

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岩本 敏

本論文は「半導体フォトリフラクティブ多重量子井戸素子の高機能化の研究」と題し、InGaAs/GaAs 系および AlGaAs/GaAs 系半導体多重量子井戸の励起子吸収による大きな電気光学効果を利用したフォトリフラクティブ素子の製作、およびその動作に関する解析とデバイス構造の改良による素子の高機能化に関する研究に関するものである。半導体フォトリフラクティブ多重量子井戸素子は、高速動作と大きなフォトリフラクティブ効果を両立させた、優れた素子である。本研究の主な成果は、これまでに無い波長域である 0.9-1.06 μm の波長域に感度を持つ、半導体フォトリフラクティブ多重量子井戸素子を初めて作製したこと、この波長域でさらに大きなフォトリフラクティブ効果を持つ、量子閉じ込めシュタルク効果を利用した素子を初めて作製したこと、結合量子井戸を利用することにより感度を持つ波長域を大きく広げたこと、およびこれらに付随する諸現象を実験的に明らかにしたことである。本論文は 10 章から構成されている。

第 1 章では本研究の背景、目的および論文の構成が述べられている。半導体フォトリフラクティブ多重量子井戸素子の開発の重要性、およびその製作技術の近年の進歩と、本研究のねらいについて述べられている。

第 2 章ではフォトリフラクティブ効果について、その原理について述べられている。結晶におけるフォトリフラクティブ効果のメカニズムとして広く受け入れられているバンド輸送モデルに基づき、フォトリフラクティブ効果発現の原理と、特徴について述べたのち、フォトリフラクティブ効果に基づく現象の基本過程である 2 光波混合および 4 光波混合について解説している。さらに従来のバルクフォトリフラクティブ材料について、その特徴が述べられている。

第 3 章では、半導体フォトリフラクティブ量子井戸素子に関して、まず量子井戸構造とそれにおける特徴的な電子状態・光学応答について述べられ、次にフォトリフラクティブ材料としての半導体量子井戸材料の特徴と、フォトリフラクティブ素子としての基礎として、利用する電気光学効果、3 種類の基本的な素子構造について述べられている。ここで、なぜこの素子で高速性と大きな効果が両立できるのかが述べられ、この材料の重要性が強調されている。さらに半導体フォトリフラクティブ多重量子井戸素子における光波混合について、バルク素子との違いを中心に解説されており、吸収格子と屈折率格子が共存する場合の光波混合に関して述べられている。最後に過去の研究例が素子開発と応用に分けて紹介されている。

第 4 章では素子を作製する要素技術となる半導体薄膜成長技術と半絶縁化法について述べられている。成長法に関しては、実際の素子作製を行った分子線エピタキシー法(MBE)と有機金属気相成長法(MOVPE)が解説されている。フォトリフラクティブ効果の発現に不可欠な反絶縁化に関しては、加速イオンの打ち込みによる不純物ドーピングと、低温成長法によるトラップの導入法について述べられている。これらの方法は後の素子作製で実際に使われている。

第 5 章では InGaAs/GaAs 系材料を用いた横配置のフォトリフラクティブ多重量子井戸素子について、その作製と特性評価に関して述べられている。InGaAs/GaAs 系材料においてフォトリフラクティブ効果の報告されたのは本論文がはじめてである。まず横配置の素子に関する動作の基本に関して、バンド輸送モデルに基づく解析が述べられ、次に InGaAs/GaAs 量子井戸の特徴が、他の材料を用いた量子井戸素子との比較を交えて述べられている。さらに反絶縁化法としてプロトン打ち込みを採用した素子の作製と評価が述べられている。イオン打ち込みによる反絶縁化に関する評価、イオン打ち込み前後の励起子吸収スペクトルの比較、光波混合実験によるフォトリフラクティブ効果の測定が行われている。ついで、波長 1.06 μm に感度を持つ同じく InGaAs/GaAs 量子井戸によるフォトリフラクティブ素子に関する作製と評価に関して述べられている。波長 1.06 μm に感度を持つフォトリフラクティブ多重量子井戸も、本研究がはじめての報告例である。感度を持つ波長を長波長側にシフトさせるため、In 組成を増大させたが、これにより GaAs との格子定数の不一致が増大し、そのままでは良好な量子井戸結晶を成長するこ

とができないが、これをひずみ緩和層の導入により解決した。この素子に関してもフォトリフラクティブ特性の評価を行い、良好な結果を得ている。最後に作製の容易さからこれまでに報告例の多い AlGaAs/GaAs 系の素子との比較が行われ、更なる素子改良の指針が考察されている。最後にチタンイオンを打ち込んで絶縁化を行った素子の作製と諸特性の評価に関する結果が述べられている。

第 6 章では縦配置の InGaAs/GaAs フォトリフラクティブ多重量子井戸素子に関して述べられている。まず縦配置での動作原理および素子構成が述べられ、その素子特性として励起子吸収スペクトル、電気光学効果、フォトリフラクティブ効果に関する測定結果とその検討が行われている。横配置に比べて大きな回折効率が得られたが、時間的には過渡的な効果となっていることが述べられている。さらに屈折率格子の正弦波からのずれ、すなわち高次成分に関する評価が行われ、さらにロックインアンプによる時間平均回折効率の測定とその結果の検討が行われている。

第 7 章ではキャリアのトラップとなるクラッド層の設計による縦配置フォトリフラクティブ多重量子井戸素子の高分解能化と時間応答の制御について述べられている。まず縦配置の素子の空間分解能の決定要因に関して考察した後、量子井戸層とクラッド層の間のポテンシャルステップの影響についての考察が行われている。この考察に基づき、ポテンシャルステップの異なる素子を試作して実験的に素子特性への影響を調べている。その結果、ポテンシャルステップをゼロにすることにより、クラッド層内部にキャリアを導入し、そこでトラップすることにより、横方向のキャリアの拡散を押さえ、過渡的であった時間応答を定常的なものにし、さらに空間分解能も向上できることを見出した。モデル計算によるこの結果の裏付けも行っている。

第 8 章では結合量子井戸構造を用いたフォトリフラクティブ多重量子井戸素子の広帯域化について述べられている。まずこの素子のフェムト秒パルスの波形整形への応用を考えた際に必要とされる波長帯域幅の要求と、これまでの広帯域化への試みの報告例について述べた後、本研究のオリジナルである結合量子井戸を用いた広帯域化の概念について解説している。さらにこれに基づく素子設計の指針と実際の回折スペクトルのシミュレーション計算の方法に関して詳しく説明した後、数値計算による構造設計とその計算結果に関して述べている。その結果非対称結合量子井戸により単純な量子井戸素子に比べ 2 倍程度の広帯域化と同時に、回折効率も 2 倍程度大きくできることを明らかにした。さらにこの設計結果に基づき実際に素子を製作し、その評価を行っている。波長帯域に関しては設計値に近い値が得られており、実用上優れた素子を設計可能であることを示した。

第 9 章ではこれまでに製作した多重量子井戸素子を用いた応用システムの実験例が述べられている。これらの素子を用いた光相関演算および適応型振動計測の例が紹介されている。光相関演算に関しては、厚さが小さく結合係数が大きいという特徴が、振動計測に関しては、応答速度が速く、外乱の影響を除去できる、という特徴が生かされている。振動計測ではサブナノメートルオーダーの微小振動の計測をを実現した。

第 10 章では論文全体の総括が述べられている。

なお、補遺として本素子の内部量子効率の影響に関する考察が付け加えられている。

以上をまとめると、本論文では半導体多重量子井戸フォトリフラクティブ素子に関して、InGaAs という新しい材料組成による素子の感度波長域の拡大、および構造設計による素子の高分解能化と定常的な回折光の発生、さらに非対称結合量子井戸の導入による素子の広帯域化という、フォトリフラクティブ素子の高機能化を実現するための指針とその設計法および実験的な検証が示されている。本論文で示された高機能フォトリフラクティブ素子の実現の方法は、フォトリフラクティブ素子の実用化への方向性を示したという点で、光エレクトロニクスおよび物理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。