

## 化合物半導体ナノワイヤによる光デバイス応用

### Compound Semiconductor Nanowires and Their Optical Device Applications

福井 孝志 (FUKUI TAKASHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・特任教授



#### 研究の概要

これまで研究代表者が独自に開発を進めてきた有機金属気相選択成長法を用いて III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成技術を確立することで、純粋な一次元系である半導体ナノワイヤの光物性・電子物性といった基礎特性を明らかとするとともに、シリコン上の発光ダイオードおよびナノワイヤ太陽電池など、プロトタイプのナノワイヤデバイスへの応用を図る。

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロデバイス

キーワード：化合物半導体、ナノワイヤ、光デバイス、太陽電池

#### 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大規模集積回路 (LSI) 技術のさらなる進展には、高集積化や処理速度の限界だけでなく発熱低減など様々な課題を解決する必要がある。そこで、原理的・革新的なブレークスルーを目指した様々なアプローチが盛んに行われている。

本研究課題である「半導体ナノワイヤ」は、数十ナノメートルの直径を有する革新的な自立型 1 次元系材料であり、1 次元細線縦型トランジスタ、レーザなど、1 次元固有の、新材料及び新機能デバイスへの新たな展開が期待される。

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成長させる方法である。特に、2000 年以降に急速に研究報告が増え、現在、結晶作製、物性、デバイス応用と多方面に研究が進んでいる。主な研究機関は、ハーバード大学、カルテク、ロンドン大学、フィリップス、デルフト大学などである。

#### 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が独自に確立した有機金属気相選択成長法を用いた、位置と形状が揃った半導体ナノワイヤの形成技術を活かし、応用面に重点を置いて、固体照明と

して脚光を浴びている発光ダイオード (LED)、さらに高効率発電素子としての可能性を持つナノワイヤ太陽電池の研究を進めることで、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

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ー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) を用いる。本方法により位置とサイズが揃ったナノワイヤが、広い面積で得られるとともに、p-n 接合及び異種材料を接合したヘテロ構造が、縦方向及び横方向に自在に形成が可能になる。

発光ダイオードについては、GaAs/AlGaAs コアシェル構造の近赤外とウルツァン構造 GaP 系による可視領域の発光素子を作製する。

太陽電池は、太陽光スペクトルにマッチングの良い InP 及び GaAs それぞれで p-n 接合を横方向に形成したコアシェル構造とし、より効率的に太陽光から光電変換をおこなう。

#### 4. これまでの成果

結晶成長に関しては、InP ナノワイヤにおいて成長条件によって立方晶から六方晶に遷移するが、その中間領域をダイナミカルに捉え、機構を解明した。更にナノワ

イヤ成長方向が(111)A 方向から、高濃度 Zn ドーピングにより(111)B に変化することを発見した。

単層グラフェン基板では、InAs(111)A 面が、グラフェンのハニカム格子と周期が一致するため、ナノワイヤの成長モードが得られた。InAs/グラフェン界面の高解像度電子顕微鏡写真と第一原理計算から、結晶成長の原動力となる核形成の原理が van der Waals 力であることを明らかにした。

発光素子応用については、シリコン基板上に GaAs/AlGaAs コア-シェル構造のナノワイヤがレーザ発振した。今後は、電極材料の検討、熱放散の検討を進め安定なレーザ発振を得るとともに、活性層に Al を入れることで、発振波長の近赤外から可視光への短波長化を図る。

ウルツ鉱型構造を持つ GaP 系が直接遷移半導体になることから、完全なウルツ鉱構造が得られている InP ナノワイヤ側面に結晶構造を転写させることによりウルツ鉱構造の AlGaP シェル層を作製した。現在までウルツ鉱構造 InP/AlGaP のコアシェルナノワイヤから、緑色発光が得られている。

ナノワイヤ太陽電池では、InP コア-シェル構造に、ウインドウ層となるワイドギャップの AlInP 層を最終表面に成長することで、太陽電池の変換効率 6.35%を得た。さらに p-InP ナノワイヤに ITO を直接つけた簡便な構造を試みたが、エネルギー変換効率は、7.37%に向上し、量子効率も短波長側では、従来のプレーナ構造の報告値よりも優れた値が得られた。

電子デバイス応用に関する新展開では、縦型ナノワイヤトランジスタで非常に優れた特性が得られるようになった。多層シェル構造の設計に対し高解像度電子顕微鏡観察の結果は、設計通りの構造が得られていることを示し、変調ドーピングも成功したことにより、シリコン上に高移動度を持つ InGaAs チャネルの縦型トランジスタが作製できた。さらに、InAs/Si 界面に生じるバンド不連続を介したトンネル FET を作製した。そのドレイン電流-ゲート電圧特性は 21mV/dec と通常モードのトランジスタの理論限界 60mV/dec を大幅に下回る世界最高特性のトランジスタが作製できた。

## 5. 今後の計画

結晶成長においては、単層グラフェンのような異種基板上のナノワイヤ成長の展開を進める。また、フレキシブルデバイス応用のための成長技術を確立する。発光素子応用については、特にナイトライド系に代わる新しい可視発光材料としてのウルツ鉱構造 GaP 系の結晶成長条件の最適化と、光物性、発光ダイオード応用を進める。

ナノワイヤ太陽電池では、フレキシブル太陽電池の作製を試み、10%程度の発電効率を目指す。さらに高効率化を達成するための、ナノワイヤタンDEM構造太陽電池に関しては、GaAs(1.4eV)/InGaAs(1.1eV)の2層タンDEM構造の作製と特性評価から始め、期間内に当初計画の目標である30%の太陽エネルギー変換効率を目指す。

電子デバイス等の新展開では、(001)シリコン基板へのトンネル FET、および、III-V ナノワイヤの Ge(111)基板上への成長を検討する。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. M. Yoshimura, E. Nakai, K. Tomioka, and T. Fukui, Indium Tin Oxide and Indium Phosphide heterojunction nanowire array solar cells, Applied Physics Letters 103, 243111-1-3 (2013)
2. Y. J. Hong, J.W. Yang, W. H. Lee, R. S. Ruoff, K. S. Kim, T. Fukui, van der Waals Epitaxial Double Heterostructure: InAs/Single-Layer Graphene/InAs, Advanced Materials 25, 6847-6853 (2013).
3. K. Tomioka, M. Yoshimura, T. Fukui, A III-V nanowire channel on Si for high-performance vertical transistors, Nature 488 189-192 (2012).
4. T. Fukui, M. Yoshimura, E. Nakai, K. Tomioka, Position-Controlled III-V Compound Semiconductor Nanowire Solar Cells by Selective-Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy, AMBIO 41 119-124 (2012)

査読付き論文合計 24 編

著書 1冊

産業財産権(特許出願) 9 件

国際会議招待講演 24 件

受賞 電子情報通信学会平成25年度エレクトロニクスソサエティ招待論文賞

ホームページ等

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