HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Growth and Characterization of Phosphide-based III-V Semiconductor Nanowires [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	石坂, 文哉
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12625号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65452
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Fumiya_Ishizaka_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　石坂 文哉

審査担当者　主　査　教　授　本久 順一
副　査　教　授　橋詰 保
副　査　教　授　葛西 誠也
副　査　准教授　冨岡 克広

学位論文題名

Growth and Characterization of Phosphide-based III-V Semiconductor Nanowires
（リン系 III-V 族化合物半導体ナノワイヤの成長と評価に関する研究）

学位論文審査の要旨
博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　石坂 文哉
学 位 論 文 題 名
Growth and Characterization of Phosphide-Based III-V Semiconductor Nanowires
(リン系 III-V 族化合物半導体ナノワイヤの成長と評価に関する研究)

化合物半導体による発光ダイオード (LED) は、長寿命・低消費電力という特長により、従来の白熱灯や蛍光灯を置き換える固体照明として、国内外で普及が進んでいる。しかし、現在の可視光 LED には、緑色及び黄色領域において発光効率が著しく低下する、いわゆる「グリーンギャップ」の問題が存在している。これは青色及び緑色領域で主として用いられている InGaN を活性層とする LED では、長波長化のため In 組成を増加させると、結晶成長の困難さに伴う結晶性の低下および内部電界の増加のため量子効率が減少するため、一方緑色から赤色領域で用いられている GaP や AlGaInP などのリン系化合物半導体では、バンド構造が間接遷移型となることに由来し、量子効率の向上限界が発光波長に応じて存在するためである。このグリーンギャップを打破し高効率な緑色及び黄色 LED を実現する、さらには高精細・高演色性ディスプレイ応用に必須となる、これらの波長帯域で発振するレーザを実現するためには、材料由来の限界を打開する必要がある。

ここで上述した GaP や AlP は、自然界では閃亜鉛鉱構造 (立方晶) の結晶が安定物質として存在するが、ここ最近の研究により、結晶構造を準安定的なウルツ鉱構造 (六方晶) へと相転移させることによって、これらの半導体が直接遷移型となることが理論的に示唆され、また、その実証実験が報告されており、新規発光材料としてこれまでの限界を打破する可能性がある。しかし、これらの研究は緒についたばかりであり、さらに発光波長の制御という観点では、AlGaP や AlInP などの三元混晶半導体が重要となるが、自然界には存在しない準安定構造のウルツ鉱の混晶半導体を高品質に形成する技術は確立されていない。

そこで本論文において著者は、高品質のウルツ鉱構造を有するリン系化合物半導体を実現することを目的として、有機金属気相選択成長法を用いて形成される純粋なウルツ鉱構造 InP ナノワイヤをテンプレートとして用い、その側面にウルツ鉱構造の結晶を成長する技術 (結晶構造転写法) を提案した。そして InP/GaP コアシェル型ヘテロ構造を実現しその概念を実証するとともに、緑色及び黄色領域で発光可能な材料であるウルツ鉱構造 AlGaP 及び AlInP 混晶を作製し、それらの結晶構

造及び光学特性の評価を行っている。
本論文は第 8 章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。
第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および本論文の構成が記されている。
第 2 章では、半導体ナノワイヤの特徴および作製方法が纏められている。そして、リン系 III-V 族化合物半導体ナノワイヤの結晶構造及びバンド構造について説明するとともに、本研究で重要な位置を占める結晶構造転写法を用いたウルツ鉱構造の作製手法が述べられている。
第 3 章では、本研究において半導体ナノワイヤおよびウルツ鉱構造半導体の作製に用いた有機金属気相選択成長法の基本的な成長特性を述べるとともに、結晶構造及び光学特性の評価方法について説明している。
第 4 章では、InGaP ナノワイヤ成長に関する実験結果が纏められている。InP ナノワイヤではウルツ鉱構造の InP ナノワイヤが形成されるのに対し、Ga の添加によって結晶構造がウルツ鉱構造から閃亜鉛鉱構造へと相転移することを明らかにした。その他、Ga 組成の増加に伴いナノワイヤの横方向成長が促進されることなど、InGaP ナノワイヤ成長の基本的特性を明らかにしている。
第 5 章では、コアシェルヘテロ構造ナノワイヤを用いた結晶構造転写法によるウルツ鉱構造 GaP の形成について述べられている。ウルツ鉱構造を有する InP ナノワイヤの側面に GaP を成長させることによって、ウルツ鉱構造 GaP が InP ナノワイヤ側面に形成されていることを透過型電子顕微鏡観察により確認しており、本研究で提案しているコアシェルナノワイヤにおける結晶構造転写法の有効性を実証している。
第 6 章では、InP ナノワイヤ側面へのウルツ鉱構造 AlGaP 混晶の成長が述べてられている。ウルツ鉱構造 AlGaP におけるミスフィット転位密度は、格子不整合度から見積もられる値よりも低く、直径の小さいナノワイヤを用いることで欠陥の少ない高品質なウルツ鉱構造が得られることを示している。さらに、ウルツ鉱構造 $Al_{0.2}Ga_{0.8}P$ 量子井戸から、これまでに報告されているウルツ鉱構造リン系化合物半導体で最も短い波長である 523 nm の純緑色発光を確認している。
第 7 章では、全可視光領域にバンドギャップを持つウルツ鉱構造 AlInP の成長と評価が述べられている。X 線回折測定を利用し、AlInP の結晶構造とともに、組成・歪みを調べる手法を確立している。また、ウルツ鉱構造 $Al_xIn_{1-x}P$ の組成比を変化させることによって、波長 590〜750 nm の黄色及び赤色発光を確認している。これらは、ウルツ鉱構造 AlGaInP 系材料による LED の実現に向け、基礎的な知見となると考えられる。
第 8 章では、本論文の結論であり、まとめおよび将来の展望が述べられている。
以上これを要するに、著者は、自然界には存在しない準安定物質であるウルツ鉱構造のリン系化合物半導体を半導体ナノワイヤを利用して実現する手法を提案・確立するとともに、発光材料としてそれら新物質の可能性を明らかにしており、これは半導体材料・デバイス工学分野の発展に対して大きく寄与するものである。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。