

# 曲げ負荷による有機薄膜トランジスタの電気特性変動における接触抵抗の影響およびその負荷方向依存性

井上 将太郎<sup>1</sup>, 小金丸 正明<sup>1\*</sup>, 三成 剛生<sup>2</sup>, 北口 絵理<sup>2</sup>, 池田 徹<sup>1</sup>

## Impact of Contact Resistance on Electrical Characteristic Variations of Organic Thin Film Transistors Due to Bending Load and Its Load Direction Dependence

Shotaro INOUE<sup>1</sup>, Masaaki KOGANEMARU<sup>1\*</sup>, Takeo MINARI<sup>2</sup>, Eri KITAGUCHI<sup>2</sup>, and Toru IKEDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒 890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

<sup>2</sup> 国立研究開発法人物質・材料研究機構 (〒 305-0044 茨城県つくば市並木 1-1)

<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University (1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065)

<sup>2</sup> National Institute for Materials Science (1-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0044)

**概要** ベンタセンを用いた有機薄膜トランジスタに対し、引張り曲げ負荷を加えて電気特性変動を計測した。異なるチャンネル長を有する試験片の計測結果に Transfer Line Method を適用し、電気特性変動における電極と半導体層との界面での接触抵抗変化の影響を評価した。その際、電流方向に対する負荷方向（平行または垂直）の影響も評価した。その結果、引張り曲げ負荷によって、接触抵抗およびチャンネル抵抗が何れも増加することが分かった。さらに、接触抵抗の増加率は、電流方向に対して平行負荷の場合の方が大きくなることが分かった。また、負荷に対する応力感度は、接触抵抗よりチャンネル抵抗の方が大きく測定された。

### Abstract

This study evaluated the impact of contact resistance on changes in the electronic characteristics of pentacene organic thin-film transistors (OTFTs) under a tensile bending load. The contact resistances at the interface between the electrode and semiconductor layer of the OTFTs were estimated by means of the transfer line method (TLM) using specimens with different channel lengths. In this evaluation, the load direction dependence (parallel or perpendicular to the current direction of the OTFTs) in the electronic characteristic changes induced by the bending load was also evaluated. The results demonstrated that, in all cases, both the contact resistance and the channel resistance increased due to the tensile bending load. In addition, it was found that the rate of increase in the contact resistance for the parallel load was greater than that for the perpendicular load. It was also observed that the channel resistance had a higher stress sensitivity to the tensile bending load than the contact resistance.

**Key Words:** Organic Thin-Film Transistors, Pentacene, Bending Load, Contact Resistance, Mechanical Stress, Electrical Characteristics

## 1. 緒言

有機薄膜トランジスタ (Organic Thin-Film Transistor: OTFT) は、次世代エレクトロニクス分野の担い手として研究開発が進められている<sup>1)~4)</sup>。その理由の一つに、低温プロセスにより有機フレキシブル基板上に作製可能であることがある。この特性を活かせば、軽量かつ柔らかく曲げやすいといった形状変化に優れたデバイスや回路システムが実現可能となる。一方で、このアドバンテージを活かした製品の実用化には、信頼性確保の面で課題が残されている。繰り返し形状変化を伴う使用を前提とした場合、配線や構成材料、デバイスそのものの疲労を含む破壊などに対する“機械的”信頼性の担保が必須であることは想像に難くない。さらに、“電氣的”信頼性の問題として、Si およびそのデ

バイスの piezo 効果<sup>5),6)</sup>のように、変形下で OTFT のデバイス特性が変動することが知られている<sup>7)~10)</sup>。本研究では、後者の変形下（機械的負荷下）での OTFT のデバイス（電気）特性変動に着目する。

これまで本研究グループでは、曲げ負荷（引張り）、面内引張り負荷、および面外圧縮負荷による OTFT のドレイン電流変化を評価してきた<sup>9),10)</sup>。OTFT の機械的負荷下における電気特性変動の要因として、半導体層の結晶粒子間隔の変化<sup>11)</sup>や、電極と半導体層との界面の接触抵抗変化<sup>12)</sup>などが報告されている。しかしながら、Si デバイスの piezo 効果のように、その物理現象が明確になっているとは言い難い。曲がる、柔らかいといった OTFT の特徴を活かした製品の実用化のためには、機械的負荷に伴う OTFT の電気特性変動の物理的要因を踏まえた上で、設計指針を明確にしておく必要がある。

本研究では、機械的負荷下で OTFT の電気特性変動を引き起こす物理的要因の考察を目的とし、機械的負荷下での

\*: Corresponding author  
E-mail: koganemaru@mech.kagoshima-u.ac.jp

OTFT 半導体層と電極との界面での接触抵抗変化に着目した。そのため、異なるチャンネル長を有するペンタセン OTFT を同一基板上に作製し、これらを用いた機械的負荷下での電気特性計測結果に Transfer Line Method (TLM)<sup>13)</sup> を適用した。その際、電流方向と負荷方向が平行または垂直となる試験片を用いて評価を行い、負荷方向の違いによる影響についても考察した。ペンタセン OTFT の機械的負荷下（引張り方向曲げ負荷下）での電気特性変動と、その際のペンタセン半導体層と電極との界面での接触抵抗変化の影響について報告する。

## 2. 試験デバイス

### 2.1 作製プロセス

本研究で評価したペンタセン OTFT は、40 mm × 100 mm（厚さ 125 μm）のポリイミドフィルム基板上に作製した。具体的な作製プロセスは、以下 1)~4) の通りである。

- 1) 真空蒸着により、ポリイミドフィルム基板上に、基板とゲート絶縁層の接着層として厚さ 15 nm のチタンを、ゲート電極として厚さ 50 nm の銅を堆積させる。
- 2) ゲート絶縁膜として、ポリイミドを N-メチル-2-ピロリドン (nacakai tesque, 23030-55) で 80 wt% に希釈してスピコートし、その後 180°C で 1 時間アニールする。
- 3) 真空蒸着により、厚さ 60 nm のペンタセン (NARD INSTITUTE, 100108) を半導体層として形成する。
- 4) 真空蒸着により、厚さ 60 nm の銅をソース、およびドレイン電極として形成する。

以上により、本研究での曲げ試験に供する OTFT を作製した。

### 2.2 OTFT 供試材

Fig. 1 には、本研究で作製した OTFT の断面模式図を示す。作製した OTFT 供試材は、ボトムゲート・トップコンタクトの構造を有している。Fig. 2 には、作製した OTFT 供試材の配線模式図を示す。Fig. 2(a) には電流方向と負荷方向が平行となる場合 (parallel), Fig. 2(b) には電流方向と負荷方向が垂直となる場合 (perpendicular) の配線模式図をそれぞれ示している。また Fig. 3 には、40 mm × 100 mm（厚さ 125 μm）のポリイミド基板上に作製された OTFT の写真を示す。Fig. 3(a) には電流方向と負荷方向が平行 (parallel) となる OTFT 供試材の写真、Fig. 3(b) には電流方向と負荷方向が垂直 (perpendicular) となる OTFT 供試材の写真をそれぞれ示している。本研究では、電流方向と負荷方向が平行となる OTFT 供試材、および電流方向と負荷方向が垂直となる OTFT 供試材はいずれも、それぞれ 1 つのマスキング上にチャンネル長のみが異なる 6 通りの水準を配置し、2.1 節に示したプロセスで作製した。具体的には、作製した OTFT 供試材のチャンネル長は、電流方向と負荷方向の関係が何れの場合（平行、または垂直）も、50 μm, 100 μm, 150 μm,

200 μm, 250 μm, 300 μm の 6 通りである。これらの OTFT 供試材に対し、予備計測として無負荷（基板が平坦な状態）で OTFT の電圧 - 電流特性を計測して、再現性良く出力特

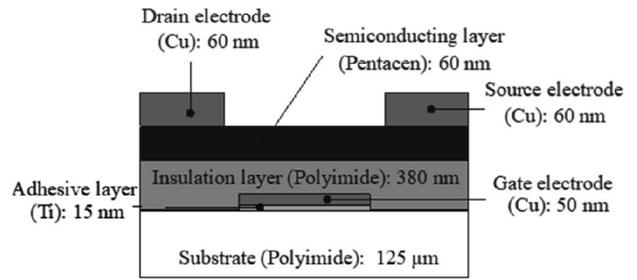


Fig. 1 Cross-sectional schematic of fabricated OTFT specimens having bottom gate-top contact structure.

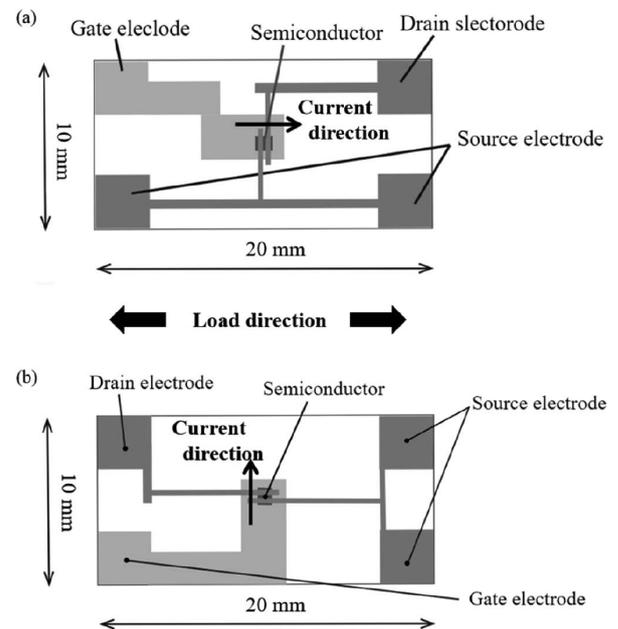


Fig. 2 Wiring diagram of fabricated OTFT specimens: angles between current direction and load direction are (a) parallel and (b) perpendicular.

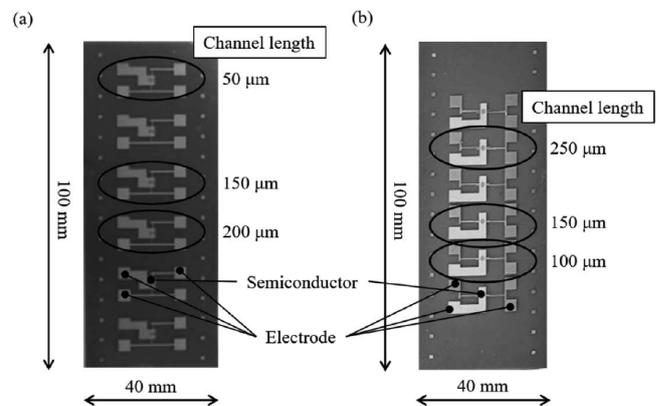


Fig. 3 Pictures of fabricated OTFTs on Polyimide substrate: angles between current direction and load direction are (a) parallel and (b) perpendicular.

性が得られた水準の OTFT 供試材を曲げ試験片として用いた。すなわち、電流方向と負荷方向が平行または垂直となる OTFT において、それぞれ 3 水準（計 6 水準）で計測・評価を行った。具体的には、Fig. 3 に示した OTFT 供試材のうち、電流方向と負荷方向が平行となる OTFT ではチャンネル長が 50  $\mu\text{m}$ 、150  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$  の 3 通り、垂直となる OTFT では 100  $\mu\text{m}$ 、150  $\mu\text{m}$ 、250  $\mu\text{m}$  の 3 通りである。なお、チャンネル幅はいずれも 1,000  $\mu\text{m}$  である。これら同一基板上に作製されたチャンネル長が異なる OTFT の測定結果に次章で述べる TLM を適用した。

### 3. TLM による接触抵抗の算出方法

本研究では、Transfer Line Method (TLM)<sup>13)</sup> により、OTFT のソースおよびドレイン（コンタクト）電極と半導体層の界面の接触抵抗を評価した。

ゲート電圧 ( $V_G$ ) 一定の条件では、線形領域でのソースドレイン間電圧 ( $V_{S-D}$ ) とドレイン電流 ( $I_D$ ) 曲線の傾きから、ソースドレイン間抵抗 ( $R_{S-D}$ ) が次式 Eq. 1 で与えられる。

$$R_{S-D} = \left( \frac{\partial V_{S-D}}{\partial I_D} \right)_{V_G = \text{const.}} \quad (1)$$

また、 $R_{S-D}$  が半導体層のチャンネル抵抗 ( $R_{CH}$ ) と接触抵抗 ( $R_C$ ) の和であると見なせば、線形領域での  $R_{S-D}$  は次式 Eq. 2 で与えられる。

$$R_{S-D} = R_{CH} + R_C = \frac{L}{WC\mu(V_{S-D} - V_{th})} + R_C \quad (2)$$

ここで、 $L$  はチャンネル長、 $W$  はチャンネル幅、 $C$  はゲート絶縁膜の静電容量、 $\mu$  はキャリア移動度、 $V_{th}$  はしきい値電圧である。 $W$  を同一とすれば、 $L$  が異なる OTFT を同一基板上に作製した場合、Eq. 2 から  $L$  が異なるそれぞれの OTFT における  $R_{S-D}$  と  $L$  の関係を線形と見なすことができる。なお、 $L$  が異なる OTFT を同一基板上に同時に作製することにより、 $L$  が異なる各 OTFT において、 $C$ 、 $\mu$ 、および  $V_{th}$  を同じと見なす。同様に、ペンタセン薄膜層の抵抗率も同じと見なす。

そこで、同一基板上に作製された  $L$  が異なる複数の OTFT (前述の通り  $W$  は同一：本研究では 1,000  $\mu\text{m}$ ) の出力特性 (ソース/ドレイン間電圧-ドレイン電流曲線) から Eq. 1 により求められる  $R_{S-D}$  を縦軸に、対応する  $L$  を横軸にプロットする。このプロットに対し、最小二乗法で得られる近似直線と縦軸との切片 ( $L = 0$ ) を求める。Eq. 2 の関係より、この  $L = 0$  (すなわち、 $R_{CH} = 0$ ) に外挿されて得られる  $R_{S-D}$  の値が、接触抵抗 ( $R_C$ ) 値となる。

### 4. 曲げ試験片、試験方法および条件

曲げ試験片は、Fig. 3 に示したシートから、OTFT が試験片中心部になるように切り出して作製した。曲げ試験片の写真を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) には電流方向と負荷方向が平行となる場合 (parallel)、Fig. 4(b) には電流方向と負荷方

向が垂直となる場合 (perpendicular) の写真をそれぞれ示している。曲げ試験片の長さは 40 mm、幅は 10 mm である。

試験片への曲げ応力は、所定の直径を持った木製の丸棒に試験片を巻き付けることによって負荷した。なお、丸棒に試験片を巻き付ける際に OTFT が外側に位置するように巻き付けるため、OTFT には引張りの曲げ応力が負荷されることになる。異なる曲げ応力を負荷するために用いた丸棒の直径は、8 mm、10 mm、12 mm、15 mm、20 mm、25 mm、および 32 mm の 7 水準である。例として、試験片を直径 32 mm の丸棒に取り付けた際の写真を Fig. 5 に示す。Eq. 3 より、丸棒の半径 ( $r$ ) および基板の厚さ ( $d_S$ ) から OTFT に生じる公称ひずみ ( $\epsilon$ ) を算出し、Eq. 4 のフックの法則から OTFT に生じる公称応力 ( $\sigma$ ) を算出した。その際、Eq. 4 中のヤング率 ( $E$ ) は、本研究グループで実測したポリイミドフィルム (基板) のヤング率 (3.0 GPa) を用いた。

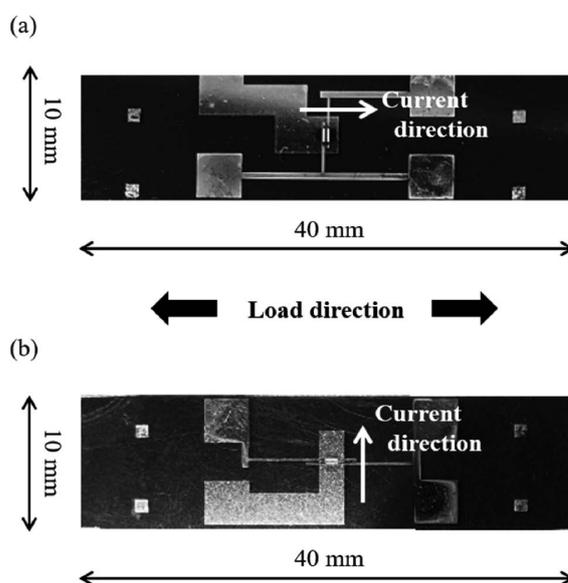


Fig. 4 Pictures of OTFT specimen for bending tests: angles between current direction and load direction are (a) parallel and (b) perpendicular.

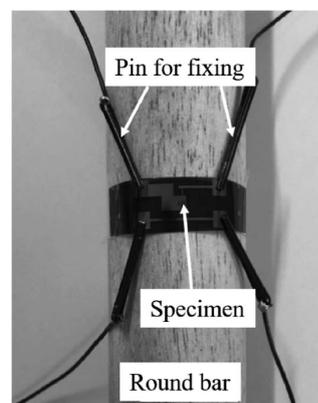


Fig. 5 Picture of specimen settings for applying bending load.

$$\varepsilon = \frac{d_s}{2r} \quad (3)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

その結果、OTFT への公称曲げ応力は、12 MPa, 15 MPa, 19 MPa, 25 MPa, 31 MPa, 38 MPa, および 47 MPa の 7 水準となる。

試験片を丸棒に巻き付けて所定の（引張り）曲げ応力を負荷した後、Fig. 5 に示す様に OTFT の電極に結線し、OTFT のゲートおよびソースドレイン間に所定の電圧を印加して、ソースドレイン間の電流（伝達特性）を計測した。電気的境界条件として、OTFT のゲート電圧を  $-5\text{ V}$  に固定し、ソースドレイン間の電圧を  $-10\text{ V}$  から  $0\text{ V}$  まで掃引した。また、光によって OTFT の電気特性が変動することを防ぐため、計測の際は試験片部分を遮光した。

## 5. 結果と考察

### 5.1 ドレイン電流の変化

4 章で述べた曲げ負荷下での OTFT のドレイン電流（出力特性）変化の測定結果を、Fig. 6 および Fig. 7 に示す。Fig. 6 には電流方向と負荷方向が平行な場合、Fig. 7 には電流方向と負荷方向が垂直な場合の結果をそれぞれそれぞれ示している。Fig. 6(a) はチャンネル長が  $50\ \mu\text{m}$ 、Fig. 6(b) は

チャンネル長が  $150\ \mu\text{m}$ 、Fig. 6(c) はチャンネル長が  $200\ \mu\text{m}$  の測定結果である。また、Fig. 7(a) はチャンネル長が  $100\ \mu\text{m}$ 、Fig. 7(b) はチャンネル長が  $150\ \mu\text{m}$ 、Fig. 7(c) はチャンネル長が  $250\ \mu\text{m}$  の OTFT の測定結果である。

Fig. 6 および Fig. 7 に示す結果より、いずれの負荷方向およびチャンネル長においても、曲げ応力の増加に伴いドレイン電流が減少した。これらの結果は、これまでの報告<sup>8),10)</sup>と定性的に同様である。

### 5.2 接触抵抗変化の評価結果

5.1 節で示した実験結果から、3 章で示した手順により、接触抵抗の算出を行なった。Fig. 6 および Fig. 7 で示した出力特性測定結果から作成した TLM プロットを Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) には電流方向と負荷方向が平行の結果、Fig. 8(b) には電流方向と負荷方向が垂直の結果をそれぞれ示している。また Fig. 8 には、異なる曲げ応力下での結果を同時に示している。Fig. 8 を得るための具体的な手順は以下 1)~3) の通りである。なお本研究では、Fig. 6 および Fig. 7 に示すドレイン電流（出力特性）曲線において、凡そ平均的な傾きと見えるドレイン電圧  $-6\text{ V}$  において、ソースドレイン間抵抗を評価した。

1) まず出力特性 (Fig. 6 および Fig. 7) における  $-10\text{ V}$  ~  $0\text{ V}$  の間を二次曲線で最小二乗法近似し、この曲線に

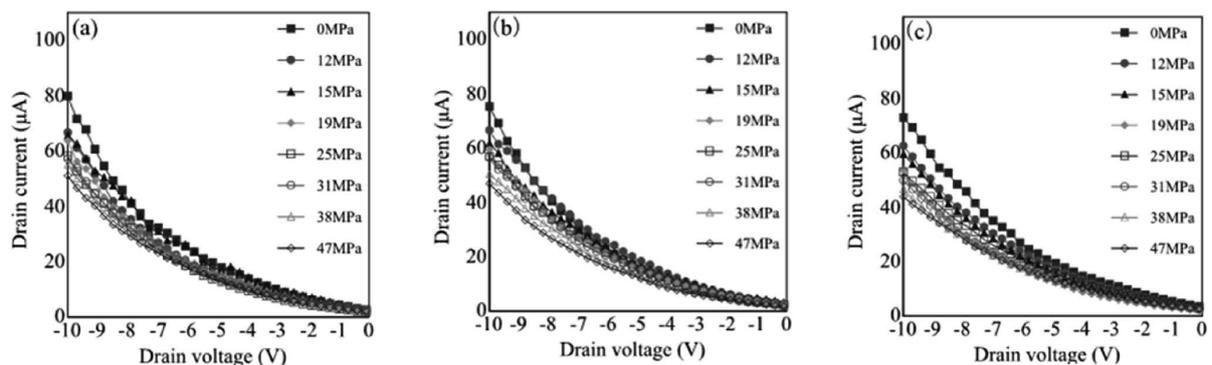


Fig. 6 Experimental results of drain current shifts under bending stress induced by parallel load: channel length of (a)  $50\ \mu\text{m}$ , (b)  $150\ \mu\text{m}$  and (c)  $200\ \mu\text{m}$ .

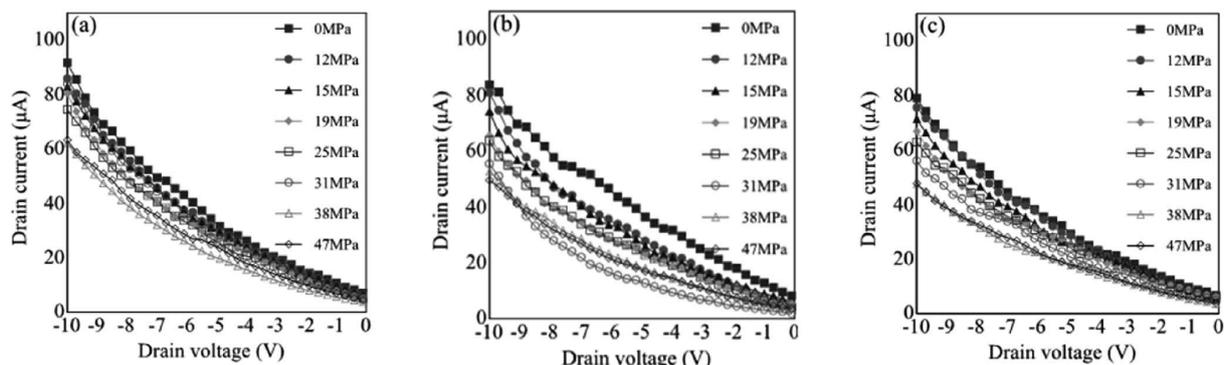


Fig. 7 Experimental results of drain current shifts under bending stress induced by perpendicular load: channel length of (a)  $100\ \mu\text{m}$ , (b)  $150\ \mu\text{m}$  and (c)  $250\ \mu\text{m}$ .

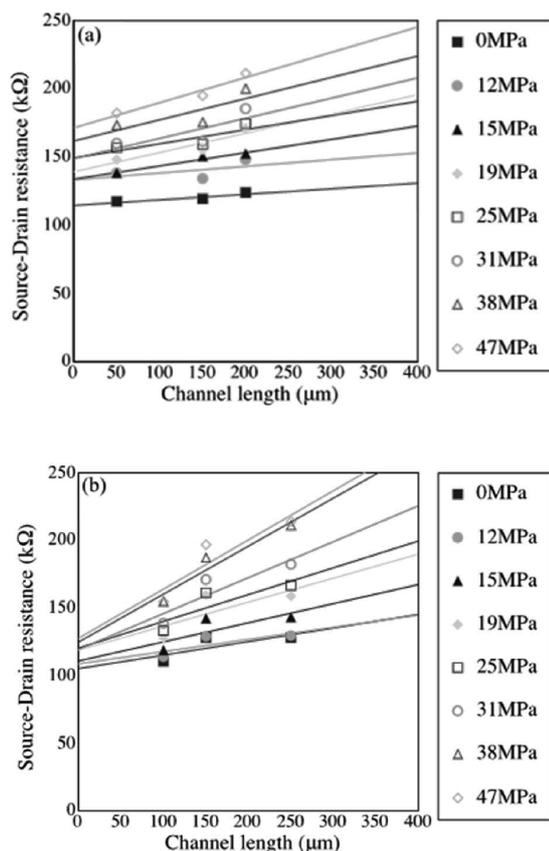


Fig. 8 TLM plots obtained by experimental results of Fig. 6 and Fig. 7: (a) parallel load and (b) perpendicular load.

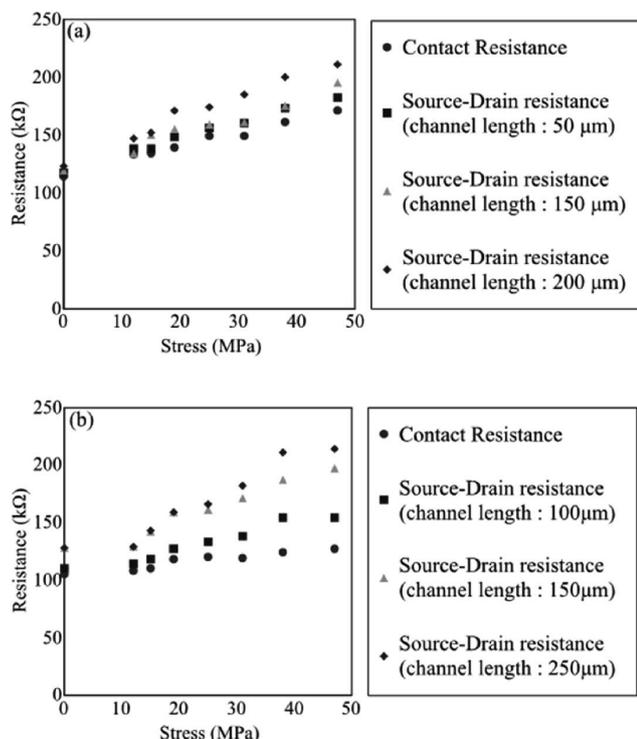


Fig. 9 Changes of contact resistances and source-drain resistances induced by (a) parallel load and (b) perpendicular load.

おけるドレイン電圧  $-6\text{ V}$  での接線の傾きから、ソースドレイン間抵抗 ( $R_{S-D}$ ) 値を求める (Eq. 1)。

- 2) 次に、各チャンネル長で求められたソースドレイン間抵抗値プロット (Fig. 8 における各プロット点) に対して、負荷応力ごとに最小二乗近似直線を求める。
- 3) 2) で得られた最小二乗近似直線を外挿し、Fig. 8 における縦軸 (左側: Channel Length = 0) と各最小二乗近似直線との交点 (切片) の値を求める。この負荷応力ごとの切片の値が、それぞれの負荷応力での接触抵抗 ( $R_C$ ) 値となる (Eq. 2)。

以上の解析結果から、無負荷 (0 MPa) での接触抵抗値が、電流方向と負荷方向が平行な試験片の場合は  $114\text{ k}\Omega$ 、垂直な試験片の場合は  $105\text{ k}\Omega$  であることが分かった。また、曲げ負荷 (引張り方向) によって、いずれの負荷方向の場合も接触抵抗が増加することが分かった。

Fig. 9 には、TLMプロット (Fig. 8) の解析の結果から得られる各曲げ応力 (0 MPa~47 MPa) での接触抵抗値をプロットしている。Fig. 9(a) には電流方向と負荷方向が平行の場合、Fig. 9(b) には電流方向と負荷方向が垂直の場合をそれぞれ示している。Fig. 9 には、併せてそれぞれのチャンネル長におけるソースドレイン間抵抗値も示している。曲げ応力に対する接触抵抗値の変化に着目すると、電流方向と負荷方向が平行な場合、接触抵抗値は  $114\text{ k}\Omega$  (0 MPa) から  $171\text{ k}\Omega$  (47 MPa) に増加した。電流方向と負荷方向が垂直の場合は、接触抵抗値は  $105\text{ k}\Omega$  (0 MPa) から  $127\text{ k}\Omega$  (47 MPa) に増加した。すなわち、電流方向と負荷方向が平行な場合の方が、垂直な場合に比較して、接触抵抗値の増加率が大きいことが分かった。

Fig. 10 および Fig. 11 には、Fig. 9 における 0 MPa および 47 MPa でのソースドレイン間抵抗値を棒グラフとして示しており、このソースドレイン間抵抗値に占める接触抵抗値を白抜き部分として、またチャンネル抵抗値をグレー部分として併せて示している。Fig. 10 には電流方向と負荷方向が平行な場合、Fig. 11 には電流方向と負荷方向が垂直な場合の結果をそれぞれ示している。なお、チャンネル抵抗値は、Eq. 2 の関係から求めている。すなわち、ソースドレイン間抵抗値と接触抵抗値の差分としてチャンネル抵抗値を求めた。

Fig. 10 の結果から、電流方向と負荷方向が平行な場合、初期状態 (0 MPa) から最大荷重 (47 MPa) 負荷での接触抵抗値の変化 (増加) がいずれのチャンネル長でも 50% であるのに対し、チャンネル抵抗値はチャンネル長によって異なり約 270%~380% 増加した。また、Fig. 11 の結果から、電流方向と負荷方向が垂直な場合、初期状態 (0 MPa) から最大荷重 (47 MPa) 負荷での接触抵抗値の変化 (増加) がいずれのチャンネル長でも 21% であるのに対し、チャンネル抵抗値はチャンネル長によって異なり約 210%~430% 増加した。Fig. 10 および Fig. 11 の結果から、いずれの負荷方向の場合も、

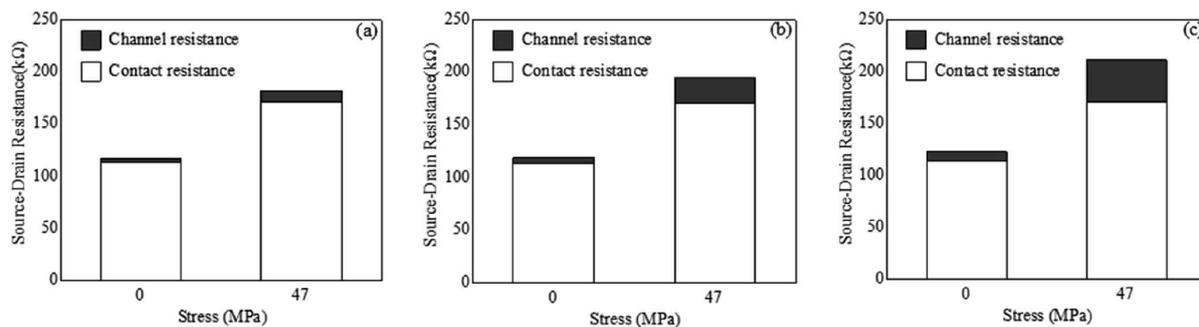


Fig. 10 Contribution of contact resistance and channel resistance in source-drain resistance under parallel load (0 MPa and 47 MPa): channel length of (a) 50  $\mu\text{m}$ , (b) 150  $\mu\text{m}$  and (c) 200  $\mu\text{m}$ .

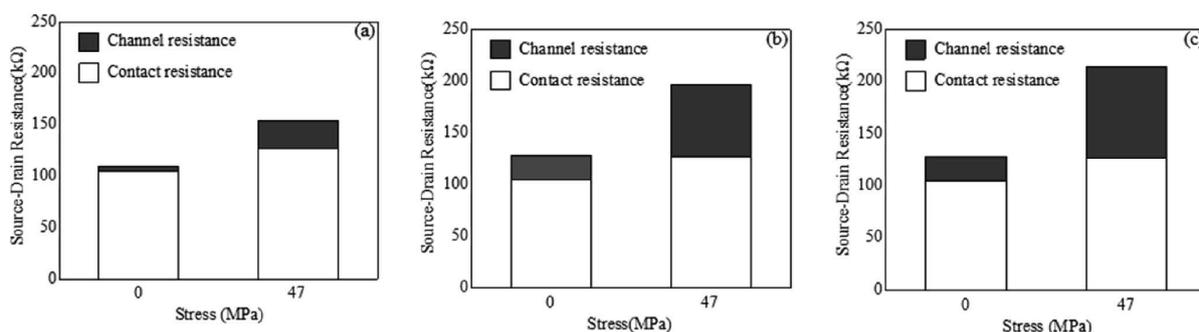


Fig. 11 Contribution of contact resistance and channel resistance in source-drain resistance under perpendicular load (0 MPa and 47 MPa): channel length of (a) 100  $\mu\text{m}$ , (b) 150  $\mu\text{m}$  and (c) 250  $\mu\text{m}$ .

曲げ(引張り)負荷によってチャネル抵抗が増加することが分かった。これは、接触抵抗の増加と合わせて、曲げ(引張り)負荷によるドレイン電流の減少 (Fig. 6 および Fig. 7) に対応している。また、曲げ(引張り)負荷に対する抵抗変化率は、いずれの負荷方向の場合でも接触抵抗よりもチャネル抵抗の方が大きいことが分かった。接触抵抗値は、電流方向と負荷方向の関係によって応力感度が倍以上異なることが分かった。すなわち、平行負荷の方が接触抵抗の変化率が大きい。これは、電極の構造と負荷方向の関係に起因すると考えられる。一方、チャネル抵抗値の応力感度は、負荷方向の違いにおいて接触抵抗値ほどの差は見られなかった。

接触抵抗変化およびその負荷方向依存性の物理的要因は、電極と半導体層との界面の(負荷方向によって異なる)形状変化に伴う劣化(はく離やさらにマイクロな性状の変化)に起因すると考えられるが、詳細は今のところ不明である。今後は、負荷後の OTFT の電極と半導体層界面の顕微鏡観察などを行い、今回得られた曲げ負荷による接触抵抗変化およびその負荷方向依存性の物理的要因を詳細に考察する。

## 6. 結言

本研究では、半導体層としてペンタセンを用いた OTFT に対し、引張り方向の曲げ負荷に起因する電圧-電流特性変動の評価を行った。その際、電極と半導体層との界面で

の接触抵抗変化に着目した。すなわち、異なるチャネル長を有する OTFT を同一基板上に作製し、これらを用いた電気特性変動評価結果に TLM を適用して、接触抵抗変化の影響を評価した。またその際、電流方向と負荷方向が平行となる場合および垂直となる場合で評価を行い、接触抵抗変化における負荷方向の影響を評価した。その結果、いずれの負荷方向の場合も、曲げ(引張り)負荷によって接触抵抗およびチャネル抵抗が増加することが分かった。その際、接触抵抗よりもチャネル抵抗の方が、増加率が大きいことが分かった。負荷方向依存性に関しては、電流方向と負荷方向が平行な場合の方が、垂直な場合に比較して接触抵抗の増加率が大きいことが分かった。さらに、曲げ負荷に対する応力感度は、接触抵抗よりチャネル抵抗の方が大きいことが推察された。今後は、OTFT の電極と半導体層界面の顕微鏡観察などを行い、今回得られた曲げ負荷による接触抵抗変化およびその負荷方向依存性の物理的要因を詳細に考察する予定である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04093 の助成を受けたものです。また、本研究の一部は NIMS 連携拠点推進制度の支援による。

(2025.1.21- 受付, 2025.5.29- 受理)

[2025.7.12- J-STAGE 早期公開]

## 文 献

- 1) A. L. Briseno, S. C. B. Mannsfeld, M. M. Ling, S. Liu, R. J. Tseng, C. Reese, M. E. Roberts, Y. Yang, F. Wudl, and Z. Bao: "Patterning organic single-crystal transistor arrays," *Nature Lett.*, Vol. **444**, No. 14, pp. 913–917, 2006
- 2) H. Yan, Z. Chen, C. Newman, J. R. Quinn, F. Dotz, M. Kastler, and A. Facchetti: "A high-mobility electron-transporting polymer for printed transistors," *Nature*, Vol. **457**, No. 5, pp. 679–686, 2009
- 3) T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk, and T. Someya: "Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability," *Nature Mater.*, Vol. **9**, pp. 1015–1022, 2010
- 4) K. Fukuda, Y. Takeda, Y. Yoshimura, R. Shiwaku, L. T. Tran, T. Sekine, M. Mizukami, D. Kumaki, and S. Tokito: "Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films," *Nature Commun.*, Vol. **5**, No. 4147, 2014
- 5) C. S. Smith: "Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon," *Phys. Rev.*, Vol. **94**, pp. 42–49, 1954
- 6) M. Koganemaru, T. Ikeda, N. Miyazaki, and H. Tomokage: "Experimental Study of Uniaxial-Stress Effects on DC Characteristics of nMOSFETs," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. **33**, No. 2, pp. 278–286, Jun. 2010
- 7) P. Cosseddu, G. Tiddia, S. Milita, and A. Bonfiglio: "Continuous tuning of the mechanical sensitivity of Pentacene OTFTs on flexible substrates: From strain sensors to deformable transistors," *Org. Electronics*, Vol. **14**, pp. 206–211, 2013
- 8) T. Sekine, K. Fukuda, D. Kumaki, and S. Tokito: "Highly stable flexible printed organic thin-film transistor devices under high strain conditions using semiconducting polymers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **54**, No. 04DK10, 2015
- 9) 中城朋也, 小金丸正明, 宍戸信之, 関根智仁, 神谷庄司, 池田 徹: "1 軸引張り負荷下での印刷有機薄膜トランジスタの電気特性評価," 第 28 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, Vol. **28**, pp. 339–442, 2018
- 10) 中島太聖, 中城朋也, 小金丸正明, 関根智仁, 宍戸信之, 神谷庄司, 三成剛生, 池田 徹, 時任静士: "有機薄膜トランジスタの曲げおよび面外圧縮負荷による電気特性変動," 第 27 回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム論文集, Vol. **27**, pp. 145–148, 2021
- 11) V. Scency, P. Cosseddu, A. Bonfiglio, I. Salzmänn, N. Severin, M. Oehzelt, N. Koch, and J. P. Rabe: "Origin of mechanical strain sensitivity of pentacene thin-film transistors," *Organic Electronics*, Vol. **141**, pp. 1323–1329, 2013
- 12) T. Sekine, K. Fukuda, D. Kumaki, and S. Tokito: "The effect of mechanical strain on contact resistance in flexible printed organic thin-film transistors," *Flex. Print. Electron*, Vol. **1**, 035005, 2016
- 13) 野田 啓: "有機半導体実験のコツ," *応用物理*, Vol. **86**, No. 1, pp. 51–54, 2017

## 著者紹介



井上将太郎 (いのうえ しょうたろう)  
2022 鹿児島大・機械卒。2024 鹿児島大・機械修士課程修了。



小金丸正明 (こがねまる まさあき)  
1992 九大・応用原子核卒。1994 九大・総理工修士課程修了, 福岡県工業技術センター入庁。2008 京都大学博士(工学)。2016 鹿児島大准教授。2025 鹿児島大学教授。電子実装の信頼性評価に関する研究に従事。エレクトロニクス実装学会, 日本機械学会, 電子情報通信学会会員。



三成剛生 (みなり たけお)  
1999 東大・化学卒。1999 凸版印刷入社。2006 京大・化学博士後期課程修了・博士(理学)。2006 理研・基礎科学特別研究員。2009 NIMS MANA 研究者。2012 NIMS 独立研究者。2020 NIMS プリントエレクトロニクス G グループリーダー。有機半導体デバイスおよびプリントエレクトロニクスに関する研究に従事。

北口絵理 (きたぐち えり)  
物質・材料研究機構



池田 徹 (いけだ とおる)  
1986 九大・化学機械卒, 1992 九大・化学機械修士課程修了, 1992 九大助手, 1996 九大助教授。2004 京大助教授。2012 年より現職。界面と接着の破壊力学に関する研究, 電子デバイス実装の強度信頼性評価に関する研究に従事。エレクトロニクス実装学会, 日本機械学会, 日本材料学会, 日本接着学会, 計算工学会, ASME 会員。