平成 26 年度　未来研究ラボシステム　研究成果報告書

研究種目：若手研究（個人）　　研究期間：平成２６年４月～平成２６年１０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してください。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、ルブレン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 $cm^2/V\ s$ 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。我々は、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)を用いてルブレン単結晶/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。

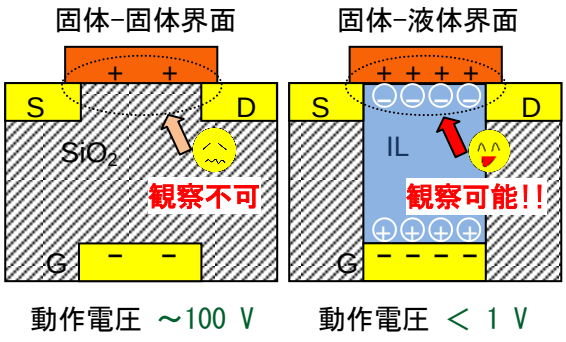

図 1. 従来の(左)有機 FET と(右)電気二重層 FET の模式図。S、D、G はソース、ドレイン、ゲート電極、IL はイオン液体、点線はそれぞれのチャネル領域を表す。固体−液体界面ではチャネルの AFM 観察が可能。

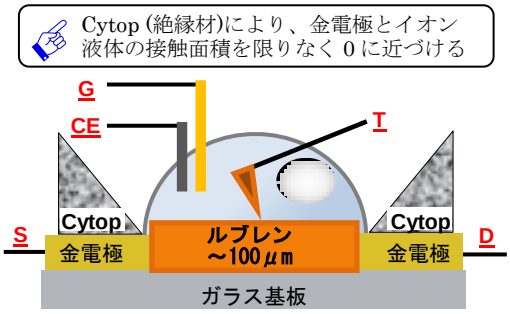

図 2. “5 電極 AFM 測定”の模式図。電気二重層 FET 動作下のチャネルの直接観察・直接加工が可能となる。CE、T は補助電極、探針電極を表す。

図 2 の模式図に示したデバイス(昨年度に試作したもの)を多数作製したところ、歩留まりが悪く、多くの場合数 μA 程度のリーク電流が観測された。そこで当初の予定を変更して、レーザーエッチング法を用いた電極加工によって同様のデバイスを作製することにした。図 3 にレーザーエッチング法(Nd:YAG 第四高調波レーザー)で作製したデバイスの写真を示す。ルブレン単結晶と電極上にイオ

ン液体を滴下することで図 2 と同様のデバイス特性評価が可能となる。図 4 にこのデバイスを用いて測定した伝達特性を示した。リーク電流値(点線)はゲート電圧によらず 10 nA 以下となっており、レーザーエッチング法を用いることで大幅な改善が見られた。その結果、ドレイン電流(実線)が明瞭に観測され、閾値電圧(図の場合−120 mV)を正確に評価可能となった。これにより、5 電極 AFM 測定時にホール注入量を制御することに成功した。

今後は、本研究で開発した 5 電極 AFM を用いることで、デバイス動作の微視的理解を深める研究を展開していく。また、本研究と同時進行して行った実験によって、イオン液体/有機半導体界面の興味深い性質が次々と明らかになってきており、基礎的な新しい物理化学の研究と共に、デバイス開発の応用にも関連する研究成果が期待できる。

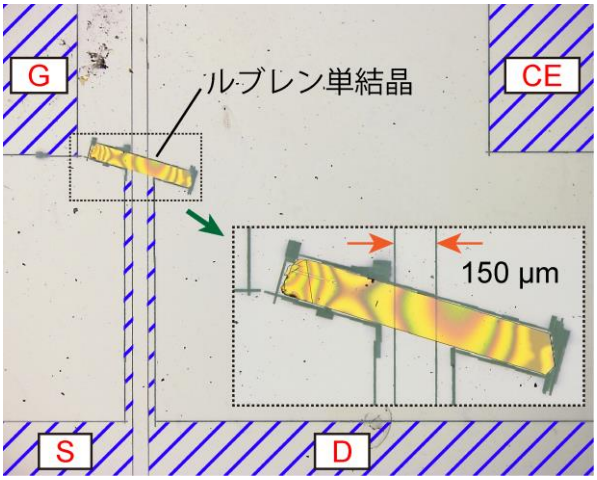

図 3. 5 電極 AFM 測定のためのデバイスの写真。

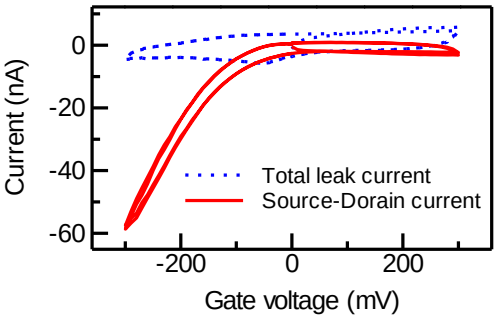

図 4. AFM 測定用のデバイスで測定した電気二重層 FET 伝達特性。

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（H26 年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	326,642 円	0 円	0 円	23,358 円	350,000 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））
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）
坂東賢一：　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）
大野桜子：　大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻（学部 4 年）

発表論文等（平成 27 年 3 月 31 日現在）

〔雑誌論文〕

[1] Y. Yokota, H. Hara, Y. Morino, K. Bando, A. Imanishi, T. Uemura, J. Takeya, K. Fukui
"Clean Surface Processing of Rubrene Single Crystal Immersed in Ionic Liquid by Using Frequency Modulation Atomic Force Microscopy"
Appl. Phys. Lett., **104** (26), 263102 (2014).

[2] K. Fukui, Y. Yokota, A. Imanishi
"Local Analyses of Ionic Liquid / Solid Interfaces by Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy and Photoemission Spectroscopy"
Chem. Rec., **14** (5), pp 964–973 (2014).

[3] Y. Yokota, H. Hara, Y. Morino, K. Bando, A. Imanishi, T. Uemura, J. Takeya, K. Fukui
"Molecularly Clean Ionic Liquid/Rubrene Single-Crystal Interfaces Revealed by Frequency Modulation Atomic Force Microscopy"
Phys. Chem. Chem. Phys., **17** (10), pp 6794–6800 (2015).

その他本研究と関連の有る論文 3 報

〔著書〕

[1] Y. Yokota, K. Fukui
"Electrochemical Applications of Frequency Modulation Atomic Force Microscopy"
In "*Noncontact Atomic Force Microscopy*", Vol. **3**, Eds. S. Morita, F. J. Giessibl, E. Meyer, R. Wiesendanger, Springer, in press.

〔学会発表〕

国内依頼公演：3 件
国際会議(口頭発表)：3 件
国際会議(ポスター発表)：1 件
国内会議(口頭発表)：5 件

ラボ長以外の関連発表多数

〔その他〕

[1] 竹谷純一、植村隆文、福井賢一、今西哲士、**横田泰之**、原援又、森野裕介、坂東賢一
“有機半導体膜の製造方法、製造装置および電気二重層トランジスタ”
特願 2015-031980、2015 年 2 月 20 日.

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 研究助成
“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”
採択済み、助成額: 3,900 千円

[3] 平成 27 年度 科学研究費補助金（新学術領域研究(研究領域提案型)）
“トラップサイトの局所構造評価と制御による高移動度電気二重層トランジスタの創成”
申請中、申請額: 6,000 千円

参考となるＨＰ等

無し