

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成18年度採択分

平成21年4月1日現在

研究課題名（和文） 有機金属気相選択成長法による
半導体ナノワイヤエレクトロニクスの創成
研究課題名（英文） Semiconductor Nanowire Electronics by
Selective-Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy
研究代表者
福井 孝志（Fukui Takashi）
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授



研究の概要： 有機金属気相選択成長法を用いて半導体ナノワイヤの形成技術確立し、その成長機構、結晶構造の解明を行いつつ、ナノワイヤの電子物性・光物性・磁性に関する基礎特性を明らかにしナノワイヤを用いたトランジスタや光素子を試作することでナノワイヤのエレクトロニクス応用への可能性を探索する。

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード： ナノワイヤ、化合物半導体、結晶成長、1次元物性、磁性体

1. 研究開始当初の背景

現在の半導体エレクトロニクスの中核を担うシリコン大規模集積回路 (LSI) 技術は、高集積化に伴う微細化の進展と共に、半導体の低損傷加工の点で様々な課題が表面化してきている。そこで、従来のトップダウン加工を基礎にした LSI 製造技術に対して原理的・革新的なブレークスルーを目指したアプローチが求められており、半導体ナノワイヤ、カーボンナノチューブを用いた FET、分子素子などの研究が盛んに行われている。半導体ナノワイヤの典型的な作製方法は、半導体上にランダムに形成された触媒金属を核として特定な方向に成長させる気相-液相-固相 (VLS) 法であり、代表的なボトムアップ技術である。

しかし、ボトムアップ技術であるため成長位置制御、サイズ制御に難があること、また表面の処理が適切になされていないため、発光特性、電気伝導度特性などに課題も多く、pn 接合レーザ発光ですら依然として報告がない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、有機金属気相成長 (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE) 法による選択成長を用いて、半導体ナノワイヤの形成技術確立し、純粋な 1 次元系である半導体ナノワイヤの電子物性・光物性などの基礎特性を明らかにするとともに、プロトタイプのナノワイヤ電子デバイス、光

デバイスへの応用の可能性を探ることで、全く新しい「半導体ナノワイヤエレクトロニクス」の創成を目指す。

3. 研究の方法

これまで報告されている数多くの半導体ナノワイヤは触媒物質を用いた気相-液相-固相 (VLS) 成長法により形成されている。これに対して本研究では、電子ビームリソグラフィを利用して基板上に作製した非晶質マスクパタン開口部からのエピタキシャル成長を利用する有機金属気相選択成長法 (SA-MOVPE) を採用した。本方法により、触媒物質による汚染の心配がない半導体ナノワイヤの形成が可能である。更にはまた、p-n 接合、縦方向ヘテロ接合や横方向ヘテロ接合の形成も可能である。具体的には、以下 4 つの分担研究課題を設けそれぞれの目標を達成する。

(1) 結晶成長・結晶工学

ナノワイヤ成長機構、結晶構造相転移の解明

(2) 光物性・光デバイス

光学物性把握と光素子への応用展開

(3) 電子物性・電子デバイス

1 次元的電気伝導の評価、トランジスタ試作

(4) 新材料系ナノワイヤ

強磁性材料によるヘテロ接合ナノ構造形成

4. これまでの成果

(1) GaAs ナノワイヤ成長初期過程の電子顕微鏡観察による詳細な結晶構造解析の結果、(111) 結晶軸まわりの回転双晶がナノワイヤ

〔4. これまでの成果 (続き)〕

形成に大きく関与していることを突き止めた。

(2) GaAs/GaAsP コアシェル型 (横方向ヘテロ接合) ナノワイヤ1本からの光励起レーザ発光に成功した。図1 (a)は発光 (フォトルミネッセンス; PL) 観察実験の主要部見取り図、図1 (b)は発光の CCD カメラ像および GaAs/GaAsP ナノワイヤの走査型電子顕微鏡像 (右下挿入図) である。CCD カメラ像から、ナノワイヤ両端部付近が特に強く発光していることが明らかとなった。図2はナノワイヤからの発光 (PL) スペクトルを示す。ナノワイヤへの励起光強度を 1.7 kW/cm^2 から次第に増加させると 10 kW/cm^2 前後から PL 強度が急激に増大し、一方線幅は 1 nm 程度に狭まりついにレーザ発光へと変化する。

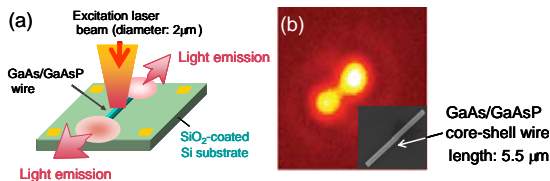


図1 GaAs/GaAsP コアシェル構造ナノワイヤからの発光観察実験の見取り図(a)と発光したナノワイヤの CCD カメラ像および電子顕微鏡像 (右下挿入図) (b)

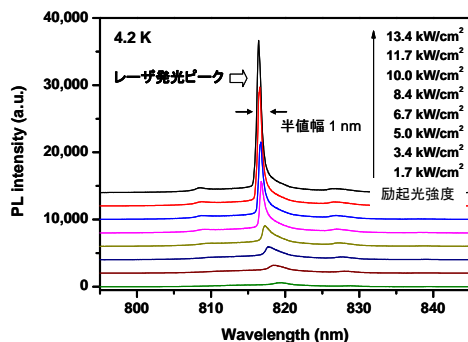


図2 ナノワイヤのレーザ発光スペクトル

(3) InGaAs ナノワイヤ1本で横型 FET を作製し、基本動作を確認した。図3は、ナノワイヤ横型 FET のドレイン電圧対ドレイン電流特性である。ゲート電圧 V_{gs} を 0 V から -2.0 V まで 0.5 V 間隔で変化 (減少) させるとピンチオフすることがわかる。

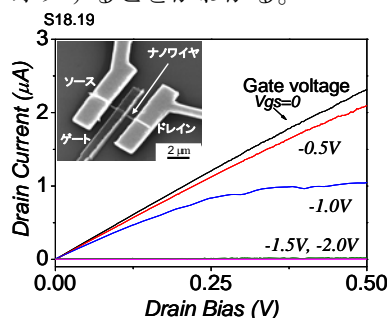


図3 ナノワイヤ FET のドレイン特性 (左上挿入図は FET の電子顕微鏡像)

(4) 強磁性材料 MnAs の GaAs 基板上への選択成長条件の検討で最小直径 200 nm の MnAs/AlGaAs/GaAs 基板ヘテロ接合構造ナノクラスタの形成に成功した。また原子間力顕微鏡計測と磁界計測を組み合わせたナノ計測システムによる詳細な計測評価から、ナノクラスタは単磁区構造を有することも確認できた。

(5) 当初の研究計画範囲外の顕著な成果

① InAs 及び GaAs/AlGaAs ナノワイヤアレーを Si 基板上に成長する技術を確認した。

② pn 接合 InP ナノワイヤアレーを使用して太陽電池素子プロトタイプを完成した。

図4 (a)は太陽電池素子の上面外観像、図4 (b)は光照射有無に対応する電流対電圧特性である。太陽電池の発電効率は、AM1.5 の光照射条件下で 3.4% とナノワイヤ素子としては世界トップレベルである。

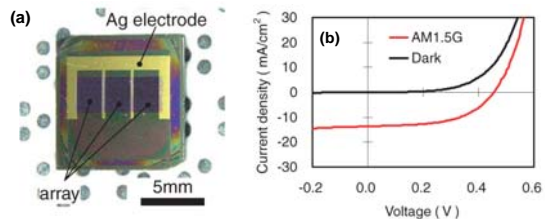


図4 試作した InP ナノワイヤアレー太陽電池素子外観像(a)と光照射時(AM1.5G)および光照射なし (Dark) における電流密度対電圧特性(b)

5. 今後の計画

- (1) ナノワイヤ成長機構、結晶構造相転移の包括的な解明を行う。
- (2) 電流注入型発光素子および単一光子素子の試作と光学特性を解明する。
- (3) 縦型 FET を試作し、1次元電気伝導特性解析、更に単電子素子構造の試作を行う。
- (4) 強磁性/非磁性材料ヘテロ接合からなるナノ構造スピントランジスタの試作と特性評価へと進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) B. Hua, J. Motohisa, Y. Kobayashi, S. Hara and T. Fukui, "Single GaAs/GaAsP coaxial core-shell nanowire lasers", Nano Letters, vol.9, pp.112-116 (2009).
- 2) K. Tomioka, J. Motohisa, S. Hara and T. Fukui, "Control of InAs nanowire growth directions on Si", Nano Letters, vol.8, pp.3475-3480 (2008).

他、論文 28件

招待講演 28件

ホームページ等

<http://www.rciqe.hokudai.ac.jp>