

氏 名	あ べ とも き 阿 部 友 紀
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3909 号
学位授与の日付	平 成 18 年 7 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体超格子の量子準位制御とその光 デバイス応用に関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 野 田 進 教 授 北 野 正 雄 教 授 藤 田 静 雄

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体超格子の量子準位制御とその光デバイス応用に関する研究をまとめたものであって、6 章からなっている。近年、新しい光波帯である青 - 紫外線領域に対応したワイドバンドギャップ半導体光デバイスへの期待が高まっている。しかしながら、この波長域では十分な光機能デバイスの実現がなされていない。本論文では、可視短波長から紫外線光波帯における新光機能デバイスの実現を目指して、バンドギャップがこの波長帯に対応し、かつ格子整合基板が存在する ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体超格子において、量子準位制御技術を確立し、その技術を光デバイスへ応用することによって、その可能性の実証に成功している。

第 1 章は序論であり、まず研究背景として超格子を利用した量子力学的効果、ワイドギャップ半導体の現状、およびそれによって実現が期待される光デバイスについて述べられている。次に、研究の位置付け、研究目的、論文構成について述べられている。

第 2 章では、ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体超格子中の量子準位の解析手法、およびその制御手法について述べられている。特に、超格子の共鳴トンネル効果、量子閉じ込めシュタルク効果に焦点をおいて記述されている。量子準位の理論解析には有限要素法を用い、電界印加・不純物添加条件などに応じて、自己無撞着に有効質量近似シュレディンガー方程式を解く方法について詳説してあり、ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体超格子の光デバイス応用への基礎となる設計指針を理論的観点から明らかにしている。

第 3 章では、ZnSe 系光デバイスに不可欠な ZnTe/ZnSe 表面共鳴トンネル超格子の作製、およびその構造最適化について述べている。特に、光検出器の表面吸収損失を低減するための超格子の薄膜化を主眼において、第 2 章で述べられている自己無撞着有限要素法解析による理論的観点から共鳴トンネル超格子構造の最適化を行い、分子線エピタキシャル成長により超格子構造を実際に成長して構造最適化を行っている。また、表面共鳴トンネル超格子の薄膜化にもかかわらず、依然として存在する表面の吸収損失を完全に取り去るために、新しい p-ZnSe/p-GaAs 界面共鳴トンネル超格子を提案している。この界面共鳴トンネル超格子により p-ZnSe/p-GaAs 界面に存在する 1 eV の高い価電子帯障壁を克服し、p-ZnSe/p-GaAs 間の正孔注入が可能となることを実証している。そして、実際に p 型 GaAs 基板上的 ZnSe 系ダイオードを作製し、従来デバイス化が困難であった p 型 GaAs 基板上的高効率・高感度の光デバイスが実現可能となることを示している。

第 4 章では、単一量子井戸、対称結合量子井戸、非対称結合量子井戸について、理論設計を行い、それに基づいて分子線エピタキシー法により量子井戸構造を作製することで、量子閉じ込めシュタルク効果を用いた光変調器に最適な構造最適化が行われている。理論設計では、大きなシュタルク効果が期待される非対称結合量子井戸において、電界印加条件における有効質量近似シュレディンガー方程式を有限要素法により解き、量子準位、波動関数、遷移強度を求めている。その理論シミュレーションに基づき、シュタルクシフトおよび単位電界あたり遷移強度の変化である変調度指標が共に大きくなる電子結合型非対称結合量子井戸構造を分子線エピタキシー法により作製し、その評価を行っている。ここでは、変調分光法で得られたシュタルクシフトと理論シミュレーションとの比較を行うことによって、励起子の熱解離の問題を明らかにしている。

そして、高電界印加時においても励起子が熱解離せず、量子閉じ込めシュタルク効果を最大に活用するための量子井戸構造の最適化を行っており、室温で最大37 meV のシュタルクシフトが得られることを実証している。

第5章では、第3章および第4章で確立した量子準位制御技術を基にして、ZnSe系半導体超格子の光デバイスへの応用について述べている。

まず、n型GaAs基板上的ZnSe系光デバイスに、第3章で述べた表面共鳴トンネル超格子を適用し、青-紫外線領域のPIN型光検出器、アバランシェ・フォトダイオード(APD)、およびTeクラスタ束縛励起子を利用した緑色発光ダイオード(LED)を実現している。また、界面共鳴トンネル超格子により、p-GaAs基板上に光デバイスを作製することで、光検出器の感度向上、APD活性層中のスピン軌道分裂バンドへの正孔直接注入による増倍率向上、LEDの光取り出し効率向上を実証している。

さらに、ZnSe/ZnMgSSe結合量子井戸を活性層にもつ透過型光変調器を作製し、量子閉じ込めシュタルク効果の光変調器への応用を実証している。ここでは、第4章で得られた知見を基に、光変調器としての量子井戸構造の最適化を行っている。そして、第4章で得られた、励起子の熱解離を抑制した結合量子井戸構造を活性層とすることで、ゼロバイアス時の励起子吸収ピークにおいて最大51%という変調度が得られている。また、励起子吸収ピークより低エネルギー側の透明領域においても $11500\text{ cm}^{-1}$ という大きな差分吸収係数が得られている。さらに、これらの透過型光変調器で得られた吸収係数スペクトルに基づき、より実用的な導波型光変調器への展開について述べられている。ここでは $20\text{ }\mu\text{m}$ という導波路長においても変調度90% (消光比10dB)の導波型光変調器実現の可能性が示されている。

第6章は結論であり、本論文で得られた結論をまとめるとともに、今後の課題、展望について述べられている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、可視短波長から紫外線光波帯における新光機能デバイスの実現を目指して、バンドギャップがこの波長帯に対応し、かつ格子整合基板が存在するZnSe系II-VI族ワイドギャップ半導体超格子において、量子準位制御技術の確立およびその技術の光デバイスへの応用を目的として行った研究をまとめたものである。近年、新しい光波帯である青-紫外線領域に対応したワイドバンドギャップ半導体光デバイスへの期待が高まっているが、この波長域では十分な光機能デバイスの実現がなされていないのが実情である。本研究では、これらの課題に対する詳細な検討を行うことで、ZnSe系II-VI族ワイドギャップ半導体超格子の量子準位制御技術を確立し、それを光デバイスに応用することによって、以下のように成果を得ている。

- (1) まず、ZnSe系II-VI族ワイドギャップ半導体超格子の量子準位制御においては、有限要素法による理論設計を基に分子線エピタキシャル成長した超格子において、光デバイスへの応用に必要な極薄膜かつ低抵抗なZnTe/ZnSe共鳴トンネル超格子構造の実現を行っている。またその共鳴トンネル超格子をZnSe/GaAsヘテロ界面への挿入することにより、p-GaAs基板上に光デバイスを作製する際の価電子帯エネルギー障壁の克服を実証している。
- (2) 続いて、ZnSe/ZnMgSSe称結合量子井戸を用いたシュタルク効果について理論と実験結果を基に詳細に検討している。特に電子結合型非対称結合量子井戸において、量子井戸構造の最適化により励起子の熱解離を抑えることに成功しており、室温でシュタルク効果を最大に発揮しうる結合量子井戸構造の実現に成功している。
- (3) 上記の量子準位制御技術を基に、青-紫外線光波帯の高効率ZnSSe PIN型光検出器、アバランシェ・フォトダイオード、ZnSSe:Te緑色発光ダイオードを実現し、極薄膜ZnTe/ZnSe共鳴トンネル超格子がこれらの光デバイスに有効であることを実証している。さらに、青-紫領域のZnSe/ZnMgSSe量子井戸シュタルク効果型光変調器の開発を行い、ZnSe系非対称結合量子井戸の光変調器への有効性を実証している。

以上、本論文はZnSe系II-VI族ワイドギャップ半導体超格子の量子準位の制御技術を確立するのみならず、それを用いた可視短波長から紫外線領域の新しい光機能デバイスを実現しており、学術的、実際上寄与するところが少なくない。したがって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成18年6月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。