

「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」

平成14年度採択研究代表者

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)

「低次元量子構造を用いる機能光デバイスの創製」

1. 研究実施の概要

半導体レーザは、光を増幅する機能を担う活性層を極微化して量子効果を顕著にすることにより、従来にはない低消費電力動作をする可能性がある。この研究では、リソグラフィと低損傷エッチングおよび埋め込み再成長プロセスを用いて、高品質の低次元量子構造およびこれを用いる高性能レーザを実現することを目的とする。さらに、人工異方形状の低次元量子構造の実現と、これを用いる新しい機能光デバイスの実現を目的とする。

2. 研究実施内容

本研究は、量子効果による高性能光半導体デバイスの可能性を探索することを目的として行った。GaInAsP/InP長波長半導体材料による量子細線レーザの製造法として、電子ビーム露光装置による直接描画、ドライエッチング、および有機金属気相成長法による埋め込み成長プロセスを用いた。この方法は、量子ドット構造の作製法として広く用いられている自己組織化成長法に比べて任意の極微形状を形成できる点、および活性層の周期的配置による分布帰還レーザへの応用の観点で有利であると考えられるためである。本年度は、極微構造の高密度化・低損傷形成の観点から研究を行い、以下(1)～(12)に挙げる成果を得た。

また、新しい光機能デバイスの創製を目指して、光ファイバ通信波長帯で動作する全光スイッチングデバイスを検討した。化合物半導体GaInAsPにおいて光強度に依存して屈折率が変化する効果と、分布帰還(DFB)構造における透過率の急峻な変化を組み合わせ、制御光(ポンプ光)で信号光(プローブ光)の透過状態を制御することができる。今期は、特に、ポンプ光強度によってGaInAsP中に発生する屈折率変化の大きさと応答速度を明確化することと、新規な光機能デバイスのための製作技術の確立を目的として研究を行い、次の(13)～(16)に挙げる成果を得た。

- (1) 電子線直接描画、メタン・水素混合ガスを用いる反応性化学エッチング、有機金属気相成長法による埋め込み成長プロセスを用いて、5層歪補償量子井戸構造を、細線幅70nm、43nmおよび23nmの細線状に加工した活性層を有するGaInAsP/InP歪補償量子細線レーザを試作した。このレーザを銅マウント上に成長面を上にして

ボンディングを行った結果、全ての素子において室温連続発振が観測された。さらに、この細線幅23nm、周期80nmの量子細線レーザの室温連続動作試験を行った結果、17,600時間以上経過後も良好な特性を維持し続けることを確認した。以上の結果から、本作製法により実現された量子細線レーザが良好な初期信頼性を有していることを明らかにした。

- (2) 完全歪補償量子井戸構造と上述した作製法を用いて細線幅14nm、周期80nmの5層量子細線レーザを実現した。その結果、自然放出光スペクトルの測定と理論解析との比較により、不完全な歪補償構造を用いた場合よりも小さなブルーシフト量は、圧縮歪量子細線と埋め込まれたInPとの間の格子不整合に起因して生じる3次元圧縮応力の影響が低減されたことによるものであり、その自然放出光スペクトルが高エネルギー側において量子薄膜レーザよりも急峻に変化するものは、キャリアの横方向量子閉じ込め効果に起因するものであることを示した。
- (3) 量子細線レーザの低しきい値電流動作のために、反射鏡損失を低減することによる基底準位間でのレーザ発振実現に着目した。実際に、一回折格子から成るSiO₂/半導体反射鏡（周期395nm、半導体幅120nm）を有する量子細線レーザ（細線幅19nm、周期100nm）を試作した結果、狭ストライプ構造の成長面側における電極形成の困難さから、良好な特性は得られなかったが、同一基板上に作製された量子薄膜レーザよりも低しきい値電流密度、ならびに同等な外部微分量子効率が得られた。また、その発振波長は理論解析から推測された第二準位からの発光波長とは一致せず、基底準位発振していることが確認された。
- (4) 上述した作製法を用いて歪補償量子細線活性層を有する活性層分離型DFBレーザを初めて実現した。その結果、細線幅24nm、ストライプ幅3.0μm、共振器長330μmの素子において、しきい値電流 2.7mA（しきい値電流密度：270A/cm²）が室温連続動作条件下で得られ、活性層の体積効果及び活性層分離型DFB構造に起因した高内部反射により、低しきい値電流動作を実現した。また、外部微分量子効率は19%/facetとなった。さらに、発振スペクトル測定（注入電流：しきい値の2倍）から、活性層分離型DFBレーザ特有のストップバンドの長波長側における発振が観測されており、発振波長1541nm、副モード抑圧比（SMSR）51dBが得られた。また、しきい値電流密度及び発振波長の温度依存性を測定した結果、ブラッグ波長の変化に依存した特性が観測され、温度に対する波長変化は0.066nm/deg（測定温度範囲：103K – 293K）となり、通常のDFBレーザの約60%となる値が得られた。
- (5) 量子細線は双極子モーメントの大きさが方向によって異なることが知られており、自己形成量子細線レーザにおいて、この影響によると思われる細線方向の共振器に対しての特性の異差が確認されている。そこで、量子細線（周期100nm、平均細線幅35nm）が共振器に対して垂直方向（Q-Wire_⊥）と平行方向（Q-Wire_∥）となる二種類の素子を作製した。これらのレーザの自然放出光効率特性を比較した結果、目

立った異差は観測されなかったが、室温パルス動作下における測定では、Q-Wire_{//}のしきい値電流密度がQ-Wire_⊥と比較して約2倍高い結果となった。また、これらのレーザの利得スペクトルを測定した結果、しきい値利得においては、両者の間で異差が観測されなかったが、Q-Wire_{//}の透明キャリア密度はQ-Wire_⊥と比較して大きな値が観測された。さらに、PL測定による量子細線構造の偏波依存性からも上述した結果を反映した結果が得られた。以上の結果から、量子細線をレーザ共振器に対して垂直に配置することの優位性を明らかにした。

- (6) これまでに活性層分離型DFBレーザの高効率動作を目的として、分布反射型(DR)レーザの提案・試作を行ってきた。本レーザは活性DFB領域と受動DBR領域から構成されており、これら2領域の集積方法として、共振器内部で活性層幅を変調させて、横方向量子閉じ込めに起因した遷移エネルギーのシフトを利用した手法を用いた。受動領域に量子細線構造を用いることで、発振波長に対して低損失導波路が得られ、高反射率DBRが実現できる。この集積法を用いて、片端面にDBR領域を持つDBRレーザを作製した結果、通常のFPレーザの約2倍の高効率動作を実現し、高反射率DBR領域が得られることを明らかにした。それを用いて活性領域(周期240nm、活性層幅90nm)と受動DBR領域(周期241.25nm、活性層幅40nm)を集積したDRレーザを作製した結果、ストライプ幅4.4 μm 、活性領域長300 μm 、受動領域長210 μm の素子において室温CW駆動で、しきい値電流2.5mA(しきい値電流密度190A/cm²)、前端面(η_{df})より外部微分量子効率36%という高効率動作が得られた。また、後端面(η_{dr})から0.54%が得られ、前後出力比66というDRレーザ特有の大きな非対称出力特性が観測された。しきい値電流の2倍の注入電流において副モード抑圧比(SMSR) 54 dBの良好な単一モード特性を得た。また、同一基板上に作製した別の素子においては低しきい値電流1.5mA、 η_{df} =21%を実現した。これらの特性のばらつきは素子端面における回折格子の端面位相の影響であると考えられるため、端面に無反射コーティングを施すことにより、素子特性の安定化が期待できる。
- (7) 上記のDRレーザはレーザストライプ形成をウェットエッチングにより行っているため、ストライプ幅の精密な制御、2.5 μm 以下の狭ストライプ構造を作製することが困難であり、横モード単一化に問題が残る。そこで、ストライプ作製行程をウェットエッチングとドライエッチングを組み合わせた方法に変更し、狭ストライプ構造を実現した。ストライプ幅2.1 μm のDRレーザにおいて室温連続動作で最低しきい値電流1.1mA(しきい値電流密度160A/cm²)、 η_{df} =13%が得られ、その発振スペクトルより横高次モードが抑制された優れた単一モード動作(SMSR>40dB)を確認した。
- (8) DRレーザの低しきい値動作を目的として、活性領域回折格子に位相シフトを導入した素子を試作した。位相シフト量を $\lambda/8$ とすることで位相シフトを持たないDRレーザの約半分のしきい値電流が得られ、位相シフトによるモードで安定発振が

得られることを明らかにした。作製した素子において室温CW駆動にて、低しきい値電流1.2mA、 $\eta_{df}=13\%$ を実現した。また、ストップバンド内に位相シフトによる発振モードを観測し、SMSR 45dB以上の優れた単一モード特性を得た。

- (9) レーザ活性層に生じる光利得を最大限に利用した高性能半導体レーザ実現のために厚さ約0.1 μm 程度の半導体薄膜を屈折率の大きく異なる誘電体ベンゾシクロブテン (BCB) で挟み、活性層分離型DFB構造を付加した場合、通常素子に比べて3倍以上の光閉じ込め係数、3桁大きい屈折率結合係数を得ることができる。この構造を「半導体薄膜DFB」と名づけ、理論解析および構造試作を行ってきた。これまでに、光励起による室温連続励起により共振器長120 μm の素子において、0.64mWの低しきい値動作を確認した。また、SMSRは45dBとなり、単一モード動作を確認した。又、共振器中央部に $\lambda/4$ 位相シフトを付加することによって、共振器長50 μm の素子において室温連続発振を確認した。しきい値パワーは3.1mWであり、しきい値の2倍程度の励起においてSMSRは35dBとなった。
- (10) 更なる短共振器動作を目指し、凹凸形状の回折格子を装荷した半導体薄膜レーザを作成した。半導体薄膜DFB構造はクラッド部分に低屈折率材料を用いているため、再成長時の膜厚を制御してやることで、凹凸形状を形成しDFBの屈折率差を強くすることが出来、より短共振器での発振が期待できる。今回、再成長の時間を変化させた（再成長時間13分、9.8分、6.5分）3種類のレーザアレイを作成した。再成長の時間を短くすることで、通常素子と比較して短い共振器長である80 μm の素子から室温連続発振を確認することができた。また、再成長時間を最も短くした素子において、内部反射の強さを表す屈折率結合係数 κ_i は 2900cm^{-1} が見積もられ、凹凸形状回折格子を装荷しないものと比較して3倍程度の屈折率結合係数が見積もられた。しきい値パワーは共振器長80 μm の素子において1.3mWとなり、SMSRはしきい値の3倍程度の励起において34dBとなった。
- (11) 又、上記の凹凸形状回折格子を用いた素子においては、横モード単一化がされておらず、ストップバンド幅も不明瞭なものであったため、横モード単一化を目指して、ストライプ幅0.4 μm ~2.0 μm を持つ、凹凸形状回折格子を装荷した半導体薄膜DFBレーザアレイを試作した。ストライプ幅1.6 μm の素子において最低しきい値パワー0.85mWを記録し、SMSRはストライプ幅1.2 μm の素子において、しきい値の3倍において37dBと良好な特性を得た。また、ストライプ幅1.0 μm のときに、完全軸モード単一化を確認した。
- (12) 半導体レーザは温度に対して敏感であり、DFBレーザやDBRレーザ等を例にとると通常、温度が1 $^{\circ}\text{C}$ 上昇するごとに発振波長は0.1nm以上長波側にシフトする。本構造でクラッド層に用いているBCBは半導体材料とは逆の負の屈折率温度係数を持っているため、半導体コア厚を制御することにより発振波長のアサーマル化を実現できる。理論計算によると発振波長のアサーマル化を実現するためには、半導体コア厚を40-50nm程度にする必要がある。そこで、半導体コア厚の異なる2

種類の素子（コア厚150nm、65nm）を作製し、発振波長温度特性の比較を行った。それぞれにエッチング、再成長による活性層分離型DFB構造を形成してある。両方の素子において室温連続動作が得られた。コア厚150nmの素子においては $d\lambda/dT$ が $5.26 \times 10^{-2} \text{nm/K}$ であったのに対してコア厚65nmの素子においては $2.45 \times 10^{-2} \text{nm/K}$ と半分以下（従来の半導体レーザの約1/5）に低減しできた。以上より、誘電体材料との組み合わせによる動作波長温度特性の改善を、半導体レーザの発振動作として初めて確認することに成功した。

- (13) 回折格子による分布帰還(DFB)を用いた全光スイッチングデバイスの応答速度を明確化するために、バンドギャップ波長 $\lambda_g = 1430\text{nm}$ 、 1390nm 、 1200nm のバルクGaInAsPの光強度依存屈折率変化について、その大きさと応答速度をループ型干渉計で測定した。その結果、波長 1530nm 、パルス幅 10ps のポンプ光に対して追従する比較的高速な光強度依存屈折率変化が存在することを明らかにした。さらに、プローブ光波長 1550nm に対する光強度依存屈折率変化の大きさは、 $\lambda_g = 1430\text{nm}$ および 1390nm のGaInAsPで、それぞれ $-2 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{W}$ 、 $-1.5 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{W}$ であることを明らかにした。また、 $\lambda_g = 1200\text{nm}$ のGaInAsPにおいては比較的高速な屈折率変化が極めて小さく、本測定系では測定できなかった。これらの、バンドギャップ波長に対する光強度依存屈折率変化の依存性は、2準位系モデルに基づく計算結果と定性的に一致している。
- (14) バンドギャップ波長 $\lambda_g = 1430\text{nm}$ 、 1390nm 、 1200nm のバルクGaInAsPのいずれにも共通して、約 $60\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上のポンプ光強度において、数 100ps 以上の緩和時間をもつ遅い屈折率変化が生ずることが測定により明らかになった。この屈折率変化は光強度に依存して変化するが、前項で得られた屈折率変化と起源が異なり、キャリアの実励起を伴う屈折率変化と考えられる。その起源を解明することは、今後の課題である。
- (15) GaInAsP/InP 7層量子井戸、およびこれを周期 100nm 、幅 30nm で細線加工した7層量子細線において、光強度屈折率変化の測定を試みた。限られたサンプルのみの測定であったが、いずれの量子構造においても、 100ps 以上の遅い緩和を有する屈折率変化に埋もれて(13)項で述べたような 10ps 程度のポンプ光に追従して変化する高速な屈折率変化は観測することができなかった。量子構造における遅い屈折率変化の大きさを、(14)項のバルクGaInAsPの遅い屈折率変化と比較すると、緩和時間についてはほぼ同じという結果が得られた。また、同一のポンプ光強度に対する屈折率変化の大きさについては、7層量子井戸でバルクGaInAsPの約10倍、量子細線で約7倍の大きさが得られることが明らかになった。量子構造によってキャリアの実励起を伴う過程がバルクGaInAsPに比べて著しく増大し、高速な屈折率変化がこれに埋もれてしまった結果となった。
- (16) 新規な光機能デバイスを開拓するために、異種結晶を光導波路に集積化する方法を検討している。この目的のために、真空中プラズマ処理によるダイレクトボ

ンディングを試み、InP/(CeY)₃Fe₅O₁₂、GaInAsP/(CeY)₃Fe₅O₁₂、Si/(CeY)₃Fe₅O₁₂の組み合わせで、光デバイスへの応用上十分な強度でボンディングを実現できることを明らかにした。これらの材料の組み合わせは、光非相反デバイスへの応用が考えられる。さらに、プラズマ処理による光導波特性の影響について検討した結果、波長1.55μmにおいて光損失の増加をもたらすことなくボンディングが実現できる条件を見出すことができた。

3. 研究実施体制

極微構造研究グループ

① 研究分担グループ長：

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）

② 研究項目：

- ・ GaInAsP/InP半導体極微構造材料の低損傷・高精度形成とその高性能レーザー応用
- ・ 機能性低次元量子構造の創製とデバイス応用

全光スイッチ研究グループ

① 研究分担グループ長：

水本 哲弥（東京工業大学 電気電子工学専攻、教授）

② 研究項目：

- ・ 光ファイバ通信波長帯GaInAsP/InP半導体光スイッチングデバイスの創製と特性評価

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

- T. Okamoto, T. Yamazaki, S. Sakamoto, S. Tamura and S. Arai, “Low-Threshold Membrane BH-DFB Laser Arrays With Precisely Controlled Wavelength Over a Wide Range,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 1242-1244, May 2004.
- H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, D. Plumwongrot, T. Maruyama, A. Haque, S. Tamura and S. Arai, “GaInAsP/InP Partially Strain-Compensated Multiple-Quantum-Wire Lasers Fabricated by Dry Etching and Regrowth Processes,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 6A, pp. 3401-3409, Jun. 2004.
- K. Ohira, T. Murayama, M. Hirose, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, “Low-threshold and high-efficiency operation of 1.5 μm distributed reflector laser with DFB grating and Q-wire DBR sections,” *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 20, pp. 1269-1271, Sep. 2004.

- A. Haque, T. Maruyama, H. Yagi, T. Sano, D. Plumwongrot and S. Arai, "Anomalous in-plane polarization dependence of optical gain in compressively strained GaInAsP/InP quantum wire lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 40, no. 9, pp. 1344-1351, Sep. 2004.
- H. Yagi, T. Sano, K. Miura, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama and S. Arai, "GaInAsP/InP long-wavelength lasers with strain-compensated quantum-wire active regions and SiO₂/semiconductor reflectors," *IEICE Electronics Express*, vol. 1, no. 17, pp. 540-544, Dec. 2004.
- K. Ohira, T. Murayama, H. Yagi, S. Tamura, and S. Arai, "Low-Threshold Distributed Reflector Laser Consisting of Wide and Narrow Wirelike Active Regions," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 264-266, Feb. 2005.
- K. Sakurai, H. Yokoi, T. Mizumoto, D. Miyashita, and Y. Nakano, "Fabrication of semiconductor laser for integration with optical isolator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 4A, pp. 1388-1392, April 2004.
- J.-K. Seo and T. Mizumoto, "Measurement of pump-induced absorption and refractive index changes in GaInAsP/InP waveguides using an optical loop mirror interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 8B, pp. 5800-5804, August 2004.
- H. Yokoi, Y. Shoji, and T. Mizumoto, "Calculation of nonreciprocal phase shift in magneto-optic waveguide with Si guiding layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 8B, pp. 5871-5874, August 2004.
- H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin, and T. Mizumoto, "Interferometric optical isolator employing a nonreciprocal phase shift operated in a unidirectional magnetic field," *Appl. Optics*, vol. 43, no. 24, pp. 4745-4752, August 2004.
- J.-S. Yang, Y. Shoji, H. Yokoi, M. Ono, and T. Mizumoto, "Investigation of Nonreciprocal Characteristics and Design of Interferometric Optical Isolator with Multimode Interference Coupler Operating with a Unidirectional Magnetic Field," *Jpn. J. Appl. Physics*, vol. 43, no. 10, pp. 7045-7049, Oct. 2004.