

(第6号様式)

学位論文審査の結果の要旨

氏 名	Pallavi Kisan Patil
審査委員	主査 下村 哲 副査 白方 祥 副査 寺迫 智昭 副査 石川 史太郎

論 文 名 Structural and Optical Properties of $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ Multiple Quantum Wells Grown by Molecular Beam Epitaxy

審査結果の要旨

13 族元素と 15 族元素の二元化合物 GaAs と GaBi との混晶 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ は Bi 組成によって $0.87\ \mu\text{m}$ から長波長側の全ての領域をカバーする発光材料、光検出材料になると期待される新しい化合物半導体材料である。特に GaAs 基板上で光通信帯（波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯）の光を発する半導体レーザーが実現されると、産業界に大きなインパクトをもたらすと考えられ、分子線エピタキシー法または有機金属気相成長法のいずれかの成長法を用いて、世界の研究機関で盛んに研究が進められている。本学位論文では、ナノメートルの厚さの GaAsBi 層と GaAs 層からなる GaAsBi/GaAs 多重量子井戸を分子線エピタキシー法により作製し、表面の平坦性、GaAsBi 層の Bi 組成、Bi 原子の偏析と Bi 原子の GaAs 層への混入、ホトルミネッセンスにより評価した光学的特性に対する成長温度、As および Bi の供給量の影響を調べた。特にこの材料系で大きな問題となっている Bi の表面偏析の問題に対して GaAsBi 層を低温、GaAs 層を高温で成長する二基板温度成長法が有望な解決策のひとつとなることを示した。二基板温度成長法を用いて成長した GaAsBi/GaAs 多重量子井戸を活性層にもつ発光ダイオードから $1.23\ \mu\text{m}$ の発光が得られ、現在最も長い波長で発光することを示した。また、基板面方位により GaAsBi/GaAs 多重量子井戸の Bi 組成および光学的特性に大きな影響を与えることを明らかにした。

第 1 章では、研究の背景、これまでに報告されている GaAsBi 薄膜および GaAsBi/GaAs 量子井戸についての研究成果をまとめ、解決すべき問題点と本学位論文の研究目的を記している。

第 2 章では、本研究で使用した分子線エピタキシー装置、試料の作製方法、評価装置および評価方法について述べている。

第 3 章では、二基板温度成長法の成長条件最適化について議論している。

3-1 節で、GaAsBi 層を 350°C 、GaAs 層を 550°C で成長した GaAsBi/GaAs 多重量子井戸の Bi 組成の Bi 分子線圧力当量 (Bi BEP) 依存性について議論している。Bi BEP を上げて行くと、Bi BEP に比例して Bi 組成が上昇し、Bi BEP = 5.5×10^{-7} hPa において Bi 組成が最大値 3.8% となり、その後減少する。偏析して表面に滞在する Bi 原子の面密度が一定量を超えると Bi の GaAsBi 層への取り込みが減少することを明らかにした。また発光波長は Bi 組成に比例して長くなり、温度 $10\ \text{K}$ において $1.115\ \mu\text{m}$ で発光することを明らかにした。

3-2 節では、As 分子線圧力当量 (As BEP) に対する GaAsBi/GaAs 多重量子井戸の構造および特性について議論している。As BEP が低いとき Bi 組成も低く、As BEP の増加につれて Bi 組成が急激に上昇する。さらに上昇すると、増加の割合が小さくなる。また、As BEP を上げていくにつれて表面の平坦性が改善される。透過電子顕微鏡像による断面観察では、GaAsBi の Bi 組成に敏感な $g = 002$ 回折で像を構成し、平坦な GaAsBi/GaAs 界面の形成、Bi 原子の表面偏析の抑制および GaAs 層への Bi の取り込みの抑制されることを見いだしている。

3-3 節では、GaAsBi 層の成長温度を 350°C に固定し、GaAs 層の成長温度を変えて GaAsBi/GaAs 量子井戸の Bi 組成および光学的特性を調べ議論している。GaAsBi 層と GaAs 層をともに 350°C で成長した試料では、透過電子顕微鏡による断面観察とエネルギー分散型 X 線検出器による組成分析から、GaAsBi 層成長時に表面偏析した Bi が GaAs 層成長時に GaAs 層に取り込まれること、GaAs 層に存在する Bi の量が GaAsBi 層に存在する Bi とほぼ等しいことが明らかになった。

第 4 章では、GaAsBi/GaAs 多重量子井戸を発光層にもつ発光ダイオードの電流—電圧特性、電流—光出力特性、発光スペクトルの電流依存性の結果を述べ議論している。二基板温度成長法で作製した GaAsBi/GaAs 多重量子井戸発光ダイオードは、室温において 10 mA から 130 mA までいずれの励起電流でも $1.23\ \mu\text{m}$ で発光し、これまで報告されている発光ダイオードの最長の発光波長 $1.20\ \mu\text{m}$ を少し上回り、半値幅は今回作製した発光ダイオードで 94 meV と 36 meV 小さい優れた特性を示している。

第 5 章では、(411)A, (411)B, (221)A, (221)B, (775)A, (775)B の 6 種類の高指数面基板上に GaAsBi/GaAs 多重量子井戸を二基板温度成長法で成長し、平坦性、Bi 組成構造、発光特性の As BEP 依存性の結果を示し議論している。最も Bi 組成の高い試料の室温におけるホトルミネッセンス発光強度は (411)A 試料が最も高く、続いて (411)B 試料、(100)試料の順となることを示し、(411)A 試料が最も光学的品質が高いことを明らかにしている。これらの試料の室温における発光波長はいずれも $1.23\ \mu\text{m}$ であった。一方 (221)A, (775)A では Bi 組成は、いずれの As 供給量でも低い。これに対し、(775)B 試料では最も低い As BEP で最も高い Bi 組成が得られ、発光波長も 10 K で $1.18\ \mu\text{m}$ と最長となった。(221)B 試料では、中間の As 供給量で、最も長波長の発光が見られ、基板面方位によって最も Bi の取り込まれる As 供給量の最適値が異なることが明らかになった。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章までの結果を総括し、残された課題および今後の研究について述べている。

以上のように、二基板温度成長法を用いて Bi の表面偏析を抑制した GaAsBi/GaAs 多重量子井戸の作製に成功し、発光デバイス作製可能な高い光学的特性を有すること明らかにするほか成長機構の解明に多くの知見を得ることに成功した申請者の成果は評価に値する。従って、本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値があると判定した。