性のない易動度がしばしば報告されており、この事実もバンド伝導を強く示唆する。

単結晶トランジスタのホール効果の結果を図2に示す。ホール効果とは、磁場の印加によって伝導しているキャリアの密度を見積もる方法であり、それによって求められたキャリア数が、ゲート電圧の関数として黒丸で示されている。一方、点線はゲート絶縁膜の静電容量からゲート電圧によって蓄積されるキャリア数を予想した直線である。ホール効果とは、伝導しているキャリアが磁場によるローレンツ力に

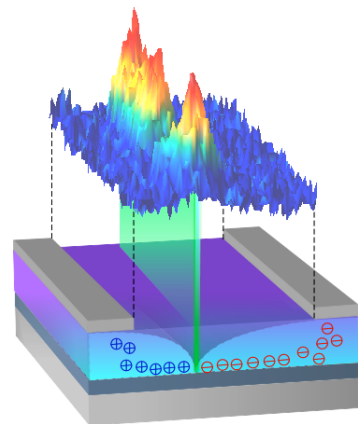


よって進路が曲げられて起こる現象である。したがって、ホッピング性が強い場合には、ほとんど磁場効果を受けないため、ホール電圧が発生しにくくなり、キャリア数を正しく測定することができなくなる。ホール効果によるキャリア数がコンデンサの式と一致した事実は、蓄積されたすべてのキャリアのホッピング伝導性は非常に弱く、むしろバンド伝導的であることを強く示唆している。

図2 有機FETにおけるキャリア数（縦軸）とゲート電圧（横軸）の関係。点が、ホール効果によって求められた実験値、点線がコンデンサの式から求められた計算値

その他、電子スピン共鳴、光吸収、熱起電力など、さまざまな物理量が有機単結晶トランジスタについて報告されてきたが、ほとんどの測定はバンド伝導で矛盾なく説明できることを示しており、少なくとも高易動度を示す有機半導体の本質的な伝導機構は、バンド伝導であると結論できる状況に達しつつある。このように単結晶有機トランジスタの研究成果は、従来から信じられてきた有機半導体の伝導機構がホッピング的であるとの考え方に対し、修正をせまっていると考えられる。

[有機単結晶発光素子] 有機半導体の本質は、基本的には無機半導体と同じであることが上記から明らかになってきたが、逆に有機材料特有の性質はないだろうか？ここで紹介するのは、有機材料に限るわけではないが、無機半導体にはほとんど見られない一方、有機半導体では頻りに観測される性質として、両極性トランジスタとその応用である。このデバイスは、電子蓄積でも正孔蓄積でも動作するトランジスタのことで、最近の重要なテーマとなっている。我々のグループでは、左右の電極から電子と正孔を同時に注入してチャンネル中央にPN接合に相当する領域を作製し、その部分でキャリアを再結合させ発光するデバイス（発光トランジスタ）の作製に取り組んでいる（図3）。そのデバイスに有機単結晶を用いることによって、高電流密度を実現するとともに、光とじこめが可能であることが明らかになってきた。これは単結晶を用いたデバイスの大きな長所であり、有機エレクトロニクスの一つの重要なターゲットである有機レーザーの実現にとって明るい展望をもたらす有力な指針になる可能性がある。



本研究は、竹延大志准教授、嘉治寿彦博士（東北大）、竹谷純一准教授（阪大）、塚越一仁博士（産総研）、安達千波矢教授（九大）、堀田収教授（京都工繊大）らとの共同研究の成果である。

図3 両極性有機発光トランジスタの模式図（下図）と、テトラセン単結晶を用いたデバイスにおける発光の強度分布図（上図）。