



応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 3月 13日

結晶相転移接合トランジスタの作製

Demonstration of vertical crystal phase junction transistor

ナノ結晶が生み出す まったく新しい接合のトランジスタ

北海道大学情報科学研究院 量子集積エレクトロニクス研究センター
富岡 克広、勝見 悠、木村 峻、蒲生 浩憲、本久 順一

【発表概要】

- ・ インジウムリン (InP) ナノワイヤによる、結晶相転移接合トランジスタを作製。
- ・ 独自の垂直ゲートオールアラウンド (Vertical gate-all-around: VGAA) 構造作製技術を応用し、結晶相転移ヘテロ接合 (crystal phase heterojunction: CPHJ) を用いたスイッチング動作を実証。
- ・ トランジスタの長い歴史に新しい接合の概念を提供、今後の幅広い応用が期待される。

北海道大学情報科学研究院および量子集積エレクトロニクス研究センターの富岡克広氏らの研究グループは、ナノワイヤ材料によるLEDやトランジスタをはじめとした、社会実装を前提としたデバイス応用研究を進めてきた。同研究グループは、これまでに進めてきた縦型構造のトランジスタを作製するプロセス技術「垂直ゲートオールアラウンド (Vertical gate-all-around: VGAA) 構造作製技術」を用いてナノワイヤ材料のインジウムリン (InP) の「結晶相転移ヘテロ接合」を利用した縦型構造のトランジスタを作製し、動作原理を実証した。トランジスタ研究分野の長い歴史において、これまでにない新しい接合で動くトランジスタの開発に成功した。

【詳細】

設計自由度の高い半導体材料、ナノワイヤ

線状のナノ構造を持つ「ナノワイヤ」は、太陽電池やLEDなどの光デバイス、センサーやメモリ材料への応用が進められている半導体ナノ材料だ。また、次世代集積回路への応用として、ナノワイヤによる微小なトランジスタの研究・開発は、かねてから注目されてきた。

ナノワイヤとは、直径が数ナノメートルから数百ナノメートル程度の垂直、自立型の一次元ナノ細線構造だ。気相-液相-固相(VLS)成長や選択成長法などのエピタキシャル技術の進展で、大量・安価に作製可能となった半導体ナノ材料である。ナノワイヤの特徴は、その設計自由度の高さにある。半導体デバイスの開発では、性質の異なる半導体をヘテロ接合やp型半導体とn型半導体からなる「pn接合」をナノワイヤの長軸方向（縦ヘテロ構造）や動径方向（コア・マルチシェル構造）に作ることができる（図1）。従来の材料で異なる半導体同士を接合する場合は、欠陥を減らすため、結晶格子の大きさおよび形を決定する「格子定数」が等しくなるように、接合構造を作製することが一般的だ。しかしナノワイヤは、格子定数が異なるヘテロ接合である「格子不整合」があっても、自由度の高い特徴を活かし、LEDや縦型トランジスタなど、さまざまなデバイスをつくることのできる材料系なのである。

新しい接合のトランジスタ「結晶相転移トランジスタ」の発明

北海道大学情報科学研究院および量子集積エレクトロニクス研究センターの富岡克広氏らの研究グループは、III-V族半導体の一種、インジウムリン（InP）のナノワイヤをつかった「半導体構造相転移材料」による結晶相転移を用いたバンド構造制御の研究を続けてきた。インジウムリン

（InP）のナノワイヤは、結晶成長条件を工夫することで、物質の状態を維持しながらも、結晶構造と物性が変化する「結晶相転移」を起こす。結晶相転移では、同じ材料系でバンドギャップを間接遷移型から直接遷移型に置き換えることができる。「この特性を発光特性に活かし、自然界にはない結晶構造を有した材料による発光素子応用研究が行われています。しかし先行研究は構造相転移材料そのものと光デバイス応用に限られており、構造相転移材料がつくる新しい接合には着目されていませんでした。そこで私たちはこの接合に着目し電子デバイスに応用した『結晶相転移接合トランジスタ』を発案・作製しました」と富岡氏は話す。

同研究グループは、結晶相転移による接合「結晶相転移ヘテロ接合」に着目した。インジウムリンをつかったナノワイヤは、市販のインジウムリン基板の上に、有機金属気相選択成長法で結晶を成長させることによって作製されるが、その際、結晶構造がウルツ鉱型結晶構造になることがわかっている。さらに、この基板とナノワイヤの界面が同じ材料であるにもかかわらず無欠陥のヘテロ接合（結晶相転移ヘテロ接合）になるという。「従来の半導体ヘテロ接合では、ある程度結晶成長すると、格子緩和を起こし接合界面に欠陥（ミスフィット転位）が入りますが、結晶相転移

ヘテロ接合の場合はそうした欠陥ができません。そして全く同じ材料で、ヘテロ接合を材料の中に作ることができるのも特徴です」と富岡氏は語る。

富岡氏らは、この結晶相転移ヘテロ接合を電子デバイスであるトランジスタに用いた。「結晶相転移ヘテロ接合を電子デバイスに応用できない一つの要因として、接合界面に対して垂直方向に電場をかける素子構造をつくる技術が確立されていないという点がありました。結晶の構造上、垂直方向から電界をかける構造を作るとは非常に複雑で難しく、電子デバイス応用のハードルになっていたのです」（富岡）

同研究グループは、接合界面に対し、垂直方向から電界をかける構造を作製する三次元立体プロセス技術をすでに確立している。それが独自の「垂直ゲートオールアラウンド (Vertical gate-all-around: VGAA) 構造作製技術」である (図2)。この技術を応用し、結晶相転移接合を持つ縦型のトランジスタ、結晶相転移ヘテロ接合トランジスタをつくりあげ、動作を確認したという (図3)。

「結晶相転移ヘテロ接合トランジスタは、ショットキートランジスタと似た振る舞いをしていと考えられます。ショットキートランジスタは、金属と半導体の接合界面のエネルギー障壁をスイッチとして利用しています。一方の結晶相転移ヘテロ接合トランジスタは、同じ材料で結晶構造の並びを変えてポテンシャルを作っているため、同じ材料だけでショットキー効果に近い高速スイッチとして利用できます。従来、n型InPは半導体の中でも金属/半導体のショットキー障壁を作りにくい材料なのですが、構造相転移がつくる接合なら欠陥を気にせず障壁を作ることができます。また、トランジスタ研究開発分野の長い歴史の中で、この構造相転移ヘテロ接合の概念は、まったく新しいもので、今回の実証を起点にさまざまなデバイスのアイデアが生まれることを期待しています」（富岡）

ショットキートランジスタは、金属と半導体を接合すると、仕事関数差でエネルギー障壁ができる (ショットキー接合)。このエネルギー障壁をポテンシャルとして用いたトランジスタだ。富岡氏らの研究グループは、ショットキートランジスタと同じ構造を、金属を使わず、インジウムリンのナノワイヤ材料だけで素子動作を起こすということを実証したのである。「ゲルマニウムで点接触型トランジスタが発明されてから75年間、いろんなトランジスタが発明されてきました。私たちは今回の実証を通して、長いトランジスタの歴史に新しい接合の概念を提供できると考えています」（富岡）

今後はこの新しい接合をつかった電子デバイスをさらに考案しており、社会実装を踏まえた応用研究に進むという。

【図】

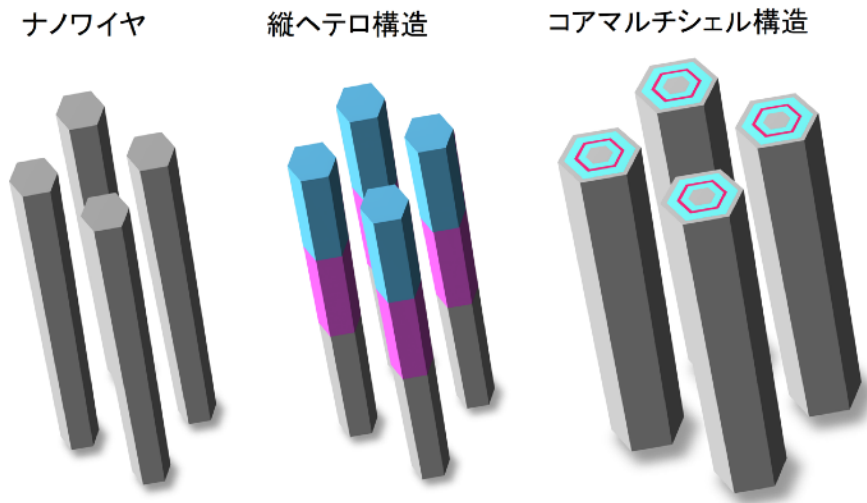


図1 ナノワイヤがつくることのできる縦ヘテロ構造とコア・マルチシェル構造の概念図。

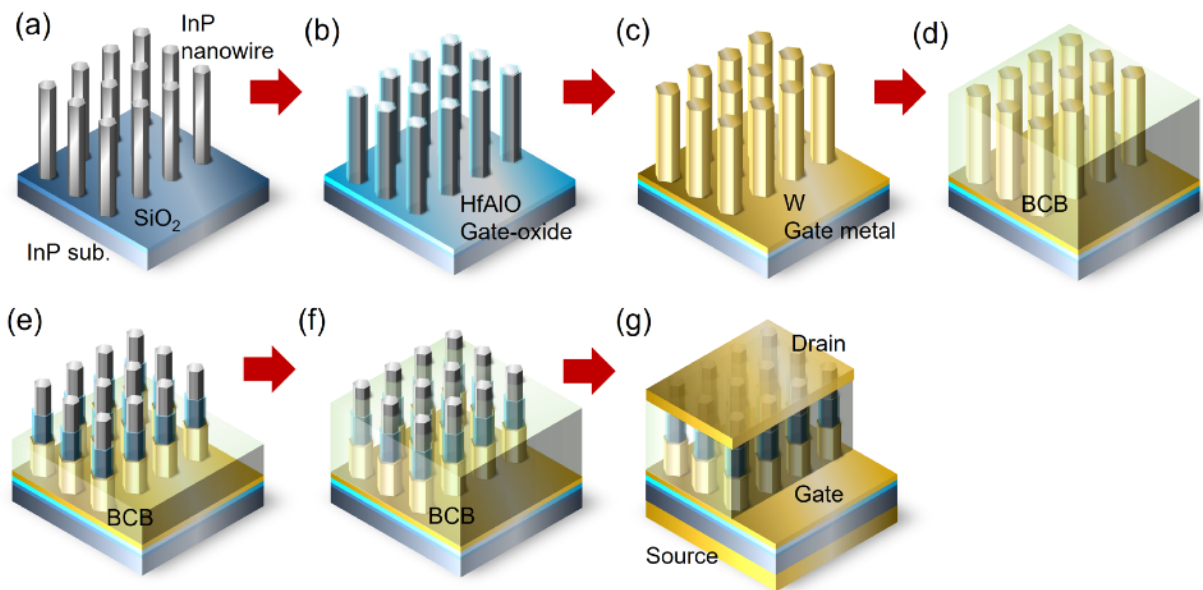


図2 垂直ゲートオールアラウンド(Vertical gate-all-around: VGAA)構造作製技術による、結晶相転移トランジスタの作製

a: ナノワイヤを選択成長法で作製。b: ゲート酸化膜をナノワイヤの周囲に成膜する。c: ゲート電極となる金属を周囲に成膜。d: 樹脂埋め、e: ドライエッチング(頭だし工程)。条件を変えたドライエッチングにより、最初につけたゲート電極を削るとともに、エッチングの選択比を用いてナノワイヤだけ露出させ、下にゲート電極構造を残す。f: 再び樹脂で埋め、再度ドライエッチングでナノワイヤの先端を頭出し。g: 頭出しされた部分と基板裏面に電極を蒸着した最終構造。ナノワイヤの側面全方位をゲート積層構造で覆うことから、ゲートオールアラウンドと呼ばれる。

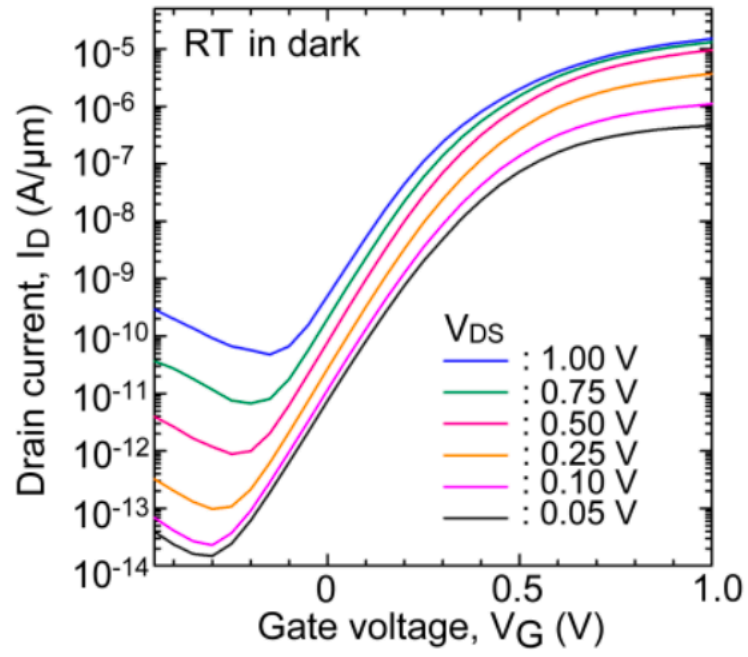


図3 結晶相転移接合トランジスタの伝達特性。結晶相転移ヘテロ接合界面のエネルギー障壁でスイッチ動作をする。