

研究種目：若手研究（個人） 研究期間：平成 25 年 9 月～平成 26 年 3 月

研究課題名：電気二重層トランジスタ動作下の直接チャネル観察

ラボ長

所属：物質創成専攻 機能物質化学領域

氏名：横田泰之

研究成果（当初の研究目的と得られた結果を記載ください。図表を含め 2 ページ程度）：

近年、動作電圧の大幅な低下やキャリア密度の増加が容易に実現できることから、固体-液体界面を利用した電気二重層電界効果トランジスタ(電気二重層 FET)が注目を集めている(図 1)。中でも、ルブレ単結晶とイオン液体(IL)の界面を利用した電気二重層 FET では移動度が $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に迫る値が報告されている。IL は電位窓が広いといったユニークな特徴を有しているため近年急速に電気化学デバイスへの応用が展開されている。申請者らは、電気二重層 FET では有機半導体チャネル領域の直接観察が可能であることに注

目し(図 1)、主に原子間力顕微鏡(AFM)を用いてルブレ単結晶/IL 界面の研究を行ってきた。しかしながら、通常の電気化学 AFM では FET 特性を計測できないため(ソースとドレインを単一の電極で置き換えて測定しているため)、実際のデバイス特性と得られた AFM 像の関係が不明である。そこで本研究では、FET 動作下での AFM 観察を可能とするため 5 電極 AFM 測定装置の開発を行うに至った。

図 2 は最も可能性が高いと思われるセットアップの模式図であり、通常ソース、ドレイン、ゲートに加えて、

電位を精密に制御するための補助電極(精密な電気化学測定で必須)、AFM 探針自体の 5 電極から構成される。一見容易に実現可能であるように見受けられるが、一番困難が予想されるのは金電極とイオン液体の接触面積を限りなく 0 に近づけることである。接触面積が広いとリーク電流が極めて大きくなり、デバイス動作で流れる電流を検出できなくなるためである。図に記した Cytop は最近デバイス分野で注目されている絶縁材であるが、これが最適かどうかは実際にリーク電流を測定しないと分からない。そこで本研究では図 3 のような簡易デバイスを作製し Cytop の有用性の評価を行った。

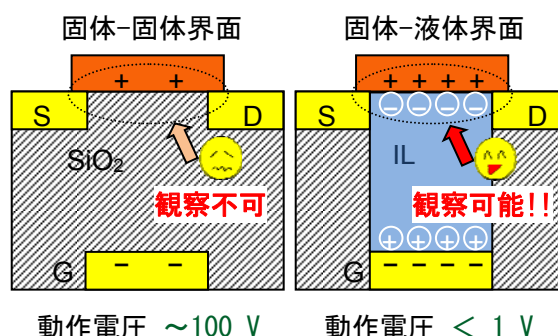


図 1. 従来の(左)有機 FET と(右)電気二重層 FET の模式図。S、D、G はソース、ドレイン、ゲート電極、IL はイオン液体、点線はそれぞれのチャネル領域を表す。固体-液体界面ではチャネルの AFM 観察が可能。

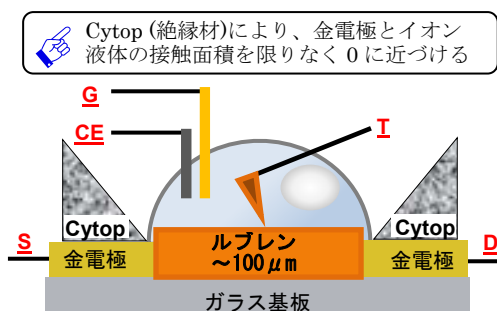


図 2. “5 電極 AFM 測定”の模式図。電気二重層 FET 動作下のチャネルの直接観察・直接加工が可能となる。CE、T は補助電極、探針電極を表す。

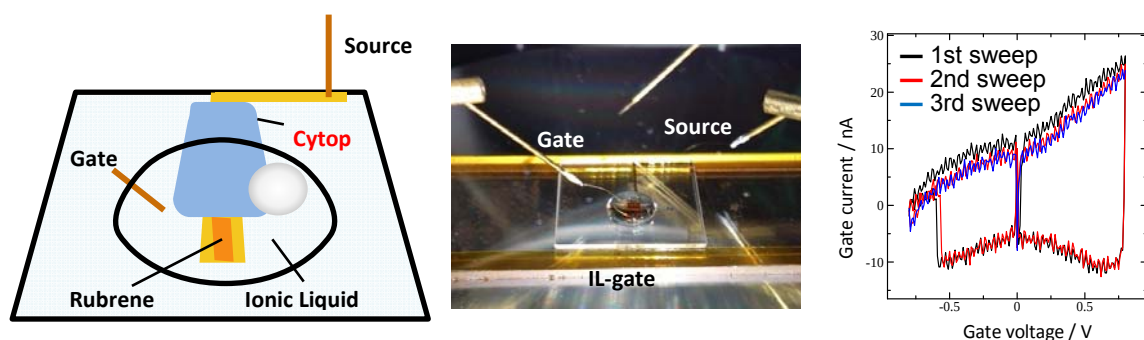


図 3. Cytop の絶縁性評価の実験の模式図(左)と写真(中)。ソース電極に対してゲート電極に電圧を印加し、流れたゲート電流を測定することで、Cytop の絶縁性を評価した。(右)ゲート電流-ゲート電圧特性。

図 3(右)はゲート電圧をスイープした際に流れるゲート電流を測定した結果である。ゲート電圧が負の場合と比べ、正の場合に電流値が大きくなっていることが分かる。この結果は、ゲート電極への正電圧(ソース電圧への負電圧)印加により、ルブレン単結晶表面にホールが注入され実効的な容量が大きくなったことを示している。Cytop を塗布しない場合には大きなリーク電流によってこのような微小電流測定は不可能であり、Cytop の絶縁材としての有用性が明らかとなった。また、得られた曲線からデバイス界面の電気容量を算出したところ $14 \pm 3 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ となり、一般的なイオン液体/電極界面での値から推察して妥当な結果となった。電気容量と印加したゲート電圧からホール注入量の絶対値を求められるため、AFM を用いることでホール注入量に依存した界面構造の変化を追跡することが可能となった(図 4)。現在、上記の簡易デバイスを発展させた FET デバイスの作製にも成功しており、当初の研究計画どおりに研究が進んでいる。今後は、そのデバイス特性の評価と共に AFM 観察を行い、本研究を継続発展させる予定である。

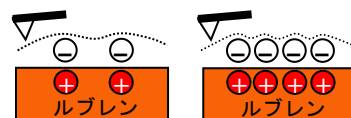


図 4. 本研究で確立した電荷注入量評価を利用したホール-アニオン相互作用の直接検出の模式図。

キーワード：

電気二重層トランジスタ、有機半導体、イオン液体、原子間力顕微鏡

研究経費（H25 年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	495,700 円	4,300 円	0 円	0 円	500,000 円

共同研究者等

(1) 共同研究者（氏名・所属）

竹谷 純一： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質創成専攻

植村 隆文： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質創成専攻

岡田 悠悟： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質創成専攻

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

原 援又： 大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻（博士前期課程 2 年）

森野 裕介： 大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻（博士前期課程 1 年）

発表論文等（平成 26 年 3 月 31 日現在）

〔論文発表〕

[1] Yasuyuki Yokota, Hisaya Hara, Tomohiro Harada, Akihito Imanishi, Takafumi Uemura, Jun Takeya, and Ken-ichi Fukui

“Structural Investigation of Ionic Liquid/Rubrene Single Crystal Interfaces by Using Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy”

Chem. Commun., **49** (90), pp 10596–10598 (2013).

[2] Tomohiro Harada, Yasuyuki Yokota, Akihito Imanishi, and Ken-ichi Fukui

“Preferential Formation of Layered Structure of Ionic Liquid at Ionic Liquid Aqueous Solution / Graphite Electrode Interfaces Observed by Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy”

e-J. Surf. Sci. Nanotech., in press (2014).

[3] Yusuke Morino, Yuta Kanai, Akihito Imanishi, Yasuyuki Yokota, and Ken-ichi Fukui

“Fabrication of Ionic Liquid Ultrathin Film by Sequential Deposition Method”

Jpn. J. Appl. Phys., in press (2014).

〔学会発表〕

[1] 横田 泰之

“電気二重層の理解と制御に向けた原子・分子レベルの固液界面研究”

第 4 回真空・表面科学若手研究会、つくば、2013 年 11 月。

[2] 原 援又、今西 哲士、横田 泰之、植村 隆文、竹谷 純一、福井 賢一

“周波数変調 AFM によるイオン液体 イオン液体 /ルブレン単結晶界面近傍の局所構造解析”

第 33 回表面科学講演大会、つくば、2013 年 11 月。

[3] 横田 泰之、原 援又、森野 裕介、今西 哲士、岡田 悠悟、植村 隆文、竹谷 純一、福井 賢一

“周波数変調 AFM によるイオン液体 イオン液体 /ルブレン単結晶界面近傍の局所構造解析”

日本化学会第 94 春季年会、名古屋、2014 年 3 月 27 日発表予定。

外部資金獲得状況・申請状況（本研究課題に関連して、科研費、JST 等の競争的資金、受託研究、奨学寄付金を受給された場合、また、申請された場合はその状況を記入ください）

[1] 2013 年度 公益財団法人 新世代研究所

“5 電極 AFM による電気二重層 FET 動作下の直接チャネル計測”

採択済み、助成額：500 千円

[2] 平成 26 年度 科学研究費補助金（基盤研究(C)）

“電気二重層有機 FET の性能向上に向けたナノサイエンス”

申請中、申請額：4,900 千円

参考となるHP等

無し