

審査の結果の要旨

氏名 金 泰雄

化合物半導体 GaAs と AlGaAs は、その高い光学的 2 次非線形性、広い透明波長域、高い熱伝導性などの特徴を有し、高機能波長変換素子の材料として有望である。波長程度のサイズの導波層への強い光閉じ込めによる高効率化と半導体レーザ等とのモノリシック集積化を念頭に置いて、GaAs/AlGaAs 系導波路型波長変換素子の研究が進められている。周期的空間反転構造を利用した疑似位相整合(QPM)素子と、多層膜コアの複屈折性を用いる人工複屈折位相整合素子がもっぱら研究されてきたが、それらの素子内部にあると思われる欠陥や構造不均一性などが実用化を阻む壁となっている。本論文は、GaAs/AlGaAs 周期反転構造 QPM 素子内部の微細構造を電子顕微鏡観察によって詳細に調べ、高性能化の障害となる要因を明らかにするとともに、高性能化の潜在能力が高いものの未だに実験的検討のなされていない高屈折率差扁平導波路を用いた複屈折位相整合(HIC-BPM)素子を作製した上でその結晶品質と波長変換特性について検討している。本論文は 6 章からなる。

第 1 章は緒言であり、波長変換材料としての化合物半導体の特徴や GaAs/AlGaAs 系導波路型波長変換素子における位相整合の達成法について簡潔にまとめている。その上で、これまでのこの分野の研究の進展状況を概観した上で、GaAs/AlGaAs 系 QPM 素子について微視的素子評価がほぼ未着手であること、AlGaAs 系 HIC-BPM 素子が有望であるにもかかわらず未だに実現されていないことを指摘して、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、本研究で主題となる導波路型波長変換素子の基礎となる非線形光学や導波光学の基礎をまとめ、光学的等方性媒質を用いた導波路素子における位相整合の達成法について議論し、QPM と HIC-BPM の特徴を議論している。また、本研究において微視的構造評価のツールとして用いる透過電子顕微鏡(TEM)観察、特に暗視野法を用いた逆位相構造および欠陥の観察法について説明している。

第 3 章では、周期反転構造 GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 導波路に対する TEM 観察の結果がまとめられている。[0-11]方向に微傾斜した(100)GaAs 基板上副格子交換エピタキシーと周期エッチング、再成長によって作製された(011)反転・非反転ドメイン境界(逆位相境界)が $g = (002)$ 暗視野観察で明瞭に識別できることを明らかにしている。また、意図的に傾斜を設けていない(0-11)面内にも Ge 中間層表面の単原子層ステップに起因する逆位相ドメインが発生し、ドメイン境界が(111)A 面上を伝搬した後、互いに衝突して自己消滅していることを初めて見だしている。

第4章では、より Al 組成が大きく結晶性劣化の可能性の高い周期反転 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 導波路の TEM 観察結果について述べている。暗視野観察によって(111)A面および(1-1-1)A面上を伝搬する面欠陥があることを発見し、電子線回折像の解析によりこの面欠陥が(111)軸周りの 60° 回転に伴う双晶であることを明らかにしている。さらに、この双晶欠陥が反転ドメインにも同様の面方位で存在することを見いだしている。これまでのステンエッチング後の断面観察では非反転ドメインでのみ面欠陥が存在するように見えていたが、反転ドメインにも結晶学的に等価な面欠陥が存在することが示されたのはこれが初めてである。また、双晶欠陥の発生位置からその発生原因について考察し、周期エッチングや研磨後の表面処理に問題がある可能性が高いことを指摘し、再成長前の表面処理の改善が必要であると示唆している。

第5章は HIC-BPM 素子に関する研究結果がまとめられている。AlAs (あるいは高 Al 組成 AlGaAs) の酸化物 AlO_x を低屈折率クラッドとして用いた $\text{AlGaAs}/\text{AlO}_x$ 扁平導波路を用いる HIC-BPM 素子は、作製プロセスが比較的単純であるために結晶欠陥や界面の段差等を格段に低減できる可能性が高いことを述べたうえで、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯波長変換素子の設計の結果と素子作製プロセスの最適化について記述している。クラッド酸化プロセスを最適化し、クラッドの出発材料として AlAs ではなく $\text{Al}_{0.99}\text{Ga}_{0.07}\text{As}$ を用いることで良好な素子作製が可能になることを示している。また、作製した $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlO}_x$ 素子のコア/クラッドの TEM 観察をおこない、目立った欠陥が存在しないことを確認している。次に、作製した $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlO}_x$ 素子 (コア厚 $0.103\ \mu\text{m}$) について基本波波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯での第2高調波発生(SHG)実験をおこない、その波長変換特性を調べた結果について報告している。SHG の基本波波長依存性の測定結果から、HIC-BPM が確かに達成できていることを初めて実験的に示している。また、導波路幅を変えたときの位相整合波長の変化がシミュレーションとよく一致していることも確かめている。位相整合波長の温度依存性が事前の予想と逆であったこと、波長変換効率の定量的評価に至らなかったなどの課題が残ったものの、HIC-BPM の有用性を初めて実験的に示し、QPM と並ぶ有力な素子形態であることを示した意義は大きい。

第6章は総括である。

以上のように、本論文は、TEM 観察によって $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 導波路型波長変換素子の欠陥を調べ、周期反転構造作製に伴って生じる逆位相境界と双晶欠陥に関して有用な知見を得ている。また、高屈折率差 AlGaAs 扁平導波路における複屈折位相整合の達成に初めて成功している。よって本論文の化合物半導体材料学、非線形光学機能マテリアル工学への寄与は大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。