

イオン液体を用いた高性能有機電界効果トランジスタを開発

財団法人電力中央研究所(理事長:白玉良一、東京都千代田区)は、今般大阪大学(総長:鷺田清一、大阪府吹田市)と共同で、リチウム二次電池の研究などで注目されているイオン液体を用い、高性能な有機単結晶電界効果トランジスタを作製することに成功しました。

今回試作した、有機材料を用いた電界効果トランジスタ(以下FET)は、従来の有機FETに比べて100~500分の1程度の非常に弱い電圧(約0.2V)で動作するとともに、電気二重層を用いた有機FETの中では最大値となる高い電荷移動度(10 cm²/Vs)を示すことが分かりました。

この値はアモルファスシリコンの電荷移動度(1.0 cm²/Vs程度)を凌駕し、有機フレキシブルディスプレイなどで必要とされる電荷移動度も十分に満足するものです。

さらにこの有機FETでは、0.1Hzから1MHzまで幅広い周波数について、高い静電容量(キャパシタンス)を持っており、高速なスイッチング性能をも兼ね備えていることがわかりました。

有機材料は原材料が概ね低コストであり、かつ加工・成型がしやすいなどの特徴を持っていますが、本技術を用いれば将来的には、低電圧で動作し省エネ性能にも優れたICタグや有機フレキシブルディスプレイなどを廉価で大量に生産することも可能になると見込まれます。

なお、本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業個人型研究(さがけタイプ)「界面の構造と制御」【研究総括:川合眞紀】の一環として行われました。

また、科研費(17069003, 18028029, 19360009, 20740213)の助成を受けております。

[研究の概要]

将来の民生分野での利用拡大、ユビキタス社会の構築に向けて、現在低コスト、省エネ化が期待できる有機エレクトロニクスの研究が盛んに行われています。

また、最近の材料・技術の著しい進歩により、有機材料を用いたFETでも、アモルファスシリコンの電子移動度(~1cm²/Vs)を凌駕する性能を示すデバイスが開発されてきています。

しかし、現状これらの有機FETを動作させるには、高い電圧(20~100V程度)を印加する必要があり、デジタル回路のオン・オフを明瞭に行うために無理に高電圧を印加すると、逆にゲート絶縁体の絶縁破壊が起きてしまうなどの問題を抱えていました。

そこで今般、電力中央研究所と大阪大学大学院 理学研究科 化学専攻 竹谷純一准教授のグループは、リチウム二次電池の研究で注目されているイオン液体を、有機FETへ適用する可能性を検討しました。

従来の有機FETでは、有機単結晶に接合するゲート絶縁体には、通常酸化シリコン(SiO₂)を用いており、この酸化シリコンの厚みが数100nm程度ありました。

このためゲート絶縁体に外部から電圧を印加しても、ゲート電極表面の電荷と有機単結晶界面との間にはゲート絶縁体自体の厚み分の距離があり、結果的にこの間にかかる電界は低くなってしまっていました。また、この距離を少なくしようとして酸化シリコンの厚みを薄くしようとしても、今度は絶縁破壊が起きてしまうことや製造方法の面から限界があり、これが低電圧で有機FETを動作することが出来ない大きな理由になっていました。

一方イオン液体は、陽イオン、陰イオンからなる有機液体ですが(図1)、これを有機単結晶とゲート電極の間に挟みこみ、ここでイオン液体に電圧を加えるとイオンの移動が起こり、イオン液体と結晶、及びゲート電極の間の界面に陽陰イオンが蓄積された両電荷層(電気二重層)ができます(図2)。

ゲート電極に印加した電圧は、最終的には電気二重層にかかりますが、この場合電気二重層の距離が1nm程度と極めて近接しているため、微弱な電圧を印加するだけでも、電界は非常に大きなものになります。

さらには、イオン液体自身は液体であることから、有機単結晶との間に良好な界面が簡単に得る事ができるというメリットもあります。

このような優れた特徴から、イオン液体を用いれば、従来の有機 FET に比べて低電圧で駆動する有機 FET を作製出来る可能性があります。

このため、このイオン液体をゲート絶縁体として用いた有機単結晶 FET (有機単結晶にはルブレン <rubrene> を使用) を試作 (写真 1) し、その基本性能を評価しました。

[主な成果]

試作した有機 FET の評価結果からは、以下がわかりました。

1. 低電圧駆動が可能

試作した有機 FET は、非常に弱い電圧 (約 0.2V) でトランジスタとして動作することがわかりました。これは、従来の有機 FET に比べて 100~500 分の 1 程度の電圧となります。

2. 高い電荷移動度

電荷移動度を求めると、電気二重層を用いた有機 FET の中で最大値 ($10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) を示すことがわかりました。この値はアモルファスシリコンの電荷移動度 ($1.0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度) を凌駕し、有機フレキシブルディスプレイで必要とされる電荷移動度を十分に満足するものです。

3. 高速スイッチングが可能

イオン液体の電解容量の周波数依存性を測定したところ、0.1 Hz から 1 MHz まで幅広い周波数について、高い電解容量 (キャパシタンス) を持つことが明らかになりました。

このことは、イオン液体は高周波においても電気二重層を形成し、有機半導体に多くのキャリア注入 (高容量化) が可能になることを示唆しており、イオン液体を用いた有機 FET は高速なスイッチング性能をも兼ね備えていることがわかりました。

[今後の展開]

本技術を用いることで、省エネルギーで動作する高性能有機トランジスタを実現することが可能になると見込まれます。

さらに今後は、より低電圧で駆動し、電荷移動度としてはパソコンの CPU (論理回路) などにも使用可能なレベル ($\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度) まで高い性能をもつ、有機トランジスタの開発を目指しています。

[その他]

特許：特願 2008-004629、2008-4630
PCT/JP2008/065700

関連報告書：

Shimpei Ono, Shiro Seki, R. Hirahara, Y. Tominari and J. Takeya 「High-mobility, low-power, and fast-switching organic field-effect transistors with ionic liquids」 Applied Physics Letter **92** (2008) 103313. 他

R. Hirahara, S. Ono, S. Seki, Y. Tominari, and J. Takeya
MRS proceedings 1091-AA11-52 (2008).

S. Ono, S. Seki, R. Hirahara, Y. Tominari, and J. Takeya
MRS proceedings 1082-Q05-05 (2008).

以上

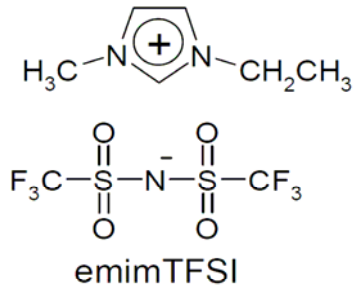


図1 イオン液体の化学式

(実験に用いたイオン液体は 1-ethyl-3methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide)

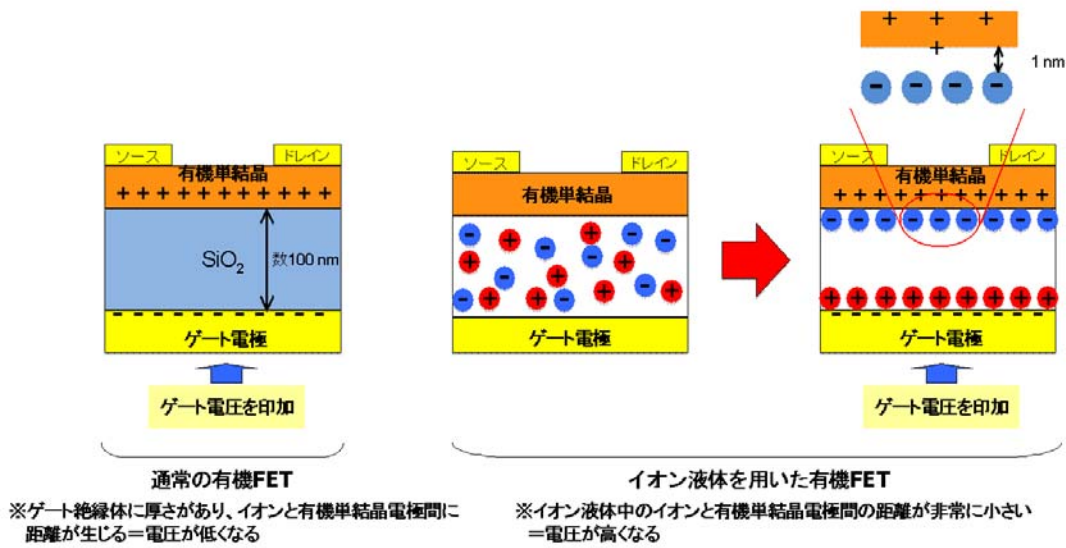


図2 ゲート絶縁体の厚さ効果 及び 電気二重層のイメージ図

イオン液体に電圧を印加するとイオンの移動が起き「電気二重層」ができるが、この電気二重層に注目すると、イオンは電極から約 1 nm の距離に集中するため、高電界印加が可能になる。

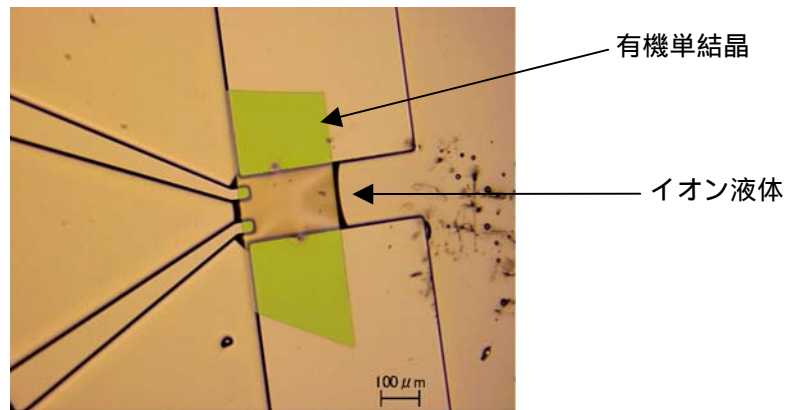


写真1 試作した有機電界効果トランジスタ