

有機トランジスタを使った多値論理演算回路の開発に成功 ～フレキシブルエレクトロニクスの高性能化に期待～

配布日時：平成30年7月2日14時

解禁日時：平成30年7月2日15時

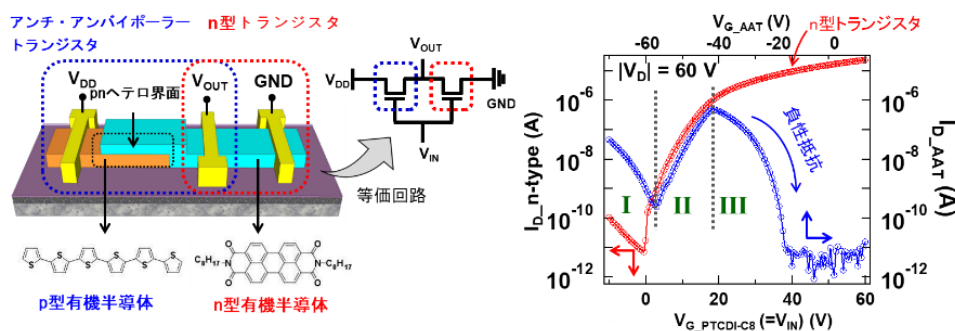
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. 物質・材料研究機構（以下NIMS）は、2種類の異なる有機トランジスタを組み合わせることで、3つの値をスイッチできる多値論理演算回路の開発に成功しました。本成果は、高集積化が困難だった有機トランジスタの弱点を克服し、大幅な計算機能の向上に寄与することが期待されます。

2. 軽くて柔らかい有機材料を使った電子素子は、印刷技術を使って大面積の素子を製造でき、持ち運びもしやすいことから、直接身につけて汗や心拍数をモニターするデバイスが開発されています。さらに、IoT社会における大量のデータ処理や高速通信に対応するため、有機トランジスタの飛躍的な特性向上が望まれています。しかし有機材料にはこれまでの半導体デバイス開発で養われてきた微細加工技術が適用できず、素子の微細化や高集積化ができないため、高性能化を図るためには従来とは異なる手法を確立しなければなりません。

3. そこで本研究グループは、ゲート電圧を一定以上に増加させるとドレイン電流が減少するという特殊なトランジスタ（アンチ・アンバイポーラートランジスタ）を、通常のトランジスタと組み合わせた素子を開発しました（下図参照）。ゲート電圧が低いときにはアンチ・アンバイポーラートランジスタに多くの電流が流れます（下図右の領域I）。そこから徐々にゲート電圧が増加すると、二つのトランジスタに同程度の電流値が流れる電圧範囲が現れます（領域II）。さらにゲート電圧を上げると、アンチ・アンバイポーラートランジスタに流れる電流が減少するため、電流値の大小が逆転します（領域III）。



4. 今回開発した独自の素子構造では、このように異なる電流特性を示す2種類のトランジスタを組み合わせることで、3つの値のスイッチングを実現できました。これにより複数の出力値を制御する多値論理演算回路の開発も可能になります。これを応用すれば、たとえひとつのトランジスタのサイズは同じでも、集積度とデータ処理能力を大幅に向上させることができます。今後はこの成果を応用し、これまで有機材料が苦手としてきた高集積化を克服し、柔らかさと高いデータ処理能力を兼ね備えた新しい有機トランジスタの開発を進めます。

5. 本研究は、NIMS 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点量子デバイス工学グループの若山裕グループリーダーと早川竜馬主任研究員らの研究チームによって行われました。また本研究は、科研費挑戦的萌芽研究「分子超格子を使った分子トンネル素子の開発」の一環として行われました。

6. 本研究成果はアメリカ化学会が発行する Nano Letter 誌に平成30年7月2日オンライン版にて掲載されます。

研究の背景

有機トランジスタ⁽¹⁾の研究は1990年代から進められて、近年では印刷技術を使った大面積のフレキシブルエレクトロニクス⁽²⁾の開発に発展してきます。軽くて柔らかく持ち運びもしやすいことから、いつでもどこでもインターネットと繋げられるIoT⁽³⁾社会の中心的な役割を担うと期待されています。この利点を活かして直接肌につけられる素子、いわゆるウェアラブル素子も開発されています。しかし現状ではセンサーやモニターなどの簡便な機能に限られています。これに対し将来必要とされる大量のデータ処理や高速通信を実現するためにはトランジスタのデータ処理能力を飛躍的に向上させなければなりません。しかし有機材料には電子線リソグラフなどの微細加工技術が適用できないという短所がありました。素子の微細化や高集積化ができないため、これまでとは異なる手法で高性能化を図らなければなりません。

これに対し本研究グループは新しい原理で動作するトランジスタを開発することにより、高集積化を可能にする道を開きました。従来のトランジスタでは(0,1)の2つの値をスイッチするものでしたが、我々のトランジスタでは(0, 1/2, 1)と3つの値をスイッチすることができます。これを多値トランジスタ⁽⁴⁾といいます。これができればたとえひとつのトランジスタのサイズは同じでも、集積度とデータ処理能力を大幅に向上させることができます。これを可能にしたのが電圧を増加したときに電流が減少するという特殊な現象です。このような電流の増減は一般に「負性抵抗」⁽⁵⁾として知られてきました。今回の研究ではこれと類似する電流の増減が有機トランジスタを使って制御することができたため、フレキシブルエレクトロニクスの新しい可能性が開けたと言えます。

研究内容と成果

今回、物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点の量子デバイス工学グループでは、通常のn型トランジスタに加えてゲート電圧を増加したときドレイン電流が減少する特殊なトランジスタを組み合わせることによって複数の値をスイッチングできる多値トランジスタを開発しました。この素子構造を図1に示します。

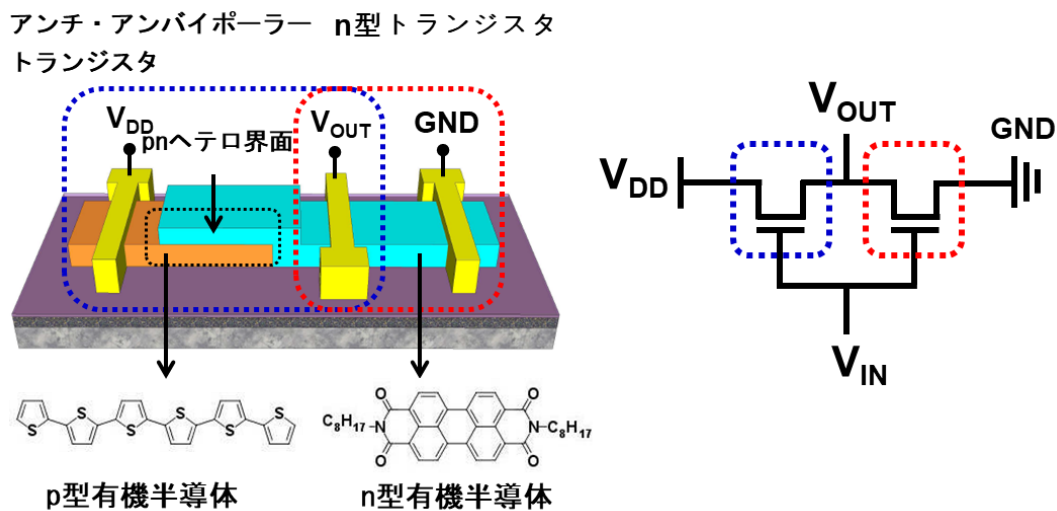


図1 素子構造と有機半導体の分子構造(左図)およびその等価回路(右図)。アンチ・アンバイポーラートランジスタの中心はp型とn型の有機半導体が接合したpnヘテロ界面が形成されている。これとn型トランジスタを組み合わせている。

最も重要なことはp型半導体とn型半導体を接合したpnヘテロ界面⁽⁶⁾がトランジスタチャネルの中心部に形成されていることです。ここではゲート電圧を徐々に増加させたとき、p型とn型のチャネルにバランスよく電圧が分配されるような特定の電圧範囲だけドレイン電流が流れます。すなわちゲート電圧をある一定値以上に増加させるとドレイン電流が逆に減少するという現象が現れます。このトランジスタはアンチ・アンバイポーラートランジスタのと呼ばれ、その電流特性が負性抵抗に類似することから論理演算回路に活用できる新しいトランジスタとして期待されています。しかしシリコンなどの従来の半導体では欠陥が少なく原子レベルで急峻なヘテロ界面の作製が困難であるため未だ実現されていません。一方、有機半導体なら異種分子の薄膜を積層するだけで可能になりました。

負性抵抗を使えば集積度を向上させることができるとの提案は実は今に始まったわけではありません。しかし従来のシリコンや化合物半導体を使った負性抵抗素子では、多くの場合トンネル電流を制御して電流を増減させています。そのため低温に冷やさなければ電流の増減幅は 30 倍程度に留まっていた実用化には遠く及ばないのが実情でした。これに対し今回の研究では電流を制御する原理が根本的に異なり、p 型と n 型の二つのチャンネルのオン状態とオフ状態を制御することにより電流の増減を可能にしています。そのため 1000 倍にも及ぶ世界最高の増減幅を、室温で実現することができました。

この特異的な電流の増減と通常の電流特性を図 2 に示します。まずゲート電圧が低いときにはアンチ・アンバイポーラートランジスタに多くの電流が流れます (電圧領域 I)。そこから徐々にゲート電圧が増加すると、二つのトランジスタに同程度の電流値が流れる電圧範囲が現れます (電圧領域 II)。さらにゲート電圧を上げるアンチ・アンバイポーラートランジスタに流れる電流が減少するため、電流値の大小が逆転します (電圧領域 III)。このようにゲート電圧を増加させると二つのトランジスタに流れる電流量の大小が変移します。このときゲート電圧を入力値 (V_{IN})、中央の電極で測定される電圧を出力値 (V_{OUT}) とすると、図 3 示すような入力-出力特性が得られ、(0, 1/2, 1)の多値スイッチングが実現できます。

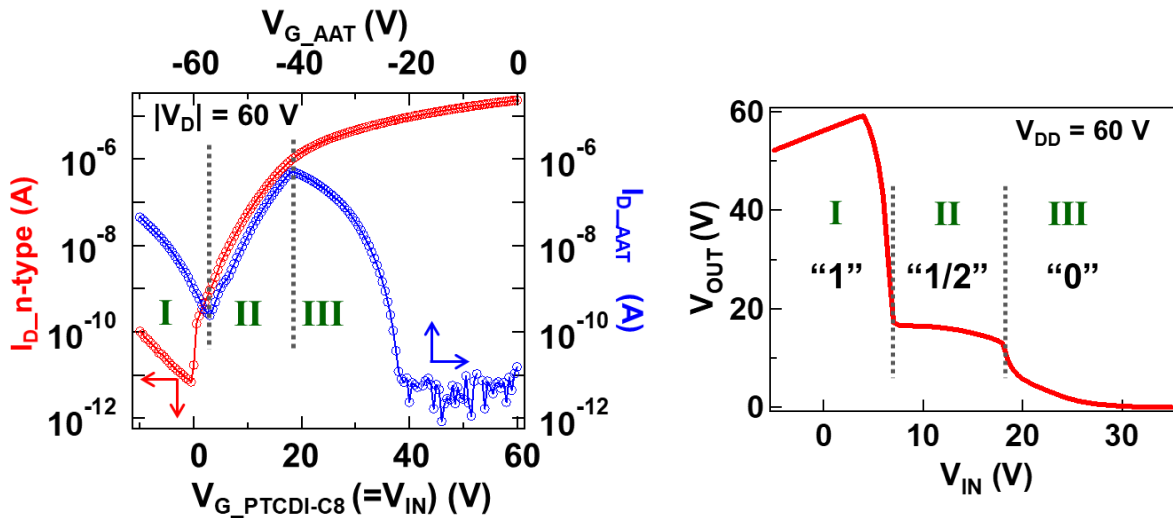


図 2 アンチ・アンバイポーラートランジスタ (AAT)の電流特性(I_{D_AAT} : 青線)と n 型トランジスタの電流特性(I_{D_n-type} : 赤線)。ゲート電圧を電圧領域 I から III へと徐々に増加するとドレイン電流量(I_D)の大小が変移する。

- I: $I_{D_n-type} < I_{D_AAT}$
- II: $I_{D_n-type} = I_{D_AAT}$
- III: $I_{D_n-type} > I_{D_AAT}$

図 3 入力(V_{IN})-出力(V_{OUT})特性

入力値(V_{IN} =ゲート電圧)の変化に伴い二つのトランジスタに流れるドレイン電流の大小が変移する (図 2)。この変移に伴い中央の電極に現れる出力値 (図 1 の V_{OUT})が(1, 1/2, 0)三つの値に変移する。

このトランジスタは簡便な真空成膜法で作製できることも特長の一つといえます。そのためチャンネルの長さや幅といった素子構造や、電極やゲート絶縁膜といった構成材料を自由に変えることができます。これにより、2 桁以上の大幅な電圧低減や、0.1V 単位の精密な駆動電圧の設計も実現できています。

今後の展開

負性抵抗という現象が論理演算回路やメモリ素子に応用できるとの提案は古くからありました。無機半導体を使ったエサキダイオードや共鳴トンネリング素子はその代表例です。しかし性能が不十分であったり、動作温度が低温に限られたりなどの欠点から長年実用化の目処が立ちませんでした。しかし今回の素子で桁違いの特性が室温で実現できました。しかも有機半導体でこれを実現できたため、有機エレクトロニクスが不得意としてきた高集積化の解決の糸口がつかめました。これによりフレキシブルエレクトロニクスの新しい可能性が開けたと言えます。

掲載論文

題目：Multi-valued logic circuit based on organic anti-ambipolar transistor

著者：小橋和義、早川竜馬、知京豊裕、若山裕

雑誌：Nano Letters

掲載日時：平成30年7月2日午前1時（現地時間、日本時間2日午後3時）

用語解説

1) 有機トランジスタ

π 共役系有機半導体をトランジスタチャンネル層として用いた薄膜トランジスタ。有機半導体材料が溶媒に可溶な場合は印刷技術でトランジスタ回路を作製できる。

2) フレキシブルエレクトロニクス

プラスチック基板など柔らかな基板材料の上に電子回路を設計したエレクトロニクス。柔らかくて軽量であるため持ち運びに便利、製造コストが低減できるなどの利点がある。

3) IoT

Internet of Things の略。あらゆる物(Things)がインターネットに接続されて情報やデータの通信が可能になる仕組み。

4) 多値トランジスタ

通常のトランジスタ素子が(0, 1)の2つの値をスイッチングするのに対し、(0, 1, 2,...)といった3つ以上の値をスイッチングできるトランジスタ。これにより集積度を大幅に向上させることができる。

5) 負性抵抗

電圧を増加したとき、電流が減少する現象。見かけ上、電気抵抗が負の値をとる。

6) pnヘテロ界面

正の電荷（正孔）を流すp型半導体と負の電荷（電子）を流すn型半導体が接続した界面。

7) アンチ・アンバイポーラートランジスタ (anti-ambipolar transistor)

ゲート電圧を変化させたとき、その電圧によってp型とn型の両方の電流特性が得られるトランジスタをアンバイポーラートランジスタという。この場合、正孔と電子の流れが広い電圧範囲で検知される。これに対し、特定の電圧範囲だけで電流の増減が検知されるトランジスタをアンチ・アンバイポーラートランジスタという。電流特性を示すカーブがちょうどアンバイポーラートランジスタと上下逆に見えるためこう呼ばれる。ある特定のゲート電圧以上になるとドレイン電流が減少する様子は負性抵抗と類似する。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 量子デバイス工学グループ

副拠点長 若山 裕（わかやま ゆたか）

E-mail: WAKAYAMA.Yutaka@nims.go.jp

TEL: 029-860-4403

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 量子デバイス工学グループ

主任研究員 早川 竜馬（はやかわ りょうま）

E-mail: HAYAKAWA.Ryoma@nims.go.jp

TEL: 029-860-4808

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp