



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	III-V族化合物半導体結晶の微細構造制御および量子構造の形成と応用に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	中田, 義昭
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第6918号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55305
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yoshiaki_Nakata_review.pdf, 審査の要旨



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 中田 義昭

審査担当者 主 査 教 授 武藤 俊一
 副 査 教 授 石政 勉
 副 査 教 授 足立 智

学位論文題名

III-V 族化合物半導体結晶の微細構造制御および量子構造の形成と応用に関する研究
(Study on nano-structure control of III-V compound semiconductors and its extension to quantum structures for device applications)

III-V 族化合物半導体の大きな特徴の一つは、多様な材料系から格子とエネルギーバンドを混晶組成により制御してキャリアを意図的に閉じ込め、所望の特性を引き出していくことにある。そのため、混晶材料は極めて重要な位置づけとなるが、その微細構造を含め広くは調べられていない。また、近年活発化しつつあるキャリア閉じ込めの次元を高めた量子細線や量子ドットの作製においては、従来のリソグラフィとエッチングによる加工ではダメージが導入されてしまい十分なキャリア閉じ込めができるまでには至っていない。そのため、成長プロセスのみによる構造形成が望まれるが、従来の成長技術では、構造制御が可能となるのは成長方向のみであった。何らかの機構を取り入れ、横方向への成長制御を可能とする成長技術を開発する必要がある。本研究では、これら課題を踏まえ分子線結晶成長 (MBE) 法による実験的検討を行った。

本論文は 7 章から構成されている。以下に各章の要約を述べる。

第 1 章は序論であり、III-V 族化合物半導体の歴史的背景と新しい素子開発に向けた材料技術に関する課題を述べる。

第 2 章では、素子への応用上重要な InP に格子整合した混晶材料に注目し、代表的な InGaAs/InAlAs ヘテロ構造に加え、新たに GaAsSb, AlAsSb 混晶の成長技術を開発し、InGaAs 混晶や InAlAs 混晶とのヘテロ接合により Type II 型や価電子帯側、あるいは伝導帯側にのみ大きな障壁を持つ特異なバンドアライメントを形成できることを示した。

第 3 章では、InP に格子整合した InGaAs 混晶に注目し、特定な成長条件下で現れる自己形成手法を検討した。(110) InP 基板上では InAs と GaAs が単分子層ごとに交互に積層した CuAu-I 型と呼ばれる規則構造が形成できることを透過電子顕微鏡観察 (TEM) により明らかにした。また、この規則化に成長表面に形成される 2 分子層の表面ステップが重要な役割を果たしていることを明らかにした。この知見に基づいて、微傾斜基板上でのステップフロー成長を用いて、InAs と GaAs を交互に供給することにより、ステップ周期に一致した横変調周期が形成されていることを明らかにした。得られた InGaAs 規則混晶からは、通常の不規則混晶の 1.6 倍の電子移動度が得られ合金散乱の抑制を示唆する。

第 4 章では、微傾斜基板上でのステップフロー成長を利用した面内に周期構造を有する「面内超格子」について調べた。表面のステップ周期に一致した InGaAs/InAlAs 面内超格子が形成できていることを確認した。また、格子定数が大きく異なる InAs と GaAs を同様に交互に成長して InAs

/GaAs 歪面内超格子を形成した。従来の報告より組成差が大きな面内超格子が実現できていることを確認し、成長のみによる量子細線形成に向けての有効性を示した。

第 5 章では、究極的なキャリア閉じ込め構造である量子ドットの成長制御について調べた。島状成長 (Stranski-Krastanow 型成長) を用いた、GaAs 上の InAs 量子ドットの形成について、積層方向への配列性を積極的に利用して量子ドット高さを積層数により制御する近接積層を提案、さらに、GaAs 中間層を 3 分子程度にまで薄くして、InAs 供給量を精細に制御して積層することにより円柱形状の量子ドット (コラムナー量子ドット) を形成した。これを用いた量子ドットレーザにおいて、既報告値より 1 桁程度低いしきい値を得た。また、積層数により偏波制御が可能であることも確認し、レーザ、光増幅器などへの適用可能性を示した。

第 6 章では、量子ドットの代表的な応用デバイスである半導体レーザへの適用に向けた構造制御、特に波長制御について調べた。毎秒 0.01 分子層以下の低速成長により発光波長を通信波長域である $1.3\mu\text{m}$ 域にまで長波長化できることを明らかにした。また量子ドット直上に形成する InGaAs 歪層について、組成と厚さの制御により、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の長波化が得られることを確認した。これらにより $1.3\mu\text{m}$ 域で発光する量子ドットを高密度に形成できることを確認した。この量子ドットを用いてレーザを試作したところ、8 mA の低しきい値で室温連続発振することを確認、実用的な通信用レーザへの適用可能性を示した。

第 7 章は、これらまとめとして、前章までに得られた結果を要約して述べる。

これを要するに、著者は実用化を目指した III-V 族化合物半導体結晶の微細構造制御および量子構造の形成について重要な知見を得た。この知見は半導体工学、応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。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あるものと認める。