

審査の結果の要旨

氏名 松下 智紀

2次非線形光学効果を利用したレーザ光の波長変換は、既存のレーザでは実現できない波長域のコヒーレント光を得るための手段としてレーザ光学の分野で不可欠な技術である。また、単に波長を変えるだけにとどまらず、高度な光信号処理の機能を持たせることも可能であり、将来のフォトニックデバイスで重要な役割を果たすことが期待されている。強誘電体系酸化物結晶を中心とした従来の非線形光学材料と比較してはるかに高い光学的非線形性を有する化合物半導体は、波長変換素子の材料として高い潜在能力を持ち合わせているが、複屈折位相整合不可なために、擬似位相整合 (QPM) に必要な結晶反転技術なしには実用的な波長変換素子の開発はありえない。

本論文は、「GaP 副格子交換エピタキシーの研究とその波長変換素子への応用」と題し、GaP について初めておこなわれた極性反転結晶技術の研究と GaP/AlGaP 系導波路型 QPM 波長変換素子の開発についてまとめたものであり、全 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、研究の背景として赤外波長可変コヒーレント光源の必要性和既往の研究についてまとめたうえで、本研究の目的を示している。第 2 章では、立方晶系化合物半導体を用いていかにして位相整合を達成するかについて考察を加えて副格子交換エピタキシー技術の導入が不可欠であることをあきらかにし、中間層に Si を用いた GaP/Si/GaP(001)副格子交換エピタキシーの可能性について検討する必要があることを述べている。

第 3 章では、GaP/Si/GaP(001)副格子交換エピタキシーの実現に成功したこと、そしてそのメカニズムについて検討した結果が述べられている。固体ソース分子線エピタキシー法を用いて、方位の異なる GaP(001)基板上での Si 極薄膜成長とその上への GaP エピタキシャル成長をおこなった。成長した GaP エピタキシャル層の副格子配列を反射高エネルギー電子線回折、異方性エッチング、透過電子顕微鏡観察によって調べた結果より、 $[110]$ 方向に微傾斜した GaP(001)基板上でのみ再現性よく副格子交換が実現できることをあきらかとしている。また、透過電子顕微鏡観察の結果から、主に $\{1nm\}A$ 面 ($n=1, 3, 4$) 上

を伝搬する逆位相境界の自己消滅によって副格子交換が実現していると結論している。

第 4 章では、GaP/AlGaP 導波路型 QPM 波長変換素子の設計結果と、GaP/Si/GaP(001)副格子交換エピタキシー技術を用いた GaP/AlGaP 導波路 QPM 型波長変換素子の作製プロセス、作製した素子のパラメトリック蛍光による特性評価の結果についてまとめている。埋め込み導波路型素子とリッジ導波路型素子について並行して素子設計をおこない、いずれも実用的で高性能な素子となる得ることを示している。それぞれの素子の長所・短所を踏まえて、より作製の容易なリッジ導波路型素子の作製に本研究で取り組むことが述べられている。続いて、本研究で検討を加えた素子作製プロセスについて、最適化されたレシピが詳細に記述されている。GaP/AlGaP 系の光導波路素子作製の研究例はほとんどなく、この部分は地味ながら本論文のハイライトの一つといえる。さらに、作製した GaP/AlGaP リッジ導波路型 QPM 素子の特性を、波長 1.064 μm の連続発振 Nd:YAG レーザをポンプ光源としたパラメトリック蛍光法によって評価した結果が述べられている。GaP 系素子としては初の QPM が達成されたこと、温度チューニング特性が理論計算とほぼ一致していることなどが報告されている。また、実験的に得られた波長変換効率が理論値と同じオーダーであったことから GaP/AlGaP 系 QPM 素子の潜在能力の高さを証明できたとしている。QPM 構造の作りこみによって発生したかなり高い伝搬損失が実用化への障害であり、プロセスの改善によって低損失化をはかる必要があることを最後に指摘している。

第 5 章では、曲げ導波路構造を利用した新しいタイプの波長変換デバイスの提案と、GaP/Al_xO₃ (酸化した AlP) 系でこれを実現するための具体的設計の結果がまとめられている。曲げ導波路を用いた QPM において低損失化に不可欠な比較的大きな曲げ半径と QPM を両立させるための手段の一つとして高次横モードの利用が可能であることを指摘したうえで、最低次モード・高次モード間変換に伴う効率の極端な低下を回避できる横方向 QPM 素子を新たに提案している。最適設計の結果として、1.2 mm 四方の小型素子で 2000%/W を超える高効率波長変換が可能であることを示すとともに、積層方向に極性反転構造を有するジグザグタイプ GaP/Al_xO₃ 横方向 QPM 素子の作製プロセスの提案もおこなっている。

第 6 章では本研究の成果をまとめ、本論文の結論を述べている。

以上のように、本論文は GaP 副格子交換エピタキシーと GaP 系導波路型波長変換デバイスの研究に初めて取り組んだ結果をまとめたものであり、その成果は実用素子開発の重要な基礎を与え、非線形光学の発展に大きく貢献したといえる。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。