

Title	C60薄膜電界効果トランジスタの輸送特性とチャンネルサイズの関係
Author(s)	松岡, 亨卓
Citation	
Issue Date	2006-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	none
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/2197">http://hdl.handle.net/10119/2197</a>
Rights	
Description	Supervisor: 藤原 明比古, 材料科学研究科, 博士

# C<sub>60</sub> 薄膜電界効果トランジスタの輸送特性とチャンネルサイズの関係

藤原研究室 340032 松岡 亨卓

## 背景

近年、自由に画像や動画などの情報を入手することのできる「ユビキタス」へのニーズが、非常に高まっている。そのユビキタスを実現するためには、低コストで、軽く、フレキシブルなデバイスが求められる。シリコンデバイスを作製するには、高い温度を必要とする。例えば、液晶ディスプレイのスイッチングデバイスに用いられるアモルファスシリコン (a-Si : H) は、400°C 程度で薄膜が形成される。低コストで、軽く、フレキシブルな基板の代表であるプラスチックフィルム基板の耐熱温度は 200°C 程度であることから、これに、アモルファスシリコンなど、シリコン半導体の薄膜を形成することは難しい。一方、有機分子は質量が軽く、有機分子薄膜は、200°C 以下の低温での真空蒸着や室温での溶液プロセスを用いて形成することができる。このため、有機分子を材料に用いた有機エレクトロニクスへの期待が高まっている。有機エレクトロニクスの実用化に向けて様々な研究開発が行われているが、その電子デバイスへの応用を考えたとき、高性能なスイッチングデバイスデバイス、すなわち、高性能な有機薄膜電界効果トランジスタ (OTFT : Organic Thin Film field-effect Transistor) の開発は非常に重要である。これまで、p チャンネル OTFT は、詳細なデバイス評価がおこなわれており、移動度が  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を越える OTFT が出現している。一方、n チャンネル OTFT の詳細なデバイス評価の例はほとんどなく、移動度も p チャンネル OTFT よりも低い。それは、炭素の陰イオンの反応性の高さや不安定性によって、デバイス動作が不安定なためである [1]。電子デバイスは、CMOS (Complementary Metal Oxide Transistor) など、p チャンネルデバイスと n チャンネルデバイスを組み合わせることで、有用なデバイスが実現できる。ところが、CMOS を作製しても、n チャンネル OTFT の移動度が低い場合、それがボトルネックとなり、p チャンネル OTFT の移動度が生かせなくなる。移動度の高い n チャンネル OTFT の実現に向けて、n チャンネル OTFT の詳細なデバイス評価が、有機エレクトロニクスの発展にとって必要である。

## 目的

n チャンネル OTFT である C<sub>60</sub> 薄膜電界効果トランジスタ (C<sub>60</sub>TFT : C<sub>60</sub> Thin Film field-effect Transistor) の動作原理を明らかにし、今後のデバイス特性向上への方向性提示する。そのため、第一に、試料間でばらつきの少ない作製条件と測定環境に置くことによって、デバイス動作の不安定な C<sub>60</sub>TFT から系統的なデバイス特性を得る。第二に、C<sub>60</sub>TFT の全体抵抗のチャンネル長依存性から、チャンネル抵抗と C<sub>60</sub>-ソース、ドレイン界面の接触抵抗を、各々抽出し、その特性を評価する。得られた特性に基づいて、C<sub>60</sub>TFT の動作原理について検討する。そして、デバイス特性向上への取り組みとして、接触抵抗の低減が期待できる C<sub>60</sub>-Pd ポリマーを活性層に用いた TFT を、接触抵抗を積極的に利用した取り組みとして、チャンネルサイズがナノスケールの C<sub>60</sub>TFT を、各々、作製して、デバイス特性の評価を行なった

## 実験

### 1. C<sub>60</sub> TFT の作製と測定方法

本研究では、バックゲート型ボトムコンタクト C<sub>60</sub> TFT を作製し、評価した。基板に熱酸化 SiO<sub>2</sub> 膜 (400 nm) 付きの n 型 Si 単結晶を用い、これをゲート電極として利用した。そして、SiO<sub>2</sub> 上にソース、ドレイン電極パターンを電子線リソグラフィにより形成、Au をスパッタリングし、リフトオフプロセスにより Au ソース、ドレイン電極を形成した。その後、それら Au ソース、ドレイン電極の上に C<sub>60</sub> を真空蒸着法により堆積し、5~20 μm のチャンネル長の異なる C<sub>60</sub> TFT を同一基板上に作製した。C<sub>60</sub> TFT の電流-電圧特性の測定は、10<sup>-3</sup>-10<sup>-4</sup> Pa の真空中、77 K から室温の温度範囲で行われた。

### 2. C<sub>60</sub> TFT のチャンネル抵抗と接触抵抗の抽出方法

C<sub>60</sub> TFT のチャンネル長を  $L$  とし、チャンネル幅  $W$  あたりの C<sub>60</sub> TFT の全体抵抗を  $R_t$ 、チャンネル抵抗を  $R_{ch}$  ( $R_{ch} = R_{sh}L$ ,  $R_{sh}$ : シート抵抗)、C<sub>60</sub> 薄膜-ソース電極、C<sub>60</sub> 薄膜-ドレイン電極間の接触抵抗を  $R_c$  とすると、 $R_t$  は式(1)で与えられる。 $R_t = R_{sh}L + R_c = R_{ch} + R_c \cdots (1)$  これより、 $R_t$  を  $L$  に対してプロットし線形回帰直線を求めると、直線の傾きから  $R_{sh}$ 、切片から  $R_c$  が求まることになり、チャンネル抵抗と接触抵抗を抽出することができる。

## 結果と考察

### 1. C<sub>60</sub> TFT からのチャンネル抵抗と接触抵抗の抽出 (学位論文第 3 章)

はじめに、作製した C<sub>60</sub> TFT のデバイス特性の評価を行った。その結果、デバイス特性のばらつきが少ない、移動度  $\mu = 3 \times 10^1$  cm<sup>2</sup>/Vs、on/off  $\approx 10^7$  という非常に良質な n チャンネル C<sub>60</sub> TFT を複数、得ることができた。そして、この試料のドレイン電流  $I_D$ -ドレイン電圧  $V_{DS}$  特性の線形領域の傾きから、C<sub>60</sub> TFT の全体抵抗  $R_t$  を求めた (図 1)。次に、式 (1) に基づいて、求めた  $R_t$  をチャンネル長  $L$  に対してプロットした。その結果、図 2 のように、系統的な傾向が得られた。このプロットに対して、線形回帰分析し、得られた直線の傾きから  $R_{sh}$ 、切片から  $R_c$  を求めた。これより、作製条件を最適化させることによって、デバイス動作が不安定な n チャンネル OTFT から、物性評価のできる系統的なデバイス特性を得られることがわかった。

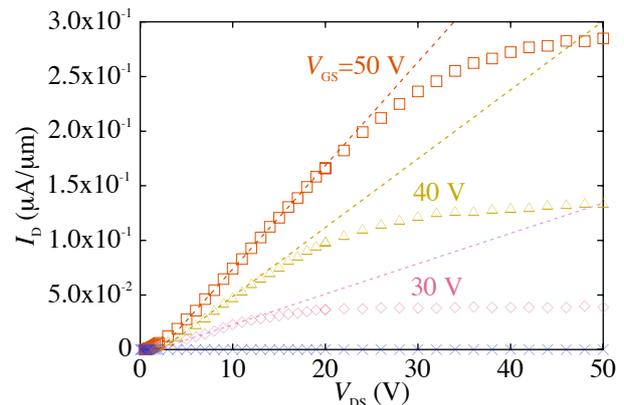


図 1. 293 K の C<sub>60</sub> TFT ( $L/W=5 \mu\text{m}/100 \mu\text{m}$ ) の  $I_D$ - $V_{DS}$  特性.  $V_{GS}$  はゲート電圧、点線は線形領域の線形回帰直線を示す。

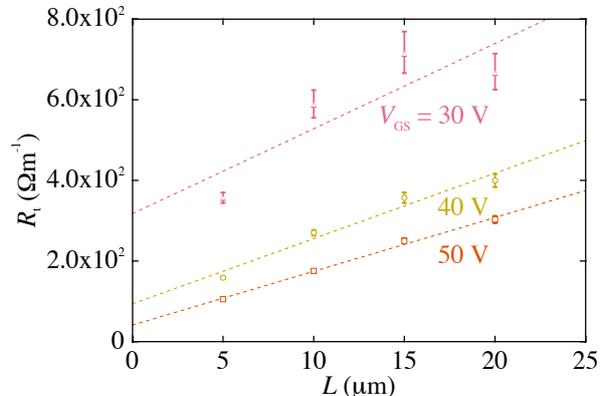


図 2. 293 K の C<sub>60</sub> TFT の全体抵抗  $R_t$  のチャンネル長  $L$  依存性. 点線は線形回帰直線を表す。

## 2. $C_{60}$ TFT のチャンネル抵抗と接触抵抗のゲート電圧依存性 (学位論文第3章)

$C_{60}$  TFT のチャンネル抵抗  $R_{ch}$  と接触抵抗  $R_c$  のゲート電圧  $V_{GS}$  依存性を、調べた。 $R_{ch}$  の  $V_{GS}$  依存性を図3に示す。 $R_{ch}$  と  $R_c$  共に、ゲート電圧の増加にともなって減少した。これより、 $C_{60}$  TFT は、ゲート電圧によって、チャンネル抵抗と接触抵抗の両方が変化することが、わかった。ただし、そのゲート電圧依存性は  $R_c$  の方が大きいことがわかった。この傾向は、p チャンネル OTFT でも報告されており[2]、 $C_{60}$  TFT でも、チャンネルに加えて、ソース、ドレイン電極界面がデバイス動作にとって、重要であることがわかった。

## 3. $C_{60}$ TFT の接触抵抗と全体抵抗の温度依存性 (学位論文第3章)

チャンネル、そして、ソース・ドレイン電極界面での輸送機構を調べるため、チャンネル抵抗  $R_{ch}$  と全体抵抗  $R_t$  の温度依存性を調べた結果、いずれも、温度の $-1$ 乗に比例する活性化型の温度依存性を示した。活性化エネルギーを求めた結果、 $R_{ch}$  の活性化エネルギーは 70 meV 程度で、チャンネル長  $L$  に依存せず、ゲート依存性が小さいことがわかった。一方、 $R_t$  の活性化エネルギーは図4に示すように  $L$  と  $V_{GS}$  に対して大きな依存性を持つことがわかった。ここで、 $R_c$  と  $R_t$  の比  $R_c/R_t$  の  $L$  に対するプロットを図5に示す。図5から  $L$  が短くなるにつれて、 $R_c/R_t$  が増加していることがわかる。図4、5を比較すると、 $R_c/R_t$  の増加と  $R_t$  の活性化エネルギーの減少が対応していることから、 $R_t$  の活性化エネルギーの減少は、 $R_c$  の活性化エネルギーに起因していることがわかった。したがって、図4における  $R_t$  の活性化エネルギーの大きな  $V_{GS}$  依存性は、 $R_c$  に起因する。すなわち、ゲート電圧によって、ソース・ドレイン電極界面のポテンシャル障壁が変化することがわかった。

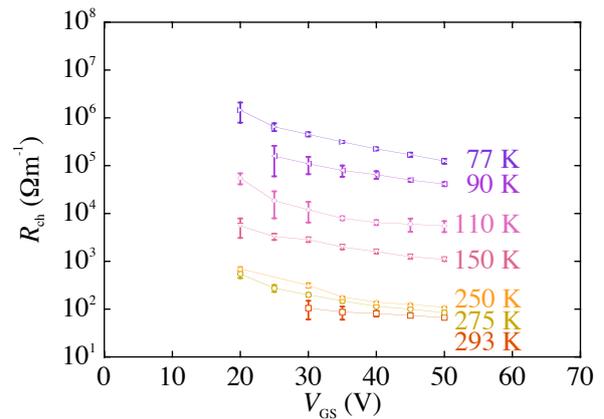


図3.  $C_{60}$  TFT ( $L/W=5\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ ) のチャンネル抵抗  $R_{ch}$  のゲート電圧  $V_{GS}$  依存性.

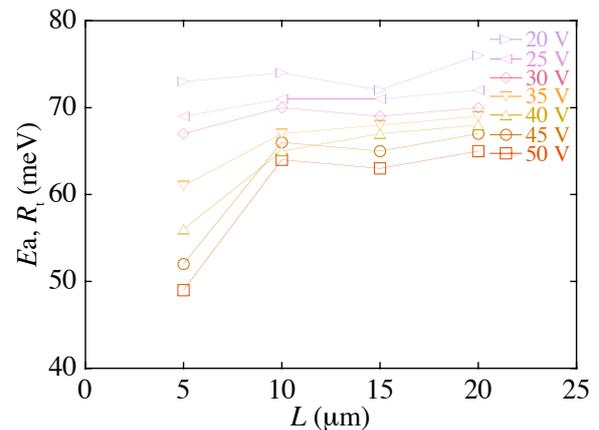


図4. 293 K の  $C_{60}$  TFT ( $L/W=5\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ ) の全体抵抗  $R_t$  の活性化エネルギーのチャンネル長  $L$  依存性.

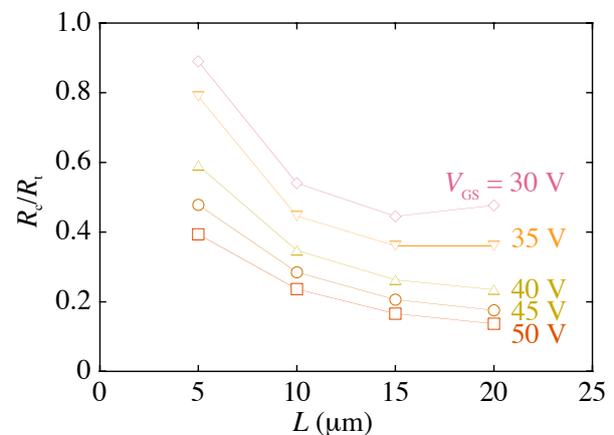


図5. 293 K の接触抵抗  $R_c$  と全体抵抗  $R_t$  の比  $R_c/R_t$  のチャンネル長  $L$  依存性.

#### 4. 接触抵抗低減の試み (学位論文第4章)

3章の結果から、 $C_{60}$  TFTの動作に接触抵抗が大きく影響することがわかった。そこで、接触抵抗を低減するために、 $C_{60}$ と電極の相互作用を強くすることを試みた。 $C_{60}$ とPdが結合したポリマー状分子を活性層に、そして、Pdと相性の良いPtをソース・ドレイン電極に用いた、 $C_{60}$  TFTと同様なバックゲート型構造のFETを作製し、デバイス特性の評価を行った。その結果、 $I_D$ - $V_{DS}$ 特性に、接触抵抗に起因する非線形な $I_D$ の増加がほとんどみられないことがわかった。これより、 $C_{60}$ -Pdポリマーを活性層に用いることにより、OTFTの接触抵抗を低減できることがわかった。

#### 5. ナノスケール $C_{60}$ TFTの $I_D$ - $V_{DS}$ 特性 (学位論文第5章)

3章の結果から、チャンネル長が短くなるにしたがって接触抵抗が大きくなることが明らかになったが、チャンネル長を極限まで小さくしたときの $C_{60}$  TFTのデバイス特性は興味深い。そこで、チャンネル長20 nmの $C_{60}$  TFTを作製し、その $I_D$ - $V_{DS}$ 特性を測定した。その結果、チャンネル長50 nm以上の $C_{60}$  TFTでは $V_{DS}=0$  Vに対して非対称な $I_D$ - $V_{DS}$ 特性を示したのに対して、チャンネル長20 nmの $C_{60}$  TFTは対称な $I_D$ - $V_{DS}$ 特性を示した。この原因はわかっていないが、チャンネルをナノスケールまで小さくすることによって、一般的なOTFTとは異なる特性を得た。

#### 参考文献

- [1] C. D. Dimitrakopoulos, P. R. L. Malenfant, *Adv. Mater.* **14**, 99-117 (2002).  
 [2] I. Yagi, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 813-815 (2004).

#### 論文目次

第1章 序論	1
第2章 実験	24
第3章 $C_{60}$ 薄膜電界効果トランジスタのチャンネルサイズ・温度依存性	37
第4章 接触抵抗の低減の試み	86
第5章 ナノスケール $C_{60}$ TFTの $I$ - $V$ 特性	96
第6章 結論	106

#### 業績

Y. Matsuoka, A. Fujiwara, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: "Temperature Dependence of Photoconductivity at 0.7eV in Single-wall Carbon Nanotube Films," *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **4**, 47-50 (2003).

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: "Photoconductivity of Single-Wall Carbon Nanotube Films," *Carbon*, **42**, 919-922 (2004).

Y. Matsuoka, N. Inami, E. Shikoh, and A. Fujiwara: "Transport properties of  $C_{60}$  thin film FETs with a channel of several-hundred nanometers," *Sci. Technol. Adv. Mater.* **6**, 427-430 (2005).