

「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 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

本研究は、光ファイバ通信に適用可能な高品質の低次元量子構造の実現、およびこれを用いる新規の通信用高性能レーザおよび全光スイッチング素子を実現することを目的としている。

まず、低次元量子構造に起因する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 GaInAsP/InP 長波長半導体材料による量子細線レーザを作製している。この製造法として、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。今期は特に、量子細線 DFB レーザにおける特性温度改善のためのブラッグ波長デチューニングを行い、良好な結果を得ることに成功した。また、この直接描画法を用いた最大の特徴である任意形状の量子構造形成法に関する研究成果として、GaInAsP/InP 長波長材料量子細線構造の光学的特性の細線幅依存性を明らかにすると共に、L 字型等の新型量子構造を実現することに成功した。

これらの極微構造作製技術を応用して、細線状の活性層幅を変えることにより遷移エネルギーの異なる領域を平面上に集積した新型集積単一波長レーザの低電流動作、単一波長レーザと光吸収変調器あるいはモニタ用光検出器との集積を実現した。

低次元量子構造を用いることによる高性能・新規レーザと並行して、200-250nm 厚の薄膜半導体層を低屈折率材料で挟むことによる強力な光閉じ込めに起因する光学利得増大効果を利用する薄膜構造 DFB レーザについて、大幅なしきい値励起光入力低減を達成した。また、このレーザを直接貼り付け法によって SOI 基板上に形成し、85°C までの連続動作を達成し、将来の集積回路チップ内超高速光インターコネクションに有用な基本的動作可能性を実証した。

今後は、極微細加工プロセスの基本的問題である量子細線のサイズ不均一性と界面非発光再結合成分の低減をさらに進めると共に、単一波長レーザの低電流・高効率動作化、および薄膜構造 DFB レーザの電流注入動作化を行う予定である。また、任意形状量子構造形成法の研究を進めて、L 字型等の新型量子構造の偏波異方性を評価する予定である。

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

デバイスを検討している。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。これまで、DFB 導波路型全光スイッチにおいて、ナノ秒オーダーのパルス光を用いて光双安定動作や光論理素子としての動作を実証してきた。

また、本研究プロジェクトにおいて、このデバイスの動作速度限界を明確化するために、ピコ秒オーダーの時間分解能を有する屈折率変化測定系を構築し、GaInAsP バルク半導体導波路中および GaInAsP 量子構造導波路中で、ピコ秒ポンプ光パルスによって誘起される屈折率変化の大きさと応答速度を測定してきた。その結果、バルク半導体の光強度依存屈折率変化が 2 準位モデルによって予想される大きさとほぼ一致することと、ポンプ光強度がある値を超えない場合には屈折率変化がピコ秒オーダーのポンプ光パルスに追従する速い応答速度を示すことが明らかになっている。

今期は、GaInAsP/InP 量子井戸導波路で発生するポンプ光誘起屈折率変化の大きさを測定し、ポンプ光とプローブ光の偏波に対してどのような依存性をもつのか明らかにした。今後、屈折率変化について得られた知見を基に、新規な光機能デバイスの開発を進める予定である。

2. 研究実施内容

(1) 極微構造グループ

極微構造研究グループでは、有機金属気相成長法による多重量子井戸構造成長、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極微構造作製法に関して、GaInAsP/InP 長波長半導体材料による高品質低次元量子構造を実現することを最重要課題とした。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、以下に挙げる成果を得た。

(1-1) 低しきい値量子細線 DFB レーザ

量子細線 DFB レーザでは、活性層分離型 DFB 構造におけるブラッグ波長を室温における量子細線活性層の利得ピーク波長よりも長波長側へと設計し、高温域においてこれらを一致させることで、室温以上の温度範囲における特性温度の改善が期待される。活性層分離型 DFB レーザではストップバンドの短波長側の共振軸モードの利得が抑制され、ストップバンドの長波長側でのみ発振するため、ブラッグ波長のデチューニングに適しており、広い温度範囲にわたる完全単一モード動作が予

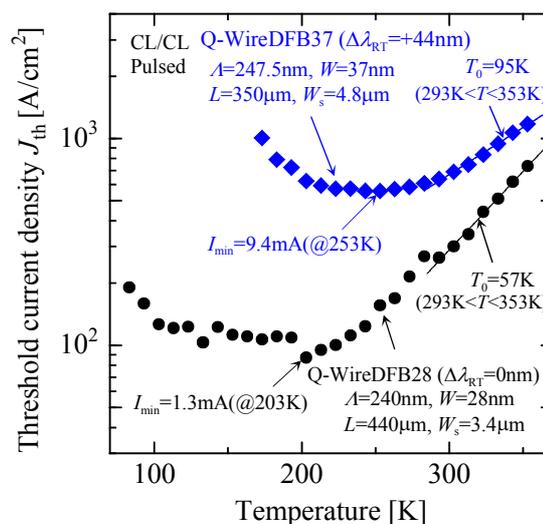


図 1. しきい値電流密度の温度依存性

測される。そこで電子線直接描画、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、歪補償量子細線活性層を有する活性層分離型 DFB レーザ(細線幅 30nm、周期 240nm)を作製した。同作製法を用いて、細線幅 37nm、周期 247.5nm の歪補償多層量子細線 DFB レーザを作製した。その結果、図 1 に示すように、最小しきい値電流密度をとる温度はデチューニングにより約 50K の上昇が観測された。293 K から 353 K の温度範囲においてしきい値電流密度の特性温度(T_0) 95K が得られ、デチューニングを行っていない素子の約 1.6 倍高い値となった。さらに図 2 に示すように、外部微分量子効率の特性温度(T_1) 243K が得られ、デチューニングを行っていない素子の約 3 倍となった。以上の結果より、ブラッグ波長のデチューニングに用いることによるしきい値電流密度および外部微分量子効率の特性温度の改善が確認された。

強屈折率結合と活性層体積の増加による温度特性の改善を期待して、上述のブラッグ波長デチューニングを細線幅の比較的大きい活性層分離型 DFB レーザに導入した。2 層量子井戸の活性層分離型 DFB レーザ (細線幅 82nm、周期 248.75nm) を作製し、室温においてブラッグ波長を EL ピーク波長の長波長側に 54nm のデチューニングを行った。室温において、大きなデチューニング量をとっているが、横高次モードや FP モードでの発振は観測されておらず、しきい値の 2 倍の注入電流において発振波長 1599nm、副モード抑圧比 51dB と良好な単一モード動作が得られた。10°C から 85°C の温度範囲において、モード跳びは観測されておらず、図 3 に示すように、50°C においてしきい値電流が最小値 5.4mA (しきい値電流密度 520A/cm²)をとる温度依存性が得られた。この温度範囲でのしきい値電流密度の温度変化は、±19%と大幅な温度安定化が得られた。さらに、外部微分量子効率に関しても、デチューニングを行った素子では 24%の低下しか見られず改善が確認された。以上の結果より、活性層分離型 DFB レーザにブラッグ波長デチューニングを用いることによる電流-光出力特性の温度安定化が確認された。

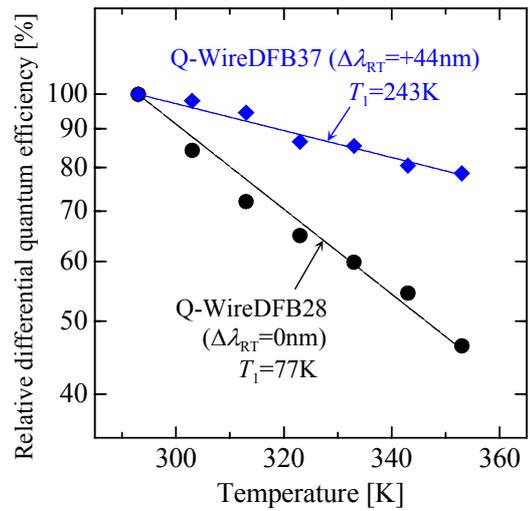


図 2. 外部微分量子効率の温度依存性

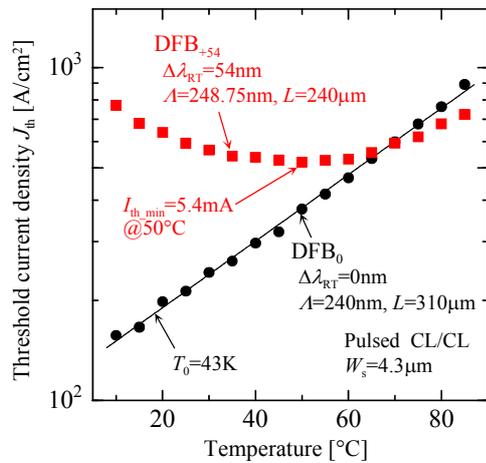


図 3. しきい値電流密度の温度依存性

(1-2) 任意形状量子構造作製

電子ビーム露光法を用いて任意形状量子構造を作製する際、ポジレジストはプログラムが複雑となり、露光に時間がかかることが問題であり、ネガレジストでは解像度が低いために微細形状作製が困難であることが問題である。そこで微細性と任意・容易性を兼ね揃えた作製法として、ポジレジスト EB 露光と金属リフトオフ法を併用した方法を用いた。また、任意形状を EB 露光により描画する際、InP 基板からの後方散乱の影響を受けるため、この影響を考慮し補正した EB 露光プログラムを開発した。作製プロセスは、まずポジレジ

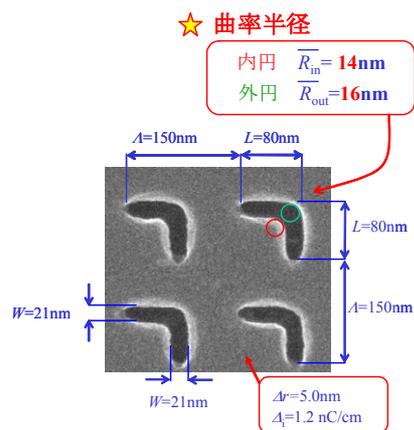


図 4. 現像後の表面 SEM 像

スト PMMA で幅 55nm の形状を後方散乱の影響を補正した EB 露光法にて描画し、10nm 厚の Ti を蒸着した後、リフトオフによってエッチングマスクを形成した。次にこのマスクを用いて GaInAsP/InP 単層歪量子井戸構造に CH₄/H₂-RIE にて形状を転写し、OMVPE 法にて埋め込み再成長した。そして、露光分布や基板からの後方散乱の影響を考慮し、近接効果を補正した L 字形状を作製した。図 4 に示すように、周期 150nm、一辺の長さ 80nm、幅 21nm、湾曲部の曲率半径 15nm と直角性、微細性に優れた構造の作製に成功した。

(1-3) 電界吸収型変調器(EAM)一括集積型分布反射型(DR)レーザ

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、90%以上の高反射率 DBR が実現できることが明らかになっている。上記 DR レーザに見られる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。そこで、ストライプ幅 2.1μm、活性領域長 180μm、受動領域長 260μm の DR レーザの出力端面に 280nm の誘電体膜(Al₂O₃)をスパッタリングにより堆積させ、無反射(AR)コーティングを施した。その結果、しきい値電流の低減(4mA から 1.4mA に低減)、期待されていた外部微分量子効率の増加(14%から 27%に増加)および単一モード動作の安定性向上を確認し、AR コーティングがレーザ特性の改善に非常に有効であることを明らかにした。

細線幅変調によるエネルギー準位のブルーシフトを利用した電界吸収変調器(EAM)を DR レーザの前端面に集積した。DR レーザ部分と EAM 部分は幅 500nm、深さ 3.8μm の極微溝で分離し、分離電気抵抗 60MΩ以上を実現している。細線幅 40nm、周期 100nm、長さ 300μm の EAM を集積した素子において室温 CW 駆動にて、しきい値電流 3.5mA、 $\eta_{\text{df}}=7.5\%$ を観測した。また、しきい値電流の 2 倍の注入電流において SMSR 44dB の良好な単一モード特性を得た。図 5 にレーザ

出力と EAM 領域の光吸収電流の関係を、図 6 に印加電圧に対する消光比を示すように、10V の電圧印加時の消光比は 4.5dB と、初期的特性を確認した。

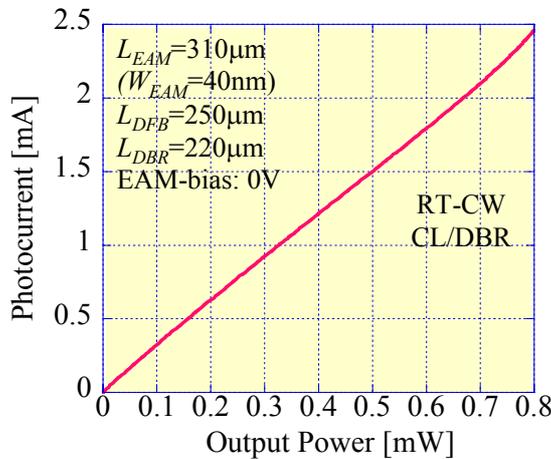


図 5. EAM の光出力-光電流特性

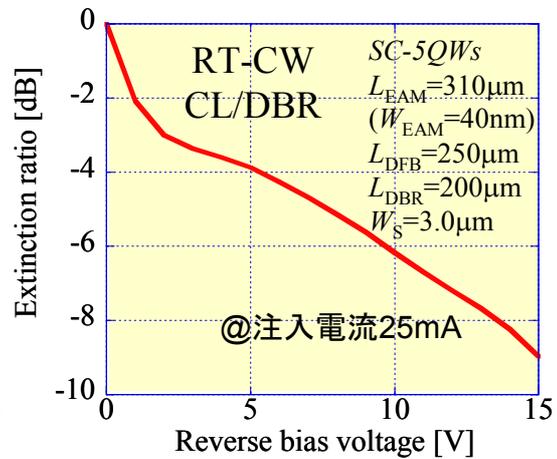


図 6. EAM-DR の消光比の逆バイアス依存

細線幅変調によるブルーシフトは高い透過率を持つパワーモニター(PM)の作製法として有効である。DR レーザの前短面に細線幅 40nm, 周期 100nm, PM 長 56 μ m の PM を集積した素子において、低しきい値電流 2.5mA (室温 CW 駆動)、外部量子効率 7%、しきい値電流の 2 倍において SMSR 36dB を観測した。PM に電圧を印加しない状態で、光出力に対してほぼ線形な光電流特性を確認した。

(1-4) 半導体薄膜分布帰還(DFB)レーザ

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 μ m 程度の半導体薄膜を低屈折率の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、通常素子と比較して 3 倍以上の光閉じ込め係数、1 桁大きい屈折率結合係数を得ることができる。今回、更なる強屈折率結合を得る目的で、半導体薄膜に膜厚差をつけた回折格子を用いた素子において、ストライプ幅 0.2 μ m~2.0 μ m を持つ、半導体薄膜 DFB レーザアレイを試作した。ストライプ幅 0.4 μ m、及び 0.6 μ m のものにおいて、単一軸モード発振が得られ、明瞭なストップバンド幅 68nm (屈折率結合係数 2950 cm^{-1})を確認した。これは従来の平坦に埋め込んだストライプ幅 2.0 μ m の半導体薄膜 BH-DFB レーザと比較して、3 倍程度の屈折率結合係数であり、凹凸形状回折格子による、高い屈折率結合を実験的に証明した。また、しきい値パワーを低減する目的で、ストライプ幅 2.0 μ m 及び共振器長を 80~120 μ m に設計した半導体薄膜レーザアレイ素子を平坦に埋め込んだものと膜厚差を付けたものの二種類を作製し、共振器長依存性に明確な差を確認した。又、40nm の膜厚差を付けた、共振器長 80 μ m の半導体薄膜レーザにおいて、しきい値パワー 0.34mW での室温連続発振を確認した(図 7)。副モード抑圧比(SMSR)はしきい値の 2 倍において 35dB を記録した。

Si/SiO₂ 導波路は高屈折率差 ($\Delta=40\%$ 以上)を有するため、超小型光集積回路実現に適しており、また Si は通信波長帯域において透明であるため、Si 基板上への III-V 族発光素子実現は重要である。SOI 基板上に圧縮歪 1%単層量子井戸 GaInAsP/InP 薄膜の直接貼り付けを行った。水素雰囲気中で 300~450°Cの温度範囲において圧着することにより、貼付前後で PL 強度およびスペクトルに変化のない低損傷界面が得られることを明らかにした。さらにこの方法を用いて SOI 基板上に GaInAsP/InP 半導体薄膜 DFB 構造を直接貼り付け、BH-DFB 半導体薄膜レーザを作製し光励起において室温連続発振を実現した。共振器長 120 μm 、ストライプ幅 2 μm の素子において、しきい値励起光強度 2.8mW、しきい値の 2 倍の励起強度において副モード抑圧比 28dB を得た。

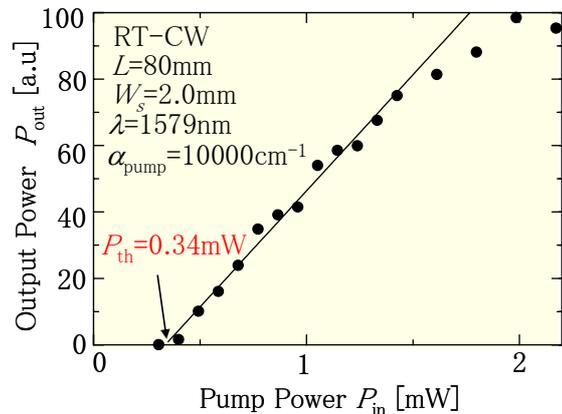


図 7. 凹凸形状回折格子を用いた半導体薄膜 BH-DFB レーザの入出力特性

(2)光スイッチグループ

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を利用して、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ている。今期は、GaInAsP 量子構造導波路中でポンプ光によって誘起される屈折率変化を偏波保存ファイバループ型干渉計で測定し、光強度依存屈折率変化の偏波依存性の明確化を中心に研究を進めた。以下に得られた成果を説明する。

(2-1) GaInAsP/InP 量子井戸における光強度依存屈折率変化の偏波依存性

GaInAsP 7 層量子井戸と OCL 層 ($\lambda_g=1200\text{nm}$)を導波路コア層とする光導波路サンプルにおいて、ポンプ光によって誘起される屈折率変化の大きさについて、ポンプ光とプローブ光の偏波依存性を測定した。well 層のバンドギャップ波長 1490nm に対応する量子井戸導波路(図 8)において、

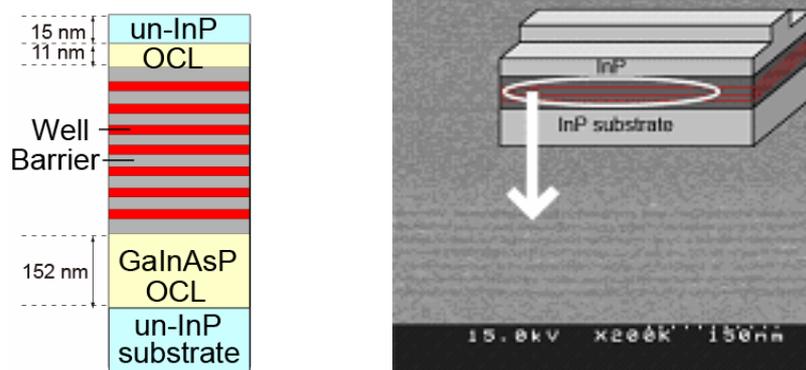


図 8. GaInAsP/InP 7 層量子井戸導波路構造。Well ($\lambda_g=1490\text{nm}$, 厚さ 7nm)、barrier ($\lambda_g=1200\text{nm}$, 厚さ 12nm)、OCL ($\lambda_g=1200\text{nm}$)

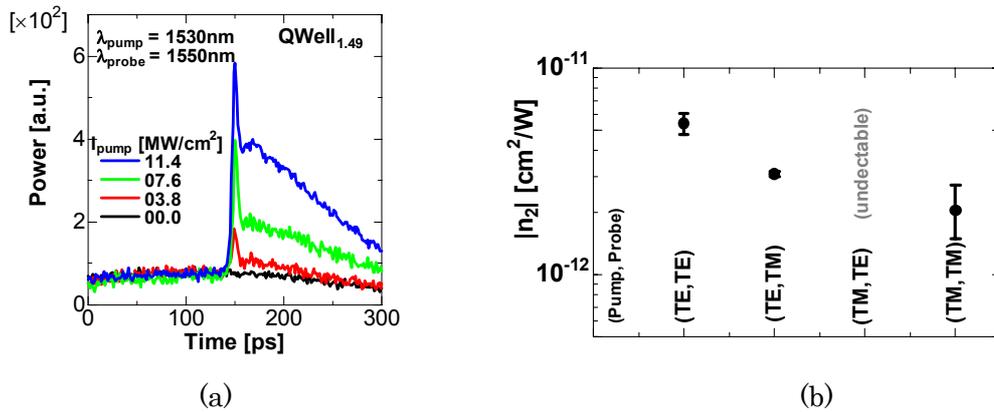


図 9. 量子井戸における(a)ポンプ光誘起屈折率変化によってファイバ干渉計のプロープ光透過率変化の様子と(b)光強度依存屈折率変化のポンプ光/プロープ光偏波依存性。

波長 1530nm のポンプ光と波長 1550nm のプロープ光に対して、それぞれの偏波が TE(量子井戸層と光波電界が平行)と TM(量子井戸層と光波電界が直交)の 4 通り組み合わせについて測定を行った。

ポンプ光とプロープ光をいずれも TE 偏波とした場合で最も大きな屈折率変化 $-5 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{W}$ が得られたのに対して、ポンプ光とプロープ光ともに TM 偏波で入射させた場合には $-2 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{W}$ と屈折率変化が 0.4 倍に減少し、光強度に依存した屈折率変化に偏波依存性があることが明らかになった。すなわち、光波電界が量子井戸層境界と平行な TE 偏波の方が、量子井戸層境界と垂直な TM 偏波に比べて、大きな強度依存屈折率変化が得られる。

一方、GaInAsP バルク導波路では、このような偏波依存性は観測されなかった。なお、図 9 に見られるように、ポンプ光強度がある一定レベルを超えると数 100ps 以上の立下り応答速度の遅い屈折率変化が発生することは、バルク半導体と同様である。

(2-2) GaInAsP/InP 量子井戸構造における屈折率変化(QCSE)

前記の量子井戸構造における光強度依存屈折率変化の偏波依存性において、量子閉じ込めシユタルク効果(QCSE)による TM 偏波に対する屈折率変化の増大は観測されなかった。原因は、量子構造のバンドギャップエネルギーに対してポンプ光およびプロープ光波長の長波長側への離調が大きいためと考えられる。QCSE による屈折率変化の増大を明確化するためには、量子井戸の組成に対するポンプ光およびプロープ光波長の依存性など、より詳細な検討が必要である。

3. 研究実施体制

(1)「極微構造研究」グループ

①研究者名

荒井 滋久(東京工業大学 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、機能的

低次元量子構造の創製とデバイス応用

(2)「全光スイッチ」グループ

①研究者名

水本哲弥(東京工業大学 教授)

②研究項目

全光スイッチングデバイスにおいて低次元量子構造を適用することで、スイッチングパワーの低減に代表される実用上重要な特性改善が期待できる。また、低次元量子構造デバイスの集積化を進めることで、機能性の高い光回路の実現も期待できる。機能性低次元量子構造による新機能光スイッチング素子の実現を目的として、極微構造グループと密接な関係をとりながら、これらの研究課題に取り組む。

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- J.-K. Seo and T. Mizumoto, “Nonlinear optical properties in GaInAsP/InP waveguides below the bandgap wavelength,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 4A, pp. 2612-2617, Apr. 2006.
- Y. Shoji and T. Mizumoto, “Wideband design of nonreciprocal phase shift optical isolators using phase adjustment in Mach-Zehnder interferometers,” *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 27, pp. 7144-7150, Sep. 2006.
- T. Maruyama, T. Okumura, S. Sakamoto, K. Miura, Y. Nishimoto and S. Arai: “GaInAsP/InP membrane BH-DFB lasers directly bonded on SOI substrate,” *Opt. Express*, vol. 14, no. 18, pp. 8184-8188, Sep. 2006.
- Y. Shoji and T. Mizumoto, “Ultra-wideband design of waveguide magneto-optical isolator operating in 1.31 μ m and 1.55 μ m band,” *Opt. Express*, vol. 15, pp.639-645, Jan. 2007.
- T. Maruyama, T. Okumura and S. Arai: “Direct wafer bonding of GaInAsP/InP membrane structure on silicon-on-insulator substrate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 11, pp. 8717-8718, Nov. 2006.
- Y. Nishimoto, K. Miura, H. Yagi, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama, S. Arai: “Low-Threshold Current Density GaInAsP/InP Quantum-Wire Distributed Feedback Lasers Fabricated by Low-Damage Processes,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 2, pp. L34-L36, Feb. 2007.
- K. Mathwig, W. Kaiser, A. Somers, J. P. Reithmaier, A. Forchel, K. Ohira, S. M. Ullah, and S. Arai, “DFB Lasers With Deeply Etched Vertical Grating Based on InAs-InP Quantum-Dash Structures,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 264-266, Mar. 2007.
- S. Sakamoto, H. Kawashima, H. Naitoh, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai, “Reduced Temperature Dependence of Lasing Wavelength in Membrane BH-DFB Lasers with Polymer Cladding Layers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 291-293, Mar. 2007.