

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 岩本 敏

フォトリフラクティブ効果は照射された光の強度分布に応じて材料の屈折率，吸収係数が変化する現象であり，低出力レーザーでも大きな光非線形性が得られることから，情報，計測分野などへの応用が期待されている。特に半導体フォトリフラクティブ多重量子井戸素子(Photorefractive Multiple Quantum Wells, PRMQW)は励起子に起因した大きな電気光学効果と半導体の大きなキャリア移動度のため，高速かつ高感度な実時間ホログラムの記録媒体として期待されデバイス研究が進められてきた。近年，この特長を活かし光情報処理，適応型光計測や光短パルス制御などへの魅力的応用が検討されている。しかしながら，これら応用研究の実用化や新たな応用の実現に向けて，より高機能な素子実現への要求が高まっている。PRMQW の一つの特徴は材料，構造を人工的に容易に変えることが出来る点にある。本研究はこの特徴を活かし，材料および構造を設計することでPRMQW の高機能化を目指したものである。

主な研究内容は(1)材料設計による動作波長域の拡大，(2)構造設計による高機能化，および(3)作製した素子を用いた応用である。以下それぞれの概要を述べる。

(1) 材料設計による動作波長域の拡大

これまでPRMQWの研究は作製が容易なAlGaAs/GaAs MQWを用いて進められてきた。PRMQWでは励起子に共鳴した電気光学効果を利用するため，この材料系の感度波長域は800-850nmに限られる。そのため他の波長域で素子を利用するためには新たな材料系での

素子研究が必要である。本研究では光計測、生体計測で有用な波長 $1\mu\text{m}$ 近傍に着目した。InGaAs/GaAs MQW を用いて波長 920-950nm, 1064nm で動作する素子をはじめて作製し、井戸層に平行に電界をかける配置(横配置)で良好なフォトリフレクティブ特性を得た。特に素子が安価で汎用性の高いレーザーの波長に感度を持つことは応用上重要なポイントである。波長 1064nm は広く利用されている Nd:YAG レーザーの波長であり、応用分野を手がけるグループから素子提供を求められるなど注目されている。

波長 1064nm に感度を持つ素子では、量子井戸の励起子共鳴波長を 1064nm に合わせるために高い In 組成($\sim 25\%$)の MQW が必要であり、InGaAs と GaAs との大きな格子不整合が素子作製上の問題となる。本研究では MQW をその平均格子定数を持つバッファ層(Strain-Relief Buffer, SRB)上に成長することで、この問題を解決し波長 1064nm で動作する素子を作製することに成功した。素子は有機金属気層成長法により成長し、フォトリフレクティブ効果の発現に不可欠な深いトラップ準位はプロトン打ち込みにより導入した。最大回折効率は $0.1\% @ 15\text{kV/cm}$ ($1500\text{V}/1\text{mm}$)であった。

波長 930-950nm, 1064nm のいずれの素子においても回折効率は AlGaAs/GaAs PRMQW に比べて一桁近く小さい。これは InGaAs-GaAs 間の格子不整合などの影響により、励起子吸収線幅が増大し、電気光学効果が小さくなっていることに起因する。

回折効率の向上を目指し、量子閉じ込めシュタルク効果を利用する縦配置 InGaAs/GaAs PRQW 素子(950nm)も作製した。同じ波長に感度を持つ横配置の素子に比べ 10 倍近い回折効率が得られるものの、空間分解能は横配置の $1/10$ 程度であった。高効率と高分解能の両立については“(2)構造設計による高機能化”の項で述べる。また高次回折光の時間波形から内部電場分布の時間発展の様子を考察した結果、内部電場の空間分布は正弦波状から方形波状へと、その変調度を下げながら変化していくことが明らかとなった。

(2) 構造設計による高機能化

縦配置の素子は電気光学効果を示す MQW 部分とそれを挟む高抵抗クラッド層で構成され、低い駆動電圧($\sim 10\text{-}20\text{V}$)で大きな光非線形性が得られるのが魅力である。本研究ではこの縦配置の構造を設計することで素子の高機能化を行った。具体的には、(a)クラッド層の設計による高分解能化、および定常的回折光発生、(b)結合量子井戸構造を用いた素子感度波長帯域の拡大を行った。

(a)素子の高分解能化と定常的回折光発生

縦配置の欠点であった低空間分解能を克服し、大きな回折効率と高い空間分解能を両立させることを目指した。特にキャリアトラップとして働くクラッド層が素子特性に与える影響を検討し、高分解能高効率素子実現への指針を得た。これまでクラッド層の影響を系統的に調べた例はなく本研究がはじめてである。素子は分子線エピタキシーを用いて成長した。量子井戸部分には InGaAs/GaAs MQW を、クラッド層には低温成長した $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (500nm)を用いた。量子井戸部分の構造は同一で、クラッド層の Al 組成 x が異

なる3つの素子($x=0, 0.3, 0.5$)を作製・評価した。その結果、クラッド層のAl組成が小さいほど大きな回折効率を示し、高い空間分解能をもつことが明らかとなった(図1)。Al組成が大きくなるにつれてMQW部分とクラッド層間のポテンシャル障壁は増大し、キャリアがMQW/クラッド界面のMQW側に蓄積される。MQW部分は半絶縁化されていないため、キャリアの面内移動は大きい。この面内移動により内部電場の変調度が低下し、効率および分解能が低下すると考えられる。また、GaAs($x=0$)クラッド層を用いた素子では入射光強度によって縦配置特有の過渡的回折光から定常的回折光へと時間応答が変化すること、回折効率を最大にする最適入射光強度が存在するといった特異な現象が観測された。これはクラッド層に注入される暗電流の影響である。暗電流の影響を取り込んだ簡単なモデルを構築し、観測された時間応答、回折効率の光強度依存性を説明できることを示した。

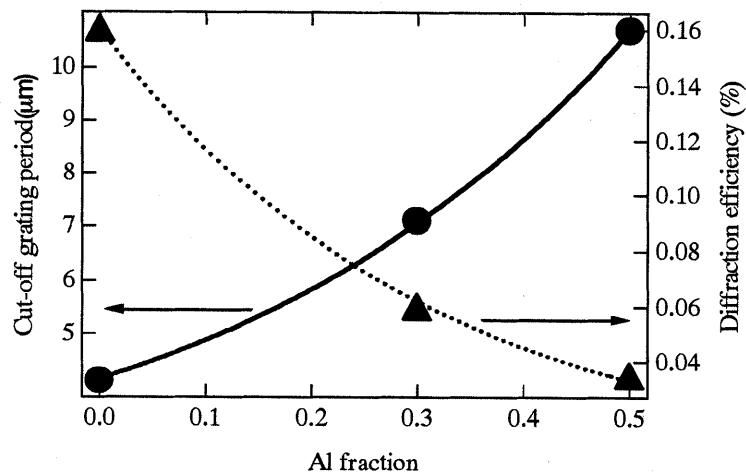


図1:回折効率(▲)とカットオフ格子間隔(●)のクラッド層Al組成による変化
 カットオフ格子間隔が小さいほど分解能が高い

(b)素子の広帯域化

光短パルスの時間波形を制御する技術は次世代光通信や電子状態などのコヒーレント制御などへの応用上、その重要度は高まっている。すでにPRMQWを用いた光短パルス制御は報告されているが、素子の帯域が狭い(~5nm)ためパルス幅が制限されるのが問題であった。本研究ではMQW部分に結合量子井戸構造を持つPRMQWを新たに提案し、広帯域PRMQWが実現できることを数値計算と実験の両面から示した。まずAlGaAs/GaAs系を想定した数値計算により、適切な非対称結合量子井戸(Asymmetric Coupled Quantum Wells, ACQW)構造を用いれば従来の矩形量子井戸(Rectangular Quantum Well, RQW)構造に比べて感度波長帯域を大幅に拡げることが出来ること、高い回折効率を得られることを示した。これは結合量子井戸構造ではRQW構造に比べてより多くの励起子遷移がバンド端での電気光学効果に寄与できることをうまく利用した結果である。分子線エピタキシーにより、設計されたACQW構造を持つPRMQWを作製し回折効率のスペクトルを測定した(図2)。ACQW構造をもつ素子ではRQW構造の素子に比べて約3倍の回折効率スペクトル半値全幅(12nm)と回折効率(0.36%)が得られえた。

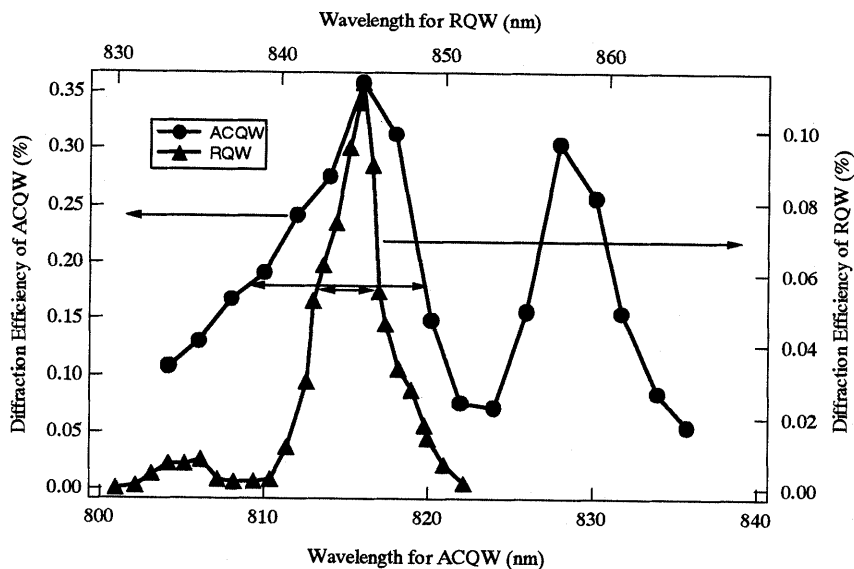


図 2 ACQW 構造(●)と RQW 構造(▲)の回折スペクトル

(3) 応用

本研究で作製した素子を用いて応用実験も行った。二光波混合を用いた適応型振動計測の実験では、横配置 InGaAs/GaAs PRMQW(1064nm)を用いて、高出力 Q スイッチレーザーの照射によりアルミニウムロッド中に励振された振動を測定した。測定結果のフーリエ解析から励振されたロッドの固有振動が計測されていることがわかった。このようなレーザー誘起振動(超音波)の計測は工業分野で特に注目されている技術であり、扱いが容易な Nd:YAG レーザーを用いて適応型計測が簡便に行えるようになった意義は大きい。また画像処理の一例として PRMQW(AlGaAs/GaAs)を用いた光相関演算も行った。PRMQW に書き込まれるホログラムは非常に薄いので Raman-Nath 回折が起こる。そのためシフトインバリエントな相関演算が実現できる。PRMQW は 10mW/cm^2 程度の書き込み光強度で 1ms 程度の高速応答を示すため、低光強度で高繰り返しの光相関を実現できる可能性がある。

本研究では PRMQW が人工材料であることの利点を生かし、材料設計、構造設計による素子の高機能化を検討した。InGaAs/GaAs 量子井戸を用いて、これまで実現されていない波長域での素子作製にはじめて成功した。特に波長 1064nm に感度を持つ素子は、生体計測などの応用研究を手がけるグループから素子提供を求められるなど、その波及効果は大きい。また構造設計による素子特性の制御として、クラッド層の違いによる素子特性の変化を系統的に調べ、量子井戸部分とクラッド層の間のポテンシャルステップが素子特性を決める大きな要因となっていることを示した。また量子井戸部分に非対称結合量子井戸構造を用いて素子の感度波長帯域を拡大する方法をはじめて提案し、実験的にもその有効性を実証した。本研究で得られた結果は、今後の高機能 PRMQW の作製において重要な指針を与えると考えられる。