

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

荒井 滋久 (東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター 教授)

主たる共同研究者

水本 哲弥 (東京工業大学大学院理工学研究科 教授)

3. 研究内容および成果

本研究は、光ファイバ通信用長波長光源に用いられている GaInAsP/InP 系の半導体を対象に、その極微構造を低損傷かつ高精度で形成する技術確立することにより、低しきい値電流・高効率で動作が可能な量子細線レーザなどを実現するとともに、新機能光スイッチの可能性の開拓を目的として行った。

まず、面内での量子閉じ込めを次世代光素子に利用するために、量子細線などの極微構造の形成技術を高度化し、界面非発光再結合の著しい低減とサイズ不均一性に伴う光利得スペクトル幅の低減に成功し、従来のレベル凌駕する低消費電力で動作可能な通信用半導体レーザ実現のための技術基盤を築いた。また、導波路構造のバンドギャップを面内量子サイズ効果で制御し、レーザと他の素子との集積化を可能とする新手法を提示した。さらに、新しい切り口として、高屈折率差導波路を利用した半導体薄膜 DFB レーザの研究も進め、低消費電力動作の可能性を示した。

上記の研究と並行し、半導体ナノ構造の光非線形性を用いた超高速光スイッチの可能性を探る研究を共同研究者と共に進めた。以下、それぞれの研究グループの研究成果の概要を述べる。

### (1) 極微構造グループ

GaInAsP/InP 系の半導体は光通信に広く利用されているが、この材料系で量子細線など低次元量子構造を作成して活用するには、量子構造の界面における非発光再結合過程の抑制と、寸法不均一性に伴う発光スペクトル幅の低減が必須である。前者については、歪補償量子井戸構造を元基板とし、ドライエッチングにより微細構造を形成した後に InP で埋め込むと、格子不整合が蓄積しないため、再成長後に損傷の形成が大幅に低減されることが判明した。この結果、幅 20-30nm の量子細線でも、多層量子井戸構造に近い内部量子効率を得る水準にまで到達した。このプロセスを適用した量子細線 DFB レーザや DBR レーザで、200A/cm<sup>2</sup> 以下の低しきい値電流密度動作が実現した。また、幅 23nm の 5 層の歪補償量子細線を用いたレーザは、40,000 時間を越える室温連続動作の現在も劣化無く動作しており、GaInAsP/InP 系の材料による低次元量子構造を活用する技術基盤は確立できた。

極微構造による量子閉じ込め効果については、歪と応力を考慮したバンド構造解析に加えて、光導波路を量子細線と平行および垂直に配置した 2 種類の量子細線レーザを試作・評価した。その結果、発光ピーク波長の細線幅依存性は、歪応力を考慮しない場合の予測よりも 14meV 程度高エネルギー側になることが分かり、実験と一致することが判明した。

蛍光(PL)および光利得の偏波異方性については、いずれの場合も理論解析の予測の通り、大きな異方性が観測された。これは歪と応力の作用により、SEM 画像から観測される細線幅よりもかなり狭い領域にキャリアが閉じ込められているためと考えられる。

これらの極微構造の作製技術を応用して、多層量子細線 DFB レーザを試作すると共に、そのブラッグ波長を利得ピーク波長より 50nm 程度長波長側に設定することにより、しきい値電流の温度依存性が抑制され、広い温度範囲で動作電流の揃った良好な特性を得た。さらに、活性層に作り込んだ量子細線の幅を種々の値に設定

し、バンドギャップの異なる領域を同一平面内に設けることを可能とした、この技術を用いることにより、単一波長レーザ(DBRレーザ)の1mA以下の低電流動作、単一波長レーザと光吸収変調器やモニタ用光検出器などの集積化が実現した。

低次元量子構造を用いた高性能・新規レーザの開発と並行し、60-200nm厚の薄膜半導体層を低屈折率材料で挟んだ光導波路を用い、光閉じ込めを格段に強めたメンブレイン型レーザの研究も進めた。この構造で、光学利得増大効果を利用したDFBレーザを試作し、低い励起光入力でのレーザ発振を達成した。また、メンブレイン型レーザを、直接貼り付け法でSOI基板上に形成し、85℃までの連続動作が可能となり、集積回路チップ内の超高速光インターコネクションに有用な基本動作の可能性が実証できた。

## (2) 光スイッチグループ

電気信号を要しない全光型のスイッチを形成するために、光によって誘起される屈折率変化の大きさと応答速度を実験的に明確化することと、スイッチングに要するパワーの低減を目標とした。特に、低次元量子構造を用いることにより、屈折率変化を強める可能性を探索した。

GaInAsPバルク結晶を用いた実験では、2準位モデルに基づく理論予測値にほぼ一致する屈折率変化を観測することができた。また、量子構造の利用により、屈折率変化が増大するか否かを調べ、量子井戸ではバルク結晶を凌ぐ屈折率変化が得られることを示した。量子細線では、導波路内部の量子細線の密度が低いこともあり、屈折率変化の増大効果は観測されなかった。

一方、屈折率変化の応答速度については、GaInAsPのバルク結晶と量子構造ともに、ポンプ光強度が10MW/cm<sup>2</sup>以下の弱い領域では、ピコ秒幅の光パルスのに追従する応答を示し、所期の目的の通り、超高速全光スイッチ用の材料として適していることを実証できた。一方、ポンプ光強度を強めると、実キャリアの生成が起きるため、回復時間の遅い(数100ピコ秒)屈折率変化が顕在化することが分かった。従って、超高速スイッチ応用には低ポンプ光強度での動作が必要である。

さらに、分布帰還(DFB)導波路中のポンプ光誘起屈折率変化を用いた全光スイッチ素子の応答速度について検討した。CWプローブ光の波長を、デバイスが動作するDFBストップバンド端に設定し、ピコ秒時間幅のポンプ光で透過プローブ光が変調される時間応答特性測定の結果、100Gbit/sの光信号に対応するデバイス動作が可能であるとの見通しを得た。

## 4. 事後評価結果

### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究は、光ファイバ通信の長波長光源に用いられているGaInAsP/InP系半導体を対象に、損傷が少なく精度の高い形成技術を開拓し、量子細線など極微の構造を実現することにより、低しきい値で高効率動作が可能な高性能レーザの実現と新機能光スイッチの開拓を目的として行った。電子線リソグラフィとドライエッチング加工の後に、埋め込み成長を行う手法で良質な量子細線などの形成を可能とした。トップダウン的手法の設計自由度の大きさを活用し、受動素子とレーザを集積化した素子も実現した。本研究の主な成果は以下の通りである。

[1] 歪補償量子井戸を用いた10nm級のエッチングと再成長プロセスを確立した。この方法で懸念される損傷や寸法揺らぎを抑制し、試作素子の特性と信頼性を実際に評価し、有効性を示した。

[2] 誘電体やポリマー材料をクラッド層とする半導体薄膜DFBレーザを試作し、光励起ではあるが、有望な特性を得た。

[3] 量子細線においてバンドギャップが線幅で制御できることを活用し、面内にレーザの活性層だけでなく分布反射鏡領域や光検出素子などを一括集積形成する手法を開拓した。

[4] GaInAsPのバルク結晶、量子井戸、量子細線について、光で誘起する屈折率変化の大きさや応答速度を明らかにし、DFB波導路中に全光スイッチを形成し、100Gb/sの動作を実証した。

[5]量子細線をレーザ活性層として活かす試みでは、細線の寸法揺らぎがある程度まで残り、閾値電流やスペクトル幅に関しては、量子井戸に及ばない結果となった。

これらの成果についての発表は、国際学術誌の論文42件、国内論文0件、口頭発表は、国際会議61件、国内会議90件、ポスター発表は国際会議12件、国内会議12件である。この他、国際会議で12件、国内会議で3件の招待講演を行った。また、特許の出願はない。

#### 4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

量子細線や量子ドットなど人工的ナノ構造をすぐれたレーザの実現に用いる試みでは、自己形成手法(ボトムアップ方式)で作られたナノ構造を利用することが多い。自己形成手法は、作成が容易であり、加工損傷も抑制できるが、形状と位置の制御が難しく、光学特性の最適化にも困難がある。これに対し、本研究では、産業的に実績のある半導体微細加工技術を極限まで発展させ、希望の形状の構造を作り、優れたデバイス性能を実現することを目指している。トップダウン手法では、任意の面内形状を持つ構造が実現できるが、線幅揺らぎや加工損傷が問題となる。本研究では、化合物半導体において致命的とされた加工損傷を抑制する手法を確立するとともに、寸法揺らぎが許容できるやや幅広い細線構造を採用することで、量子細線を現実的な素子に応用する道を開いた点で、高く評価できる。特に、線幅を精密に制御して、バンドギャップを面内で制御し、高品質DFBレーザだけでなく、光変調器や検出器との集積化も可能にしており、次世代デバイスへの応用が大いに期待される。産業化しやすく信頼性の高い技術であり、インパクトは非常に大きい。

#### 4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

本グループは、内外で高い評価を受けており、後継プロジェクトは、文部科学省科学研究費特別推進研究「Si系LSI内広帯域配線層の為のInP系メンブレン光・電子デバイス」(代表 荒井滋久、平成19年度～23年度)に採択された。後継プロジェクトは、本CRESTプログラムで推進した「薄膜半導体構造による低消費電力光デバイスの研究」の研究代表者の荒井教授と、CRESTプログラムの同一領域の「超ヘテロナノ構造によるバリスティック電子デバイス」の研究分担者である宮本恭幸准教授(超高速メンブレン電子デバイス)および浅田雅洋教授(THz固体素子によるチップ間信号伝送)らとの共同提案によるものである。本CREST領域での研究成果を礎として、新たな方向に研究を推進する。また、実用化に向けた展開としては、本研究で開発の低損傷極微構造形成技術は、文部科学省ナノテクノロジー総合支援サービスの一環として外部に提供され、NECナノエレクトロニクス研究所による「可変光減衰器を集積した多波長レーザ光源」として結実している。

受賞としては、第11回エレクトロニクスソサエティ賞 化合物半導体・光エレクトロニクス分野として荒井 滋久、「長波長帯光ファイバ通信用半導体レーザに関する先進的研究貢献」(平成20年3月決定)、19th Int I Conf. on Indium Phosphide and Related Materials "Best Student Paper Award"、として S. M. Ullah, R. Suemitsu, S. Lee, N. Nishiyama, S. Arai "Sub milliamper Operation of 1540nm Wavelength Distributed Reflector Laser with Wirelike Active Regions."平成19年5月17日、第15回応用物理学会講演奨励賞(応用物理学会)として岡本健志(共著者:山崎達也、田村茂雄、荒井滋久)、「位相シフト半導体薄膜BH-DFBレーザの室温連続動作」(平成16年3月)、第17回応用物理学会講演奨励賞(応用物理学会)として大平和哉(共著者:村山智則、広瀬誠人、八木英樹、アニスル・ハク、田村茂雄、荒井滋久)、「線幅変調回折格子を有する分布反射型(DR)レーザの低しきい値動作」(平成17年3月)が挙げられる。