

2022年6月21日

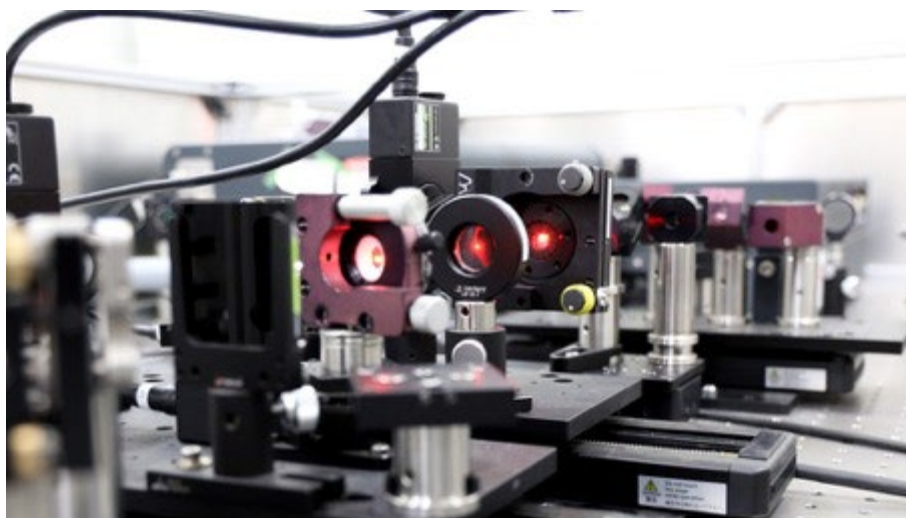
報道関係者各位

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構  
国立大学法人筑波大学

## 有機トランジスタの動きを動画に －電子の流れをイメージング－

### 本研究成果のポイント

- 有機半導体中の電子を高効率で検出できるフェムト秒光電子顕微鏡装置の開発
- 有機トランジスタが動作するときの電子の動きを初めて可視化し、動画作製
- 多値演算素子として期待される有機アンチアンバイポーラートランジスタの動作原理を解明
- フェムト秒光電子顕微鏡装置は、多くの半導体デバイスに適用されると期待



### 【概要】

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所の福本恵紀 特任准教授は、筑波大学 数理物質系の山田洋一 准教授・同 応用理工学学位プログラム 修士2年の竹入総一郎氏らと共同で、フェムト秒パルスレーザー<sup>\*1</sup> (図1) を励起光源とする光電子顕微鏡<sup>\*2</sup>法(フェムト秒光電子顕微鏡)を用い、トランジスタの動作環境下における伝導電子の動きの可視化に世界で初めて成功した。

物質・材料研究機構 (NIMS) 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA) の早川竜

馬 主幹研究員と若山裕副拠点長らが開発した、2種類の有機材料を利用することで、室温で負性抵抗を示すアンチアンバイポーラートランジスタ<sup>\*3</sup>(AAT)は、従来の有機集積回路の性能を飛躍的に向上させる多値論理回路へ応用できるため、近年注目されている。この負性抵抗トランジスタ<sup>\*4</sup>では、半導体界面（n型半導体とp型半導体が形成する界面）が電子の流れを制御するバルブに相当する。その界面の役割を可視化することにより、動作原理の解明に成功した。新規に開発されたトランジスタの動作原理を、これまでになかった装置で解明したこの成果の社会的なインパクトは大きい。有機トランジスタだけでなく、太陽電池、発光素子などその他の半導体デバイスに適用できることが期待される。

この研究成果は、Advanced Materials 誌オンライン版に5月30日掲載された。

## 【背景】

生活に不可欠な存在となっているトランジスタや太陽電池、LEDなどの半導体デバイスは、電荷キャリアである電子と正孔が動くことで動作している。しかし、これまでは、半導体中の電子の動きを可視化する技術が存在しなかったため、その動きは電氣的に観測するのみだった。トランジスタ動作が観測されて約70年経つが、半導体デバイス内の局所的な電荷キャリアの動きは解明されなかった。

本研究では、室温で負性抵抗(NDR)と呼ばれる特殊な電流特性を示すトランジスタを対象としている。NIMS MANAで開発され、現在のSiデバイスでは達成できないウェアラブルデバイスなど軽くて曲げられるフレキシブルデバイスとして注目されているが、その動作原理の解明は始まったところである。

## 【研究内容と成果】

KEKの福本恵紀 特任准教授は、光子エネルギーが紫外光領域で可変となるフェムト秒レーザーパルス光源とする光電子顕微鏡装置(フェムト秒光電子顕微鏡)を構築し、半導体内の伝導電子を高効率で検出できる手法を開発してきた。最近の研究から、有機薄膜など絶縁体に近い材料においても、試料帯電を抑制して伝導電子を画像化できることが判明している。今回この手法を応用して、有機トランジスタのオペランド観察<sup>\*5</sup>を行い、動作解明を試みた。

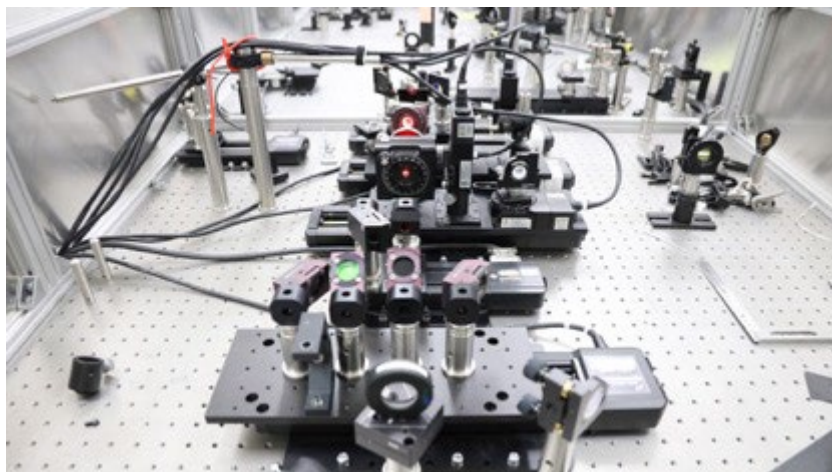


図 1: 本研究で使ったレーザー光源の写真

近赤外光から紫外光の領域(0.5 から 6 eV)で連続的に光子エネルギー可変

本研究で測定した有機トランジスタはn型のPTCDI-C8とp型の $\alpha$ -6Tの有機半導体薄膜で構成され、従来のトランジスタ構造とは異なり、ソース電極とドレイン電極の間に、p型とn型の有機半導体からなる界面があり(図2(a))、ゲート電圧のオン・オフにより、電子の流れのバルブの役割を果たしている。そのバルブは、空乏層と呼ばれ、半導体デバイスの心臓部となる。

これまでは、電気特性からその機能は理解されてきた。今回、オペランド観測により空乏層を可視化して、トランジスタの動作解明に成功した。図2(b)が、ゲート電圧( $V_G$ )に依存するソース-ドレイン間の電流量であり、 $V_G = 3$  Vで電流の最大値を示す(負性抵抗)。それぞれの測定点で、光電子顕微鏡像を撮影し、そのうち3つを図2(c)(d)(e)に示す。ソース電極とドレイン電極の間のコントラストがゲート電圧に依存して変化しているのが見て取れる。これらが、トランジスタ内の電子の分布を表す。図2(d)では、pn界面近傍の電子がその界面に流れ込み、電子密度が低くなるため暗いコントラストの領域が表れる。つまり、空乏層を介して、電子がn型からp型に流れていることを示す。一方、図2(e)では、n型半導体にソース電極から電子が注入されているものの、空乏層が電子の流れを遮蔽するように働いているため、電流は流れない。

以上のように、トランジスタ内の電子の分布を可視化し、空乏層の役割を明確にすることで、本トランジスタの動作原理が明らかとなった。

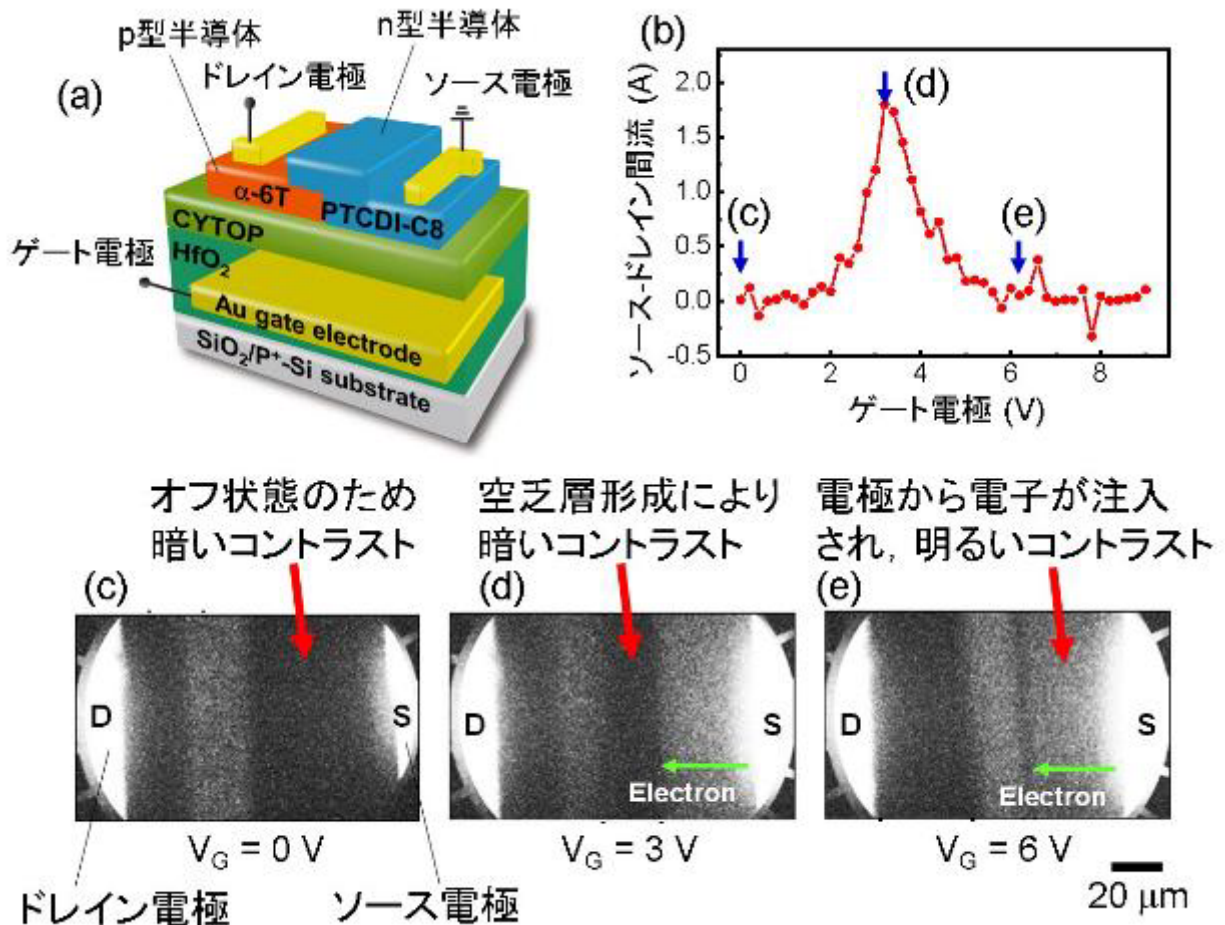


図 2: (a) 有機トランジスタの概略図 (b) 電流-電圧曲線  
(c), (d), (e) 光電子顕微鏡像 @  $V_G = 0, 3, 6$  V

< 論文名 >

Carrier Transport Mechanism in Organic Antiamipolar Transistors Unveiled by Operando Photoemission Electron Microscopy

雑誌名 *Advanced Materials* 5月号 (オンライン版 5月30日)

<https://doi.org/10.1002/adma.202201277>

## 【本研究の意義、今後への期待】

本研究で測定した有機トランジスタの特徴的な電圧-電流特性は、精密に材料の組成と組み合わせを設計した結果である。その組成・組み合わせは無数にあることが有機材料を利用することの特徴である。有機材料だけでなく、同様に半導体デバイス設計に自由度がある2次元材料である遷移金属ダイカルコゲナイドへの応用も期待されている。パワー半導体動作の直接観測へも応用可能で、より効率の高い次世代パワー半導体の開発につながる。

半導体デバイスの心臓部であるpn界面が形成する空乏層の可視化に成功したことで、デバイス特性と材料特性を同時に観測することが可能となった。本研究の手法によりデバイス開発のスピードアップが期待される。

本研究は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118068681、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR203P、JSPS科研費 19H00866、21F21052、17H06372、21H01752、20H02808の助成を受けたものです。

## 【用語解説】

### ※1. フェムト秒パルスレーザー

フェムト ( $10^{-15}$ ) 秒の時間幅で発振するレーザー。尖頭値が高いことが特徴である。これにより、光学非線形過程を利用して、光子エネルギーの変調が可能となっている。

### ※2. 光電子顕微鏡

測定する試料に光、または電子を照射し、光電効果により放出される光電子を検出する。場所により異なる光電子放出量で結像される。

### ※3. アンチアンバイポーラートランジスタ

p型半導体とn型半導体をチャンネル中央部で一部分重ね合わせた構造を持つトランジスタ。ある一定以上のゲート電圧を印加するとドレイン電流が減少する負性抵抗と類似した特性を示す。これは、p型トランジスタとn型トランジスタを直列接続回路とみなすことができるため、両方のトランジスタがON状態のときにだけドレイン電流が流れ、どちらか片方のトランジスタがOFF状態のときにドレイン電流が減少することに起因する。このような負性抵抗と類似したドレイン電流の増減現象を室温で観測できるため、様々なデバイス応用が検討されている。

#### ※4. 負性抵抗トランジスタ

ある一定以上のゲート電圧あるいはドレイン電圧を印加するとドレイン電流が減少する負の電気抵抗を示すトランジスタの総称。p型半導体とn型半導体を接合したpn接合界面を流れるトンネル電流により負性抵抗が発現するためこれまで低温領域でのデバイス動作に限られてきた。

#### ※5. オペランド観察

半導体などの材料やデバイスが機能している動作下での直接的な計測や観測。