



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 中田 義昭

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。

本研究は、これら課題を踏まえ高性能レーザや超高速素子など新しい半導体素子の開発に貢献することを目的に以下の検討を行った。まず材料の多様性の観点で、新たに Sb-As を含む III-V-V 混晶の制御技術を開発し、InGaAs 混晶や InAlAs 混晶とのヘテロ接合におけるバンドアライメントなど基礎物性を明らかにする。また混晶中の原子配置に注目、通常副格子中で不規則に配置する構成原子の規則化とそれに伴う物性変化（電子移動度の増大）を実験的に明らかにする。さらに、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を成長プロセスのみで構造制御する手法を示し、成長結晶の構造とその物性を示すことによりその有効性を明らかにする。

本論文は 7 章から構成されており、以下各章ごとにまとめて示す。

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、新たに開発した GaAsSb, AlAsSb 混晶に関して述べる。InGaAs/InAlAs に関しては、選択ドーピング構造を成長し、シートキャリア濃度について調べた。これまで主流であった GaAs/AlGaAs 系に比べ伝導帯端のエネルギー差が大きく、シートキャリア濃度を 4 倍も高く生成できることを確認し、高電子移動度トランジスタ (HEMT) 応用への優位性を示した。また、2 種類の V 族原子を含み V 族原子の組成制御が必要となる 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、In と Ga の規則的な配列制御とそれに伴う物性変化について述べる。規則化の手法として、まず、特定の成長条件下で現れる自己形成手法を用いた。(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。規則化と成長条件及び成長中の表面ステップ構造との関係より、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。次に、規則化手法として、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人為的に構成原子を配列させる手法について示し、TEM, X 線回折によりステップ周期に一致した横変調周期を持つ単分子層超格子が形成されていることを明らかにした。これら InGaAs 規則混晶からは、通常の不規則混晶より 1.6 倍も高い電子移動度が得られることを示した。合金散乱が抑制されたと思われる。

第 4 章では、成長面内 (横方向) での原子配置制御について述べる。成長には、微傾斜基板上でのステップフロー成長を利用し、面内に周期構造を有する面内超格子を形成した。基板には、(110)InP 微傾斜基板を用い、0.5 分子層の InGaAs と InAlAs, を交互に成長した。得られた結晶を TEM により評価した結果、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。TEM, エネルギー分散型 X 線分光 (EDX), フォトルミネセンス (PL) での評価により既報告の面内超格子では、最も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明らかにした。

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述べる。成長には格子不整合系ヘテロ結晶の成長初期に現れる島状成長 (Stranski-Krastanow 型成長) を用いた。まず基本的な成長形態について整理した上で、GaAs 上の InAs 量子ドットの形成について、基本的な構造特性と成長パラメータとの関係を明らかにした。次に高性能レーザなどの素子応用上重要な積層成長について検討した。積層成長では、積層とともに量子ドットが大きくなる問題が指摘されていた。初期層に類似した量子ドット層の単純繰り返し積層には中間層をある程度厚くする必要がある (>30 nm) こと、また中間層を薄くした場合、積層方向に量子ドットの配列性が現れることを見出した。この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し、積層数に応じて高さ (発光波長) が変化することを検証した。また近接積層では、構造揺らぎに起因した不均一幅が大幅に低減できることを明らかにした。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 (コラムナ形状) の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述べる。まず発光波長と成長速度との関係を検討し、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。ただし、密度は 1 桁程度低減してしまい ($5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$)、このままではレーザ応用には適さない。そこで、周辺構造として量子ドット直上に形成する InGaAs 歪層について検討した。InGaAs 混晶の組成と厚さにより、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の長波化が得られることを確認した。これらの併用により $1.3\mu\text{m}$ 域で発光する量子ドットを高密度 ($3\text{--}5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) に形成できることを確認した。最後に、この量子ドットを用いてレーザを試作、8 mA の低しきい値で室温連続発振することを確認し、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。