

「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 量子効果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

半導体レーザーは、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ーを実現することを目的とする。さらに、人工異方性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ーの製造法として、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ー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)～(14)に挙げる成果を得た。

また、新しい機能光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、分布帰還構造による応答速度制限を見積もることを目的として研究を行い、次の(15)～(18)に挙げる成果を得た。

#### 研究の成果

- (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によって、5層歪補償量子井戸構造を周期80nm、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、全ての試料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の量子細線レーザを一定電流で室温連続動作試験を行った結果、10,000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)  $k \cdot p$ 摂動法を用いて、2軸性歪効果の緩和を考慮に入れた圧縮歪GaInAsP多層量子細線構造のバンド構造解析を行い、バリア層に引張歪を導入した歪補償効果と、多層量子細線構造の影響を解析した。その結果、実験で得られているPLスペクトルのブルーシフト量の細線幅依存性をフィッティングパラメータを用いることなく説明することができ、ドライエッチング及び再成長法により作製された多層量子細線レーザのブルーシフトがキャリアの横方向量子閉じ込め効果だけではなく、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より生じる3次元的圧縮応力の影響にも起因していることを明らかにした。また、このバンド構造の結果を用いて、圧縮歪量子細線の自然放出光スペクトル及び利得特性を歪量や多層化された細線の影響を考慮に入れて解析した。そして、活性層の圧縮歪量、バリア層の引張歪量、細線幅や多重量子井戸のバリア歪量によっては、細線に対して垂直方向の光電界強度が強くなった。この結果は3次元的圧縮応力による価電子帯側のバンドミキシングに起因していることを明らかにした。
- (3) 完全歪補償量子井戸構造と上述した作製法を用いて活性層幅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次元的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の、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。
- (4) 量子細線レーザの低しきい値電流動作のために、反射鏡損失を低減して、基底準位間でのレーザ発振実現に着目した。実際に、一次回折格子から成るSiO<sub>2</sub>/半導体反射鏡（周期395nm）を有する量子細線レーザ（活性層幅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、ならびに同等な外部微分量子効率を得られた。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。

- (5) 電子ビーム露光、低損傷ドライエッチング、有機金属気相成長法を用いて、歪補償2層量子井戸構造をレーザ基板とし、活性層を周期240nmで加工した活性層分離型DFBレーザを試作した結果、これまでに、ストライプ幅 $2.3\mu\text{m}$ の活性層分離型BH-DFBレーザにおいて、室温CW条件で低しきい値電流動作(0.7mA、外部微分量子効率23%/片端面)が得られている。このレーザは活性層分離構造により回折格子の端面位相に影響を受けず安定してストップバンドの長波側で発振することが実験的に確認されている。結合波理論を用いて端面位相の発振波長の安定性への影響に関して理論的解析を行った。両端面の位相を $36\times 36$ 通りに変化させて第1モードと第2モードとのしきい値利得差を計算した結果、すべての場合においてストップバンドの長波長側で安定して単一モード動作することが確認された。
- (6) これまでの活性層分離型DFBレーザは光出力が前後の端面から均一に出るため、更なる高効率化が望めない。そこで、効率向上を目的として、活性DFB領域と受動DBR領域を集積化した新しい分布反射型(DR)レーザを提案し、その理論解析、試作・評価を行った。受動DBR領域の活性層幅を細線化することにより、横方向量子閉じ込め効果に伴う遷移エネルギーの拡大(ブルーシフト)を有効利用して、発振波長に対する導波路損失を低減させ、高反射率DBR構造の実現が可能であると考えられる。この高反射率DBRと活性DFB領域を集積化することにより、低電流かつ高効率動作が可能なレーザが実現できると考えられる。理論解析において周期240nm、細線幅40nmとすることにより反射率97%の高反射率DBRが実現できることを示した。また、その高反射率DBRを用いることで、しきい値電流を半減させ片端面からの出力効率を倍増できる可能性を示した。素子を試作した結果、周期240nm、活性層幅( $W_a$ )85nmの活性領域と細線幅( $W_p$ )30nmの受動領域の集積化に成功し、ストライプ幅( $W_s$ ) $20\mu\text{m}$ 、活性領域長 $L_a = 240\mu\text{m}$ 、受動DBR領域長 $L_p = 440\mu\text{m}$ の素子において、しきい値電流密度 $320\text{A}/\text{cm}^2$ (しきい値電流15.4mA)、前端面より16.2%、後端面より0.57%の外部微分量子効率が得られ、前後出力比28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。しかしながらストライプ幅が広いため、しきい値電流の増加、多モード発振を招いてしまった。そこで、低電流化および単一モード動作化を実現するために、 $W_s = 3\mu\text{m}$ の狭ストライプDRレーザを試作した。周期240nm、活性層幅110nmの活性領域と細線幅35nmの受動領域を有する素子において、室温CW条件下で低しきい値電流7.6mA、前端面からの外部微分量子効率5.1%が得られた。また、しきい値の1.2倍の低注入レベルにおいてSMSR 40dBが得られ、単一モード動作を確認した。
- (7) 続いて、受動DBR領域の反射率を見積もることを目的として、実際にDBR領

域を集積したFPレーザを作製し、その前後出力比からDBR領域の反射率を見積もった。その結果、DBR長150 $\mu\text{m}$ 活性層幅25nm及びDBR長300 $\mu\text{m}$ 活性層幅13nmにおいて90%以上の高反射率DBRが形成されていることを確認した。

- (8) 上記のDRレーザは電極形成プロセスが困難であることから良好な特性が得られなかった。そこでレーザストライプ構造をダブルチャンネル構造とし、誘電体BCBを用いて平坦化することにより、その形成を容易にした。この構造を用いて作製したDRレーザ ( $L_a = 260 \mu\text{m}$ 、 $W_a = 110\text{nm}$ 、 $L_p = 120\mu\text{m}$ 、 $W_p = 60\text{nm}$ 、 $W_s = 4.3\mu\text{m}$ ) において、しきい値電流3.2 mA、前後からの外部微分量子効率19.2 %、1.7 %が得られ、SMSR 46.6 dB ( $I = 3.75 I_{th}$ ) の単一モード特性が実現できた。
- (9) このDRレーザは低しきい値化、単一モード化は実現できたが、期待通りの効率増加を実現できなかった。この原因としてストライプ形成時にドライエッチングを用いていることに注目し、さらなる効率増加のために、ストライプ形成をウェットエッチングに変更した。活性領域 (周期241.25nm、 $W_a = 90\text{nm}$ ) と受動領域 (周期242.5nm、 $W_p = 40\text{nm}$ ) を集積したDRレーザを作製した結果、ストライプ幅4.4 $\mu\text{m}$ 、 $L_a = 300\mu\text{m}$ 、 $L_p = 210\mu\text{m}$ の素子において、しきい値電流2.5mA (しきい値電流密度189A/cm<sup>2</sup>)、前端面および後端面より35.6%、0.54%の外部微分量子効率が得られた。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。また、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) 53.7 dBの良好な単一モード特性を得た。
- (10) 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 $\mu\text{m}$ 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、1.5mWの低しきい値動作を確認した。また、SMSRは42dBとなり、単一モード動作を確認した。今回、共振器中央部に $\lambda/4$ 位相シフトを付加することにより、短共振器のレーザを作製したところ、共振器長50 $\mu\text{m}$ の素子において室温連続動作を確認した。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。
- (11) 昨年度からの研究において、半導体薄膜DFBレーザをアレイ状に並べた場合の発振波長は、同構造の素子の場合 $\pm 1.2\text{nm}$ の範囲内で、構造を少しずつ変化させた場合 (チャンネル間隔:3.4nm) は最小二乗近似から $\pm 0.4\text{nm}$ の範囲内での制御が可能であることが確認できた。(発表論文8、国際会議発表6、国内会議発表4) 今回はさらに細かい間隔で波長を並べるために、DFBの細線

幅を変化させた素子を10 $\mu\text{m}$ おきにアレイ状に並べた構造を作製した。DFB周期は305-325nmの範囲で5nmおきに、それぞれ9種類の細線幅を用意した。45個全ての素子について室温連続動作を確認した。さらに43個の素子においてストップバンドの長波側での発振を確認できた。このことは、活性層分離型DFB構造の場合、位相シフトを付加しない共振器においても各モードのしきい値利得差が0にならないので、2モード発振を防げることを示している。周期320nmのアレイにおいて、チャンネル間隔は1.28nmであり、最小二乗近似からのずれは $\pm 0.34\text{nm}$ であった。また、最低しきい値は0.64mWとなった。

(1 2) 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。ところで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、半導体コア厚を最適化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）に低減していることが分かる。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。

(1 3) 高性能1.55 $\mu\text{m}$ 波長半導体レーザの低コストプロセスを目的として、上記ドライエッチング法による半導体/BCB極微溝DBR反射鏡を有するレーザの試作・評価を行った。単一波長動作を目的として、半導体/BCB極微溝DBR反射鏡を有する結合共振器レーザ、およびストライプ側面に回折格子を形成したDFB/DBRレーザを試作した結果、DBR反射鏡は光導波のされていない $\text{SiO}_2$ 部分で回折損失が存在する。そこで、回折損失低減のため半導体/ $\text{SiO}_2$ 極微細1次DBR反射鏡を有するDFB/DBRレーザを試作した。ストライプ幅1.3 $\mu\text{m}$ 、共振器長210 $\mu\text{m}$ でしきい値電流3.6mA、外部微分量子効率16%/片端面およびSMSR35dB(@ $I=5.5I_{\text{th}}$ )が得られた。また、DBR反射鏡の垂直性を向上するためドライエッチング条件の改善を行い、一次DFB/DBRレーザを試作した。その結果、低しきい値電流(2.8mA)、およびSMSR44dB(@ $I=5I_{\text{th}}$ )を得た。

(1 4) 垂直回折格子を有する光導波路の実験結果より、TEよりもTMモードの方が、より高い結合係数が得られることが報告されている。そこで、引張歪を有する単層量子井戸を導入した、1次DFBレーザを作製した。ストライプ幅1.0 $\mu\text{m}$ 、共振器長460 $\mu\text{m}$ で、しきい値電流2.8mA、外部微分量子効率12%/両端面及び

SMSR48dB(@ $I = 7I_{th}$ )を得た。

- (15) 全光スイッチングデバイスは、電気デバイスの速度制限を打破し、高速に光信号を処理することができるものとして、その実現が期待されている。全光スイッチングデバイスの一つである回折格子による分布帰還(DFB)型全光スイッチングデバイスでは、その応答速度は材料の屈折率および吸収係数が変化する速度とデバイス構造がもつ動作帯域によって制限される。本年度は、ピコ秒オーダーの時間計測が可能なループ型干渉計による測定系を構築して、バンドギャップ波長1410nmのGaInAsPの光強度依存屈折率変化の大きさと応答速度を明確化するためにポンプ光によって誘起される屈折率変化ならびに吸収変化の測定を行った。その結果、波長1530nmのポンプ光に対して波長1550nmのプロブ光が受ける光強度依存屈折率変化の大きさは、 $-(2 \pm 0.6) \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{W}$ であることが明らかになった。
- (16) また、光強度依存屈折率変化の大きさは、1548～1553nmの範囲でプロブ光波長によらずほぼ一定であることが明らかになった。ポンプ光波長についても1530～1535nmの範囲で変化させても、光強度依存屈折率変化の大きさはほぼ一定である。
- (17) GaInAsPの光強度に依存した屈折率変化の応答速度については、FWHM 4psの時間幅をもつポンプ光パルスで測定した。その結果、FWHM 4psのポンプ光パルスに時間的に追従して屈折率が変化することがわかり、少なくともピコ秒以下の応答速度を有する物性効果を全光スイッチングデバイスに利用することができるとの結論を得た。
- (18) さらに、バンドギャップ波長1410nmのGaInAsPを導波層とするDFB導波路を形成し、分布帰還構造による応答速度制限について検討した。すなわち時間的に強度が一定のプロブ光波長を分布帰還導波路のストップバンドに一致させて入射した状態でポンプ光パルスを同時に入射させると、ポンプ光の強度によって発生する屈折率変化を反映してプロブ光の透過率が変化する。その時間応答を測定することによって、分布帰還構造による応答速度制限を測定することができる。結果として、立ち上がり/立下り時間がそれぞれ3.3ps/3.9psのポンプ光パルス(波長1530nm)によって、立ち上がり時間3.1ps、立下り時間6.1psの応答を得ることができた。分布帰還構造によって立下りの応答時間が増加するものの、ピコ秒オーダーのスイッチング速度が実現できる見通しを得た。

### 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 量子効果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、助教授）

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（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- T. Sano, H. Yagi, K. Muranushi, S. Tamura, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, “Multiple-Quantum-Wire Structures with Good Size Uniformity Fabricated by CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> Dry Etching and Organometallic Vapor-Phase-Epitaxial Regrowth,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 6A, pp. 3471-3472, June 2003.
- H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, “Room Temperature-Continuous Wave Operation of GaInAsP/InP Multiple-Quantum-Wire Lasers by Dry Etching and Regrowth Method,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 7A, pp. L748-L750, July 2003.
- K. Ohira, T. Murayama, H. Yagi, S. Tamura, and S. Arai, “Distributed Reflector Laser Integrated with Active and Passive Grating Sections Using Lateral Quantum Confinement Effect,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 8A, pp. L921-L923, Aug. 2003.
- H.-C. Kim, H. Kanjo, S. Tamura and S. Arai, “Narrow-Stripe Distributed Reflector Lasers with First-Order Vertical Grating and Distributed Bragg Reflectors,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 8, pp. 1032-1034, Aug. 2003.
- A. Haque, H. Yagi, T. Sano, T. Maruyama and S. Arai, “Electronic band structures of GaInAsP/InP vertically stacked multiple quantum wires with strain-compensating barriers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 3, pp. 2018-2023, Aug. 2003.
- H.-C. Kim, H. Kanjo, T. Hasegawa, S. Tamura and S. Arai, “1.5 $\mu$ m-Wavelength Narrow Stripe Distributed Reflector Lasers for High-Performance Operation,” *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 1146-

1152, Sept./Oct. 2003.

- K. Ohira, N. Nunoya, and S. Arai, "Stable Single-Mode Operation of Distributed Feedback Lasers With Wirelike Active Regions," *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 1166-1171, Sep./Oct. 2003.
- T. Okamoto, N. Nunoya, Y. Onodera, T. Yamazaki, S. Tamura and S. Arai, "Optically Pumped Membrane BH-DFB Lasers for Low-Threshold and Single-Mode Operation," *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 1361-1366, Sept. /Oct. 2003.
- H. Yokoi, T. Mizumoto, T. Sakai, T. Ohtsuka, and Y. Nakano: "Surface micromachining in optical isolator with semiconductor guiding layer for enhancement of magneto-optic effect," *Jpn. J. Applied Physics*, Vol. 42, No. 8, pp. 5094-5097, Aug. 2003.
- H. Yokoi, T. Mizumoto, and Y. Shoji: "Optical Nonreciprocal Devices with a Silicon Guiding Layer Fabricated by Wafer Bonding," *Applied Optics*, Vol. 42, No. 33, pp. 6605-6612, Nov. 2003.
- S.-H. Jeong, T. Mizumoto, M. Takenaka, Y. Nakano, "All-Optical Wavelength Conversion in a GaInAsP/InP Optical Gate loaded with Bragg Reflector," *Applied Optics*, Vol. 42, No. 33, pp. 6672-6677, Nov. 2003.
- Y. Shoji, H. Yokoi, and T. Mizumoto: "Enhancement of Magneto-Optic Effect in Optical Isolator with GaInAsP Guiding Layer by Selective Oxidation of AlInAs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 2, pp. 590-593, Feb. 2004 .

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数 : 0件 (CREST研究期間累積件数 : 0件)