

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760024

研究課題名（和文） 4プローブ装置による有機半導体の3次元電気抵抗マッピングと解析

研究課題名（英文） Three-dimensional mapping of electrical transport characteristics in organic semiconductors using independently-driven four-probe method

研究代表者

吉本 真也（YOSHIMOTO SHINYA）

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：90507831

研究成果の概要（和文）：本研究では有機半導体のトランジスタ特性（FET 特性）を測定する新たな手法として、独立駆動型4探針装置を用いた測定手法を新たに開発し、実際に有機半導体薄膜のFET特性を測定することに成功した。独立駆動型4探針装置は試料の任意の場所の局所的な特性を非破壊測定可能であり、この手法を用いて多結晶ペンタセン薄膜の単一グレインの移動度を直製測定することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：We have developed an independently driven four-probe method to investigate field-effect transistor (FET) characteristics in organic semiconductors. The independently driven four-probe method enables us to investigate local FET characteristics in organic semiconductors without damaging the samples. We demonstrated four-probe FET measurement on a pentacene thin film, and we have succeeded to obtain single grain mobility in the polycrystalline pentacene film.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：表面・界面物性、有機薄膜、有機半導体、電気伝導、4探針

1. 研究開始当初の背景

(1) 多探針走査プローブ顕微鏡装置は、超高真空中でその場作製した試料に対し複数の探針を任意の場所に電氣的接触させることで試料を破壊することなく試料の電気伝導特性を測定可能な装置であり、マイクロ・ナノメートルスケール物質の新たな電気伝導測定手法として注目されていた。研究開始時点では我々を含めいくつかの研究グループがナノメートルスケールの多探針電気伝導測定に成功し[1]、また市販品も販売され始める

など、実験手法として確立しつつある状況にあった。しかし、報告の多くは装置開発に関わる内容であり、金属吸着表面超構造やシリサイドナノワイヤ、カーボンナノチューブなど限られた分野、特に無機物系に应用例が集中していた。

(2) 一方、有機半導体はシリコンに代わる新たなデバイスとなりうることから、多くの研究がなされていた。その中でも本研究と関連した手法として、ケルビンプローブ法を用いた表面電位マッピングや固定電極を用いた4

端子電気伝導測定法が存在していた。これらの結果から電極-半導体接合部のショットキー障壁や半導体-ゲート誘電体界面のトラップ準位などの形成がデバイスの特性を決定してしまっていることが判明しており、有機半導体研究において電気伝導度の空間分布の測定は非常に重要な課題となっていた。しかし、試料内部の情報、特に深さ方向の電気抵抗分布や多結晶試料の単一結晶粒内部・単一結晶粒界の電気伝導特性などはこれらの手法からは特定することが出来なかった。

[1] S. Yoshimoto, *et al.*, Nano Lett. **7**, 956 (2007).

2. 研究の目的

独立駆動型4探針装置を有機半導体の電気伝導特性評価に初めて応用し、特に以下のような有機半導体内部の電気伝導特性を明らかにすることを目的とした。

(1) 多結晶の有機半導体薄膜に対して4探針電気伝導測定を行い、単一結晶粒内部や単一結晶粒界の電気伝導特性を評価する。

(2) 有機半導体に対して詳細な4探針電気伝導測定を行うことで、試料内部の抵抗率の3次元マッピングを行う。

3. 研究の方法

本研究では、東大物性研吉信研究室において研究代表者が中心となって開発した独立駆動型4探針装置を用いた。(図1)

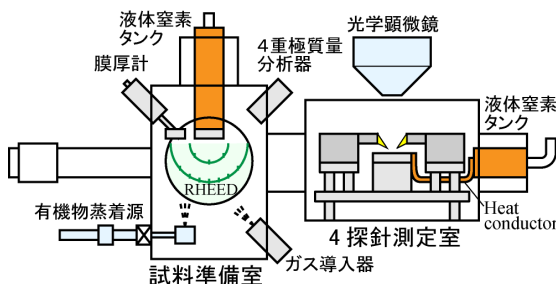


図1：独立駆動型4探針装置の模式図

4探針プローブ部は株式会社ユニソクのUP2000-4Pを用いており、私は試料準備室および探針制御/電気伝導測定用の電子回路/プログラムを作製した。本装置の特徴は、有機物へのダメージを減らすため一般に4探針装置で用いられる走査型電子顕微鏡ではなく光学顕微鏡(分解能約 $3\mu\text{m}$)を用いたこと、絶縁体表面上でのトランジスタ特性測定のために操作型トンネル顕微鏡(STM)とは異なる探針制御系・測定系を持つこと、昇華温度の低い有機物も超高真空中で蒸着可能にするためゲートバルブで仕切られた蒸着源を持つことなどである。低温での試料作製や電気伝導特性の温度依存性測定を可能にするため、液体窒素により試料準備室は120 Kまで、測定室は160 Kまで冷却可能である。

本研究では主に上記の装置を用いて以下のような研究開発を行った。

(1) 「有機物蒸着装置の開発」

有機半導体薄膜の作製条件を最適化させるため、独立駆動型4探針装置とは別個に有機分子薄膜作製専用の真空装置を作製し、市販の走査型原子間力顕微鏡(AFM)を用いて有機薄膜の評価を行った。有機物の蒸着にはニクロム線のヒーターを巻いた石英セルを用い、真空排気系にオイルフリーのポンプ(ドライポンプ及びターボ分子ポンプ)のみを用いることで、不純物の混入を極力押さえる工夫をした。

(2) 「独立駆動型4探針装置を用いたトランジスタ特性測定のための新たな測定回路開発」

研究成果の項で詳細に述べるが、本研究では独立駆動型4探針装置を用いて有機半導体のトランジスタ特性を測定するためには通常の4端子測定では再現性が得られないことが判明したため、有機半導体のチャンネル層の電位を一定に保つようなフィードバックを有する測定回路を開発し、この問題を解決した。

(3) 「独立駆動型4探針装置を用いたペンタセン薄膜のトランジスタ特性測定」

先に述べた回路を用いて多結晶ペンタセン薄膜に対してトランジスタ特性を測定した。

4. 研究成果

(1) 本研究で作製した有機物蒸着装置を用いて100nm熱酸化膜付きシリコン基板上に50nmのペンタセン薄膜試料を作製し、独立駆動型4探針装置によって電界効果トランジスタ特性(FET特性)の測定を行った。そのときの測定結果を図2および図3に示す。

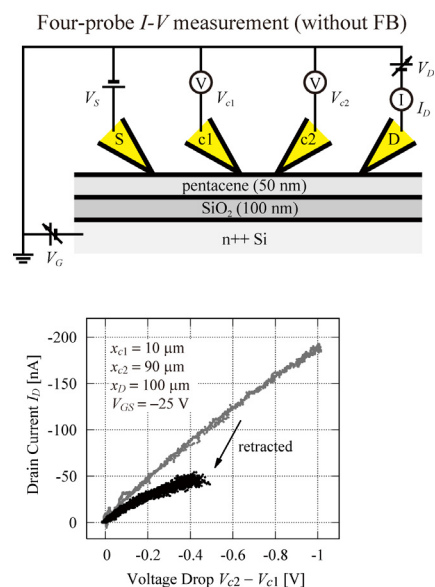


図2：ペンタセン薄膜の4探針測定(FBなし)

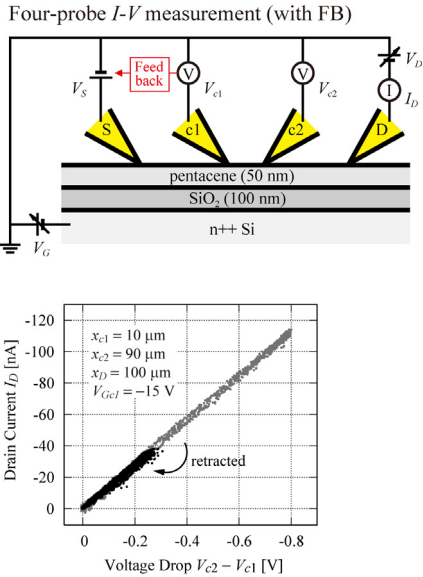


図 3 : ペンタセン薄膜の 4 探針測定 (FB あり)

図 2 は通常の 4 端子測定と同じ条件で FET 特性を測定したときの測定の模式図と 4 端子 I-V 特性である。4 端子 I-V 測定では 2 本の結果が示されているが、これはソース探針をあえてリトラクトし接触抵抗を変化させたときの測定結果を示したものである。このように、通常の抵抗測定とは異なり、ゲート電圧依存性を含む FET 特性測定では探針-有機半導体間の接触抵抗が変化すると有機半導体のバックゲートに対するポテンシャルが変化してしまい、4 端子測定においても接触抵抗の変化が測定結果に影響を与えてしまうため、再現性のある測定が不可能であることが判明した。

そこで、電位測定探針の電位が一定になるようなフィードバックを電流探針にかけながら測定するという新たな測定手法を開発した。そのときの測定の模式図及び測定結果を図 3 に示す。図 2 と同様にソース探針の接触抵抗を変化させても再現性のある結果が得られた。以上のように、4 探針装置を用いて再現性のある FET 特性を測定する手法の開発に成功した。

(2) 本研究で開発したフィードバックを用いた 4 探針測定手法でペンタセン薄膜上の探針配置依存性を測定し、グレイン境界や単一グレインの FET 特性を測定した結果を図 4 および図 5 に示す。この測定ではソース探針 (S) からドレイン探針 (D) に電流を流し、チャンネル探針 (c1, c2) で電位降下を測定した。バックゲート電圧と c1 電圧の差 (V_{Gc1}) が一定となるようにフィードバックをかけて測定し、c2 探針の位置を変化させたときのそれぞれの 4 端子抵抗の値をプロットした。

図 4 はグレイン境界の抵抗が高い部分での測定結果であり、探針 c2 がグレイン境界を

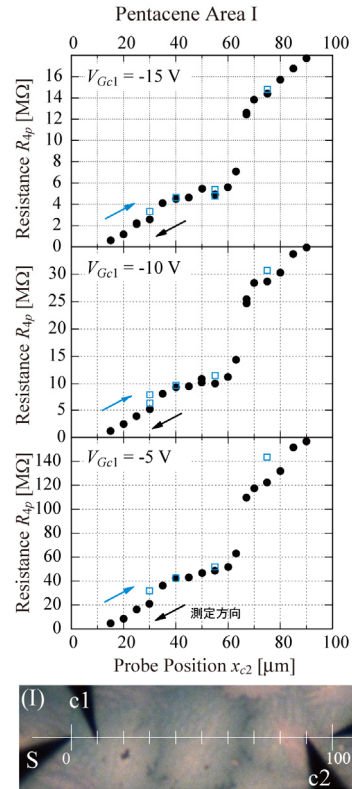


図 4 : ペンタセン薄膜の FET 特性測定-グレイン境界の抵抗が高い場合

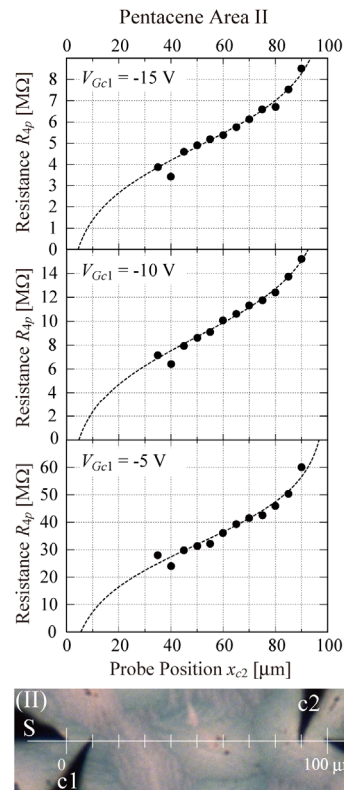


図 5 : ペンタセン薄膜の FET 特性測定-グレイン境界の抵抗が低い場合

またいだときに抵抗値が大きく変化しているのがわかる。また、図5は逆にグレイン境界の抵抗値がグレイン内部の抵抗値と同程度もしくはそれより小さい場合の測定結果である。この場合の測定結果は滑らかな曲線を描いた。この結果を等方的な2次元電気伝導を仮定してフィッティングを行うと図5の実線となり、これは測定結果と非常によく一致した。これらから、図5の部分ではペンタセンのグレイン内部の移動度が $0.25 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ と求められた。

この結果は、「5. 主な発表論文等」〔学会発表〕②の国際会議 ISSS-6 においてポスター賞を受賞し、国際的にも高い評価を得た。

(3) 今後の課題や展望

以上のように、研究目的(1)に掲げた単一結晶粒界や単一結晶粒の特性測定には成功したが、一方で(2)の3次元的な電気伝導度マッピングができるまでには至っていない。これは、当初予定していなかった、4探針装置を用いた新たな測定手法を開発する必要があったためである。

当初の研究目的の一部は達成できなかったが、本研究で開発した測定手法は広く一般の4端子測定にも応用の効く手法であり、有機半導体のFET特性評価に非常に有用であると考えられる。今後より詳細に探針配置依存性測定を行っていくことで、研究目的(2)の研究を可能にしていきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① S. Yoshimoto, T. Tsutsui, K. Mukai, and J. Yoshinobu: "Independently driven four-probe method for local electrical characteristics in organic thin-film transistors under controlled channel potential" Review of Scientific Instruments **82**, 093902 (6 pages) (2011) 査読有.

〔学会発表〕(計2件)

- ① 吉本真也, 亀島一輝, 向井孝三, 吉信淳: "独立駆動型4探針装置によるペンタセン薄膜のトランジスタ特性測定" 日本物理学会 第66回年次大会, 平成23年3月28日, 新潟大学(震災による中止のため、大会用資料公開サイトで平成23年5月6日~8月31日の期間資料公開).
- ② S. Yoshimoto, T. Tsutsui, K. Mukai, and J. Yoshinobu "Independently driven four-probe measurement in pentacene organic thin-film transistors under

controlled channel potential" The 6th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-6), 2011年12月12日, 東京都江戸川区船堀.

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉本 真也 (YOSHIMOTO SHINYA)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号: 90507831

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし