

コアシェルナノワイヤ構造を利用した高速トランジスタチャンネルを開発 —従来より高速で高集積が可能な立体構造トランジスタの実現に向け大きく前進—

配布日時：平成27年11月16日14時
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構（以下NIMS）国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点の深田直樹グループリーダーを中心とする研究グループとジョージア工科大のグループは、高速トランジスタチャンネル材料として利用可能な、中心（コア）がゲルマニウム、外側（シェル）がシリコンという二重層のコアシェルナノワイヤを開発しました。さらに、不純物がドーピングされたシリコン層とキャリアが輸送されるゲルマニウム層が混ざり合っておらず、ゲルマニウム層でキャリアが発生していることを実証しました。この研究成果は、ナノワイヤの欠点だった不純物散乱の抑制を可能にし、高速な次世代トランジスタの実現に向けて大きな前進となります。
2. 現在広く普及している、平面型の金属・酸化膜・半導体電界効果型トランジスタ（MOSFET）¹⁾の開発について、従来のペースを維持した微細化は限界に達していると指摘されています。そこで、新たな高集積化の方法として、平面型ではなく立体構造の縦型トランジスタが提案されています（図1）。立体化において最も重要なチャンネル部分には半導体ナノワイヤの利用が考えられていますが、ナノワイヤの直径が20nm以下になると、キャリア生成のためにドーピングされた不純物によってキャリアが散乱してしまい、キャリアの移動度が低下してしまう問題がありました。
3. 本研究グループは、シリコンとゲルマニウムのコアシェル構造を持つナノワイヤを開発することで、不純物のドーピング領域とキャリアの輸送領域を分離し、不純物散乱を抑制できる新しい高移動度チャンネルの形成とその実証に成功しました。キャリアはナノワイヤ表面のシリコン層で生成され、コア領域のゲルマニウム層に伝播して移動します。ゲルマニウムはシリコンよりもキャリアの移動度が速い為、高移動度化が可能となり、キャリアはコア領域を移動するため、ナノワイヤ構造特有の表面散乱の影響も抑制できる構造となっています。さらに、ドーピングの量によってキャリア濃度を制御することも実証しました。

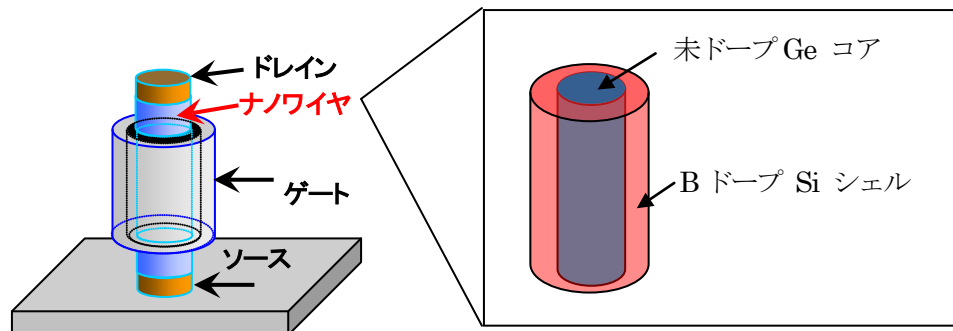


図1 縦型トランジスタの模式図と、コアシェルナノワイヤ部分のモデル図

4. 今回開発したコアシェル構造は、シリコンとゲルマニウムという単純な材料のみを利用しているため、低価格での製作が可能です。今後は、コアシェル構造を利用したデバイスを実際に作製し、デバイス特性の性能評価から将来の高移動度デバイスとしての可能性を実証する予定です。
5. 本研究は、主に科学研究費補助金基盤Aにおける研究課題「コアシェルヘテロ接合ナノワイヤへの位置制御ドーピングによるキャリア輸送制御」（研究代表者：深田直樹）とNIMS第三期中期計画研究プロジェクト「ケミカル・ナノテクノロジーによる新材料・新機能の創出」の一環として行われました。本研究成果は、ACS NANO 誌オンライン版に2015年11月11日（現地時間）に掲載されました。

研究の背景

平面型の金属・酸化膜・半導体電界効果型トランジスタ (MOSFET) は、現在多くのデバイスに使用されている一般的なトランジスタです。デバイスの性能向上のために、トランジスタのサイズは年々縮小されて高機能・高集積化されてきましたが、リーク電流の増大や発熱の問題等により、従来通りのペースでの微細化は限界に達していると指摘されています。そこで、次世代デバイスの構造として、トランジスタ構造の縦型立体化が提案されています (図 1)。チャンネル部分に半導体ナノワイヤを利用し、それを取り囲むようにソース、ゲート、ドレイン電極を垂直に配置した構造では、トランジスタを高密度に配置することが可能になるとともに、ゲートからの電場をチャンネル周りの全ての方向から制御できるため、チャンネル中のキャリア密度を効率的に制御でき、超低消費電力のトランジスタが実現可能となります。

さらに、構造だけでなく材料の観点からもトランジスタの性能を向上させることが求められています。現在の半導体トランジスタ材料の主流はシリコン (Si) ですが、同じ IV 族元素のゲルマニウム (Ge) を利用することができれば、電子、正孔ともに移動度を向上させることができます。そこで、これまでにいくつかの研究グループにおいて、Ge をコアとしてその周りをシリコンの層が取り囲むコアシェル構造からなるナノワイヤの研究が行われており、一部ではデバイスの実証も行われています。しかしながら、不純物のドーピング領域とキャリアの輸送領域の分離を明確に実証した実験報告はありませんでした。また、Si と Ge からなるヘテロ接合の界面制御も不十分であり、キャリア濃度制御に関する報告例もなく、縦型トランジスタ実用化に向けての大きな課題となっていました。

研究内容と成果

物質・材料研究機構 深田直樹グループリーダーを中心とする研究グループおよびジョージア工科大の研究グループは、Si と Ge のコアシェル構造からなる特殊なナノワイヤを開発し、不純物のドーピング領域とキャリアの輸送領域の分離を実証することに成功しました。

今回の研究では、コア部分が不純物をドーピングしていない真性の Ge ナノワイヤ (i-Ge コア)、シェル部分が p 型不純物であるボロン (B) をドーピングした Si シェル層 (p-Si シェル) からなる特殊な i-Ge/p-Si コアシェルナノワイヤ構造を化学気相堆積 (CVD) 法により形成しました。図 2 に実際に形成したコアシェル構造内部の元素組成分析の結果を示します。コア形成およびシェル形成を CVD 成長装置で連続的に行なうことで、コア/シェル界面の酸化層の形成を完全に抑制できました。また、シェル形成時の Ge および Si の相互拡散および B 不純物の Ge 層への拡散を抑制した結果、Ge と Si が混ざり合っていない界面形成に成功しました (図 3)。

このコアシェル構造の形成により、B がドーピングされた Si 層ではなく、B がドーピングされていない Ge コア内へ、正孔を発生させることができます。つまり、不純物が存在しない領域にキャリアのみ発生できるため、不純物散乱を抑制したチャンネルの形成が可能となります。このようなヘテロ接合からなるコアシェル構造において、従来の電気的特性評価だけでは、キャリア (正孔) がどこに発生しているのかを明らかにできませんでした。本研究グループは、ラマン分光法による分析法を活用することで、B がドーピングされていない Ge 層に正孔が発生していることを実証しました (図 4 a)。また、Si シェル層の B ドーピング濃度を制御することで、Ge 層内の正孔ガス濃度の制御にも成功しました (図 4 b)。

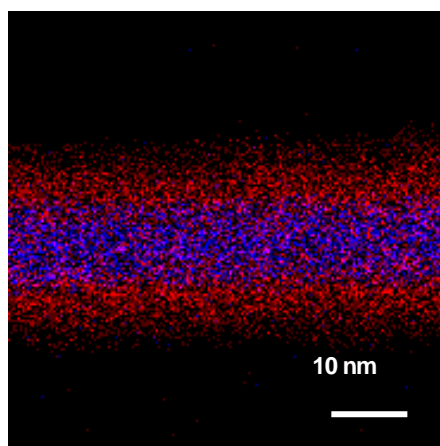


図 2. CVD 法で形成した Ge/Si コアシェルナノワイヤにおいて、エネルギー分散型 X 線分光 (EDX) 法³⁾により観察された像。(赤い領域: Si、青い領域: Ge)。

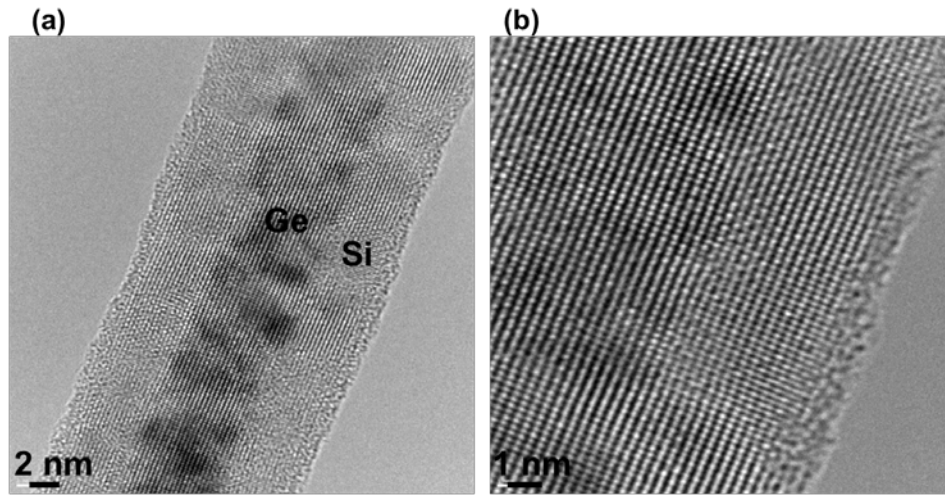


図 3. (a) i-Ge/p-Si コアシェルナノワイヤの透過電子顕微鏡像、および(b)その拡大図。

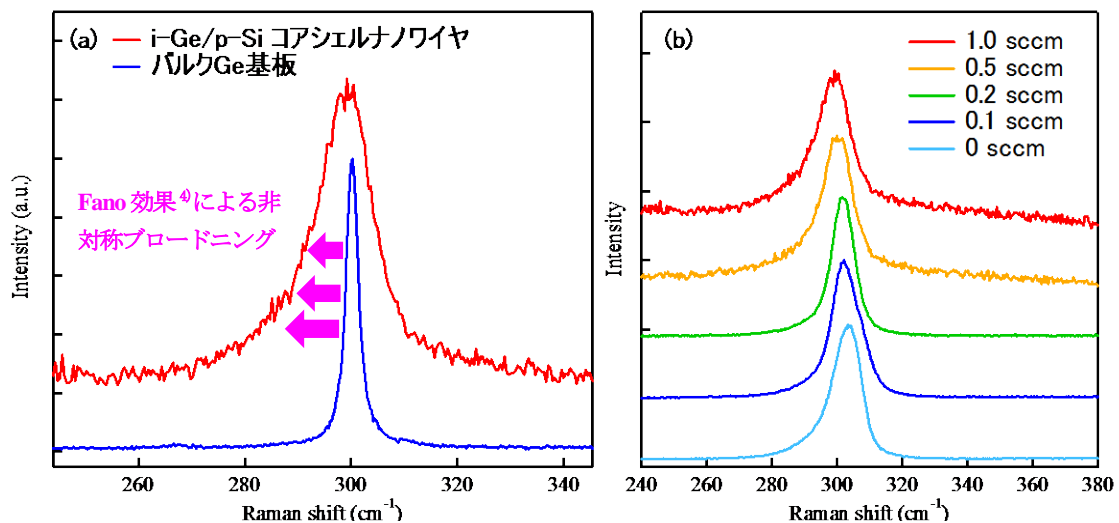


図 4. (a) 今回開発した i-Ge/p-Si コアシェルナノワイヤおよびバルク Ge 基板において観測された Ge 光学フォノン⁵⁾ ピーク。正孔の発生によって、ピークが非対称に広がっている。(b) Ge 光学フォノンピークの Si コアナノワイヤ中の B ドーピング濃度依存性。

今後の展開と波及効果

今回開発したコアシェル構造は、不純物散乱を抑制できるという点では、化合物半導体において開発された高電子移動度トランジスタ (HEMT)⁶⁾ と類似の構造をしています。しかし、多くの原料からなる化合物半導体を使用した HEMT と違い、シリコンとゲルマニウムという単純な材料のみを利用しているため、低価格での製作が可能です。今後は、コアシェル構造を利用したデバイスを実際に作製し、デバイス特性の性能評価から将来の高移動度デバイスとしての可能性を実証する予定です。

本研究の成果は、クリーンエネルギーの代表であり今後ますます重要となる太陽電池の研究開発へも応用できます。特に最近では、シリコンナノワイヤ内部にコアシェル構造からなる pn 接合を形成することで、太陽電池の変換効率を向上させる新しいシリコン太陽電池が提案されています。このように、シリコンナノ構造体を機能的に複合化した安価で環境負荷の小さい高効率太陽電池材料の開発が現在は注目されており、ナノ構造体の機能化と不純物ドーピング制御は重要な研究課題となっています。したがって、産業面での本成果の波及効果は高く、クリーンエネルギーの開発に寄与できるといった面でも意義のある成果といえます。

掲載論文

題目: Clear experimental demonstration of hole gas accumulation in Ge/Si core-shell nanowires

著者: Naoki Fukata, Mingke Yu, Wipakorn Jevasuwan, Toshiaki Takei, Yoshio Bando, Wenzhuo Wu, and Zhong Lin Wang

雑誌: ACS NANO

掲載日時: 2015年11月11日(現地時間)

用語解説

1) 金属・酸化膜・半導体電界効果型トランジスタ (MOSFET)

電界効果トランジスタの中で最も代表的なもの。当初、ゲート電極に金属、Si半導体部分の間に絶縁体として酸化膜が用いられていたことから、金属・酸化膜・半導体電界効果型トランジスタと呼ばれる。

2) 化学気相堆積 (CVD:Chemical Vapor Deposition) 法

基板物質上に目的とする薄膜の成分を含む原料ガスを供給し、基板表面あるいは気相での化学反応により膜を堆積する方法。

3) エネルギー分散型 X 線分光 (EDX) 法

X線や電子線を物質に照射した場合に発生する特性 X線をエネルギー分散型検出器で検出し、検出された X線のエネルギーと強度から物質中の元素組成を決定できる分析手法。

4) Fano 効果

半導体への高濃度不純物ドーピングによる価電子帯内での連続的なレベル間での遷移と、離散的なフォノン準位間での遷移の両遷移のカップリングによって生じる干渉効果のこと。Fano効果の結果、例えば、ゲルマニウム光学フォノンのピーク波形が非対称に広がる。Fano効果が現れるということは、価電子帯内に多数のキャリアが生成していることの証拠になり、光学フォノンピークに現れる波形の非対称性を解析することで、電氣的に活性な不純物濃度を定量化することができる。

5) 光学フォノン

フォノンとは、結晶を構成する原子、格子の集団振動による格子波のことを意味し、結晶を伝播する波動のこと。このフォノンには大きく分けて光学モードと音響モードがあり、光学フォノンは光学モードの振動を指す。

6) 高電子移動度トランジスタ (HEMT: High electron mobility transistor)

異なる半導体の接合により形成されたヘテロ接合において、ヘテロ接合界面に誘起される二次元電子ガスをチャネルとした電界効果トランジスタのこと。

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

無機ナノ構造ユニット 半導体ナノ構造物質グループ

グループリーダー 深田直樹 (ふかたなおき)

TEL: 029-860-4769

E-mail: FUKATA.Naoki@nims.go.jp

(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 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