

「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、極微構造の低損傷化による非発光再結合の低減および細線幅ゆらぎ低減による低しきい値動作と、極微量子細線構造の量子閉じ込め効果に起因する量子細線の利得異方性を明らかにした。これらの研究から、界面損傷による非発光成分は無いことが分かったため、今後は量子細線 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、そして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を形成し、光学的特性の観測を行う予定である。

さらに、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きた。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。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てきた。今期は、特に、 GaInAsP バルク半導体導波路と GaInAsP/InP 量子構造導波路でピコ秒ポンプ光パルスによって発生する屈折率変化の大きさと応答速度を測定し、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を明らかにした。さらに、ピコ秒ポンプパルスによって発生する屈折率変化を利用して、DFB 導波路のプローブ光透過率を制御する全光スイ

ッチの時間応答を明らかにした。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拓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

EB 露光、 CH_4/H_2 -RIE、OMVPE による埋め込み再成長法を用いて、量子細線 DFB 構造（細線幅 30nm、周期 240nm）を作製した。メサストライプ界面における非発光再結合を低減するために、ウェットエッチングによりメサストライプ（ストライプ幅 $3.4\mu\text{m}$ ）を作製した。その結果、量子細線 DFB レーザの自然放出光効率が、ウェットエッチングによる幅広ストライプを有する量子薄膜レーザと比較して同等であることを示した。このことから、ドライエッチング及び埋め込み再成長法により形成された極微量量子構造の再成長界面の損傷が非常に小さいことが明らかとなり、再成長界面における非発光再結合電流がほぼ抑制されていることを示した。図 1-1 に示すように、室温連続動作条件の下、共振器長 $350\mu\text{m}$ の素子において、低電流動作（しきい値電流 2.1mA 、しきい値電流密度 $176\text{A}/\text{cm}^2$ ）を達成するとともに、良好な単一モード動作（発振波長 1542nm 、副モード抑圧比 (SMSR) 50dB ）を達成した。

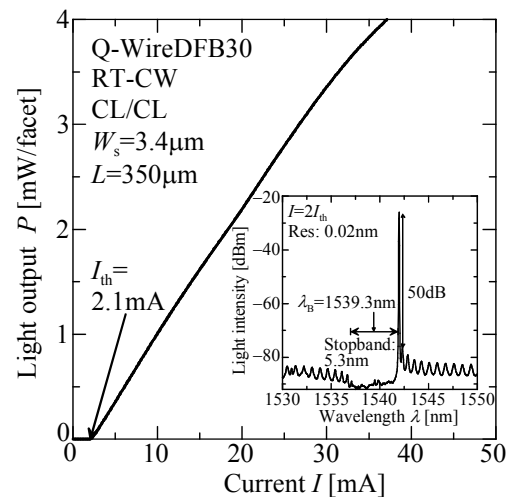


図 1-1. 量子細線 DFB レーザの室温連続動作における電流-光出力特性、及び発振スペクトル

(1-2) 単層量子細線 DFB レーザによる量子細線ゆらぎの低減

本作製法で試作した多層量子細線構造の細線幅ゆらぎを低減することを目的として、単層量子細線構造を試作し、その比較評価を行った。図 1-2 に示すように、5 層量子細線構造では 18% のゆらぎが観測されたのに対し、単層量子細線構造では 8.7% であった。5 層量子細線構造においても、各層毎にゆらぎを評価すると、全ての層で 10% 以内であり、大きなゆらぎは多層量子細線構造の垂直性によることが明らかとなった。

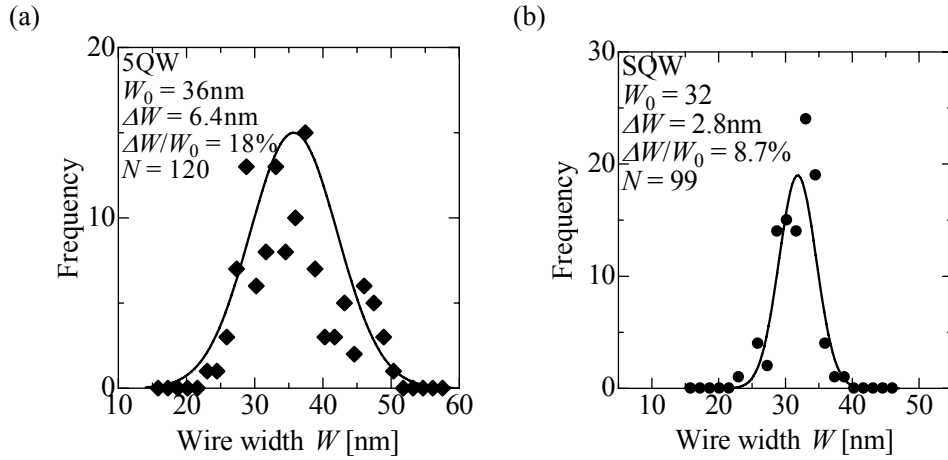


図 1-2. 量子細線 DFB レーザの細線ゆらぎ (a) 5 層量子細線、(b) 単層量子細線

(1-3) 量子細線の利得異方性

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理論的に明らかになっており、この効果が利得やレーザ特性に影響を与えることを確認するために、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、図 1-3 に示すように、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。

この要因としては量子細線における光利得の偏波異方性が考えられたため、Hakki-Paoli 法を用いて利得スペクトルの測定(温度 103K)を行った。図 1-4 には、利得ピーク波長における媒質利得の注入電流依存性を示す。しきい値利得においては、両者

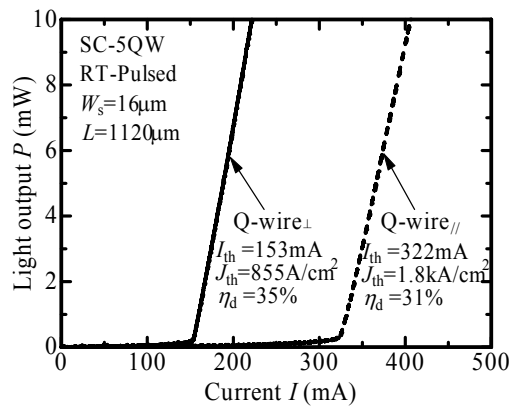


図 1-3 Q-Wire_∥と Q-Wire_⊥レーザの電流-光出力特性

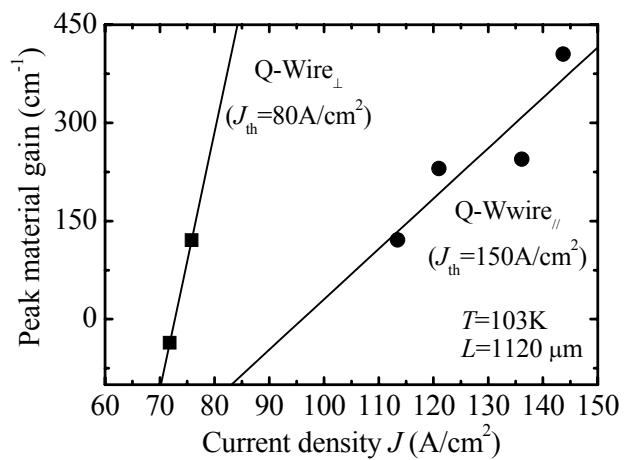


図14 Q-Wire_∥とQ-Wire_⊥の最大材料利得の注入電流密度依存性

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。

(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、ポンプ光強度によって GaInAsP バルク半導体および GaInAsP/InP からなる量子構造導波路中に発生する屈折率変化を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大きさと応答速度の明確化を進めた。さらに、分布帰還(DFB)導波路形の全光スイッチにおいて、ピコ秒オーダーのポンプ光パルスを用いて信号光(プローブ光)の透過状態が制御できることを明らかにした。

以下に得られた成果を説明する。

(2-1) GaInAsPバルク半導体における光強度依存屈折率変化

ループ型干渉系でGaInAsPバルク半導体導波路における光強度依存屈折率変化を測定し、吸収変化による影響を考慮して測定データを整理した。その結果、図2-1に示すように、バンドギャップ波長 $\lambda_g=1410\text{ nm}$ 、 1300 nm 、 1200 nm のバルクGaInAsPにおいて、波長 1550 nm 帯のプローブ光(ポンプ光波長は 1530 nm)に対してそれぞれ $-4 \times 10^{-12}\text{ cm}^2/\text{W}$ 、 $-1 \times 10^{-12}\text{ cm}^2/\text{W}$ 、 $-0.6 \times 10^{-12}\text{ cm}^2/\text{W}$ の光強度依存屈折率変化が得られ、屈折率変化のGaInAsP組成依存性など理論予測と定性的に一致することを明らかにした。

一方、屈折率変化の時間応答については、バンドギャップ波長 1410 nm 、 1300 nm 、 1200 nm のバルクGaInAsPでポンプ光強度がそれぞれ $20\text{ MW}/\text{cm}^2$ 、 $40\text{ MW}/\text{cm}^2$ 、 $50\text{ MW}/\text{cm}^2$ 以下の場合に、半値全幅 4 ps のポンプ光パルスに追従して変化する高速な応答である(図2-2)。しかし、それ以上のポンプ光強度においては、キャリアの励起を伴う過程が顕在化し、数 100 ps オーダーの回復時間を有する屈折率変化が観測された。高速に応答するデバイス応用を考えた場合、小さなスイッチングパワーで動作するようにデバイス構造の工夫が必要である。なお、これまでに報告してきた分布帰還(DFB)導波路形スイッチングデバイスでは、スイッチングに必要なピーク光パワーは 10 mW 程度であり、導波路中の強度が $1\text{ MW}/\text{cm}^2$ と見積られ、この上限を超えていない。したがって、ピコ秒パルスに追従する高速な応答が十分に期待できる。

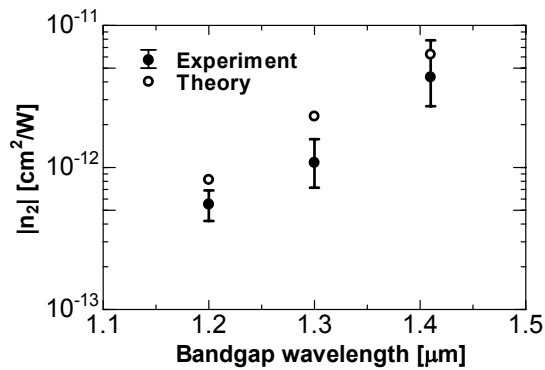


図 2-1 GaInAsP バルク半導体における光強度依存屈折率変化の大きさ

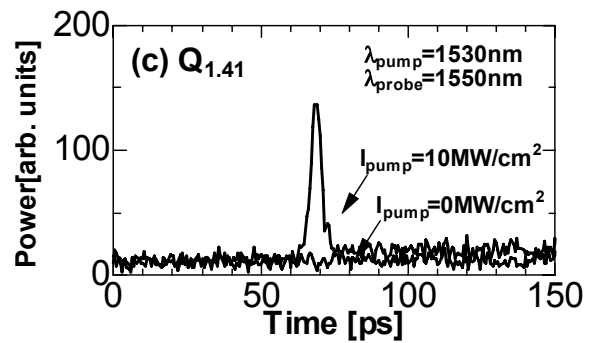
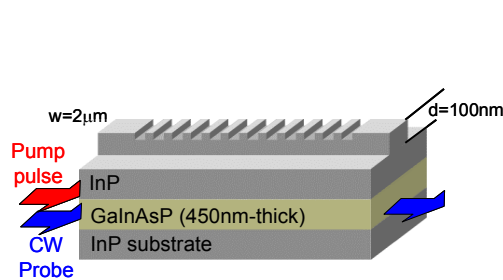


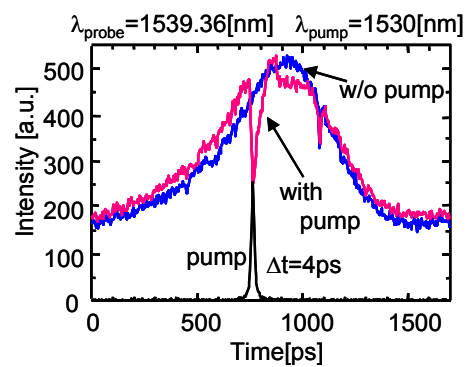
図 2-2 ピコ秒ポンプパルスに対する屈折率変化の時間応答

(2-2) GaInAsP/InP量子井戸における光強度依存屈折率変化

7層GaInAsP/InP量子井戸をコア層とする導波路において、波長1530 nmのポンプ光によって誘



(a)



(b)

図 2-3 ピコ秒ポンプパルスによる DFB 導波路の透過率制御

起される光強度依存屈折率変化の大きさを測定した。その結果、図2-3に示すように、量子構造の基底遷移エネルギーが波長1410 nmと1370 nmに対応する量子井戸導波路において、波長1550 nm帯のプロブ光に対して $-6 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{W}$ および $-4 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{W}$ の光強度依存屈折率変化が得られた。基底遷移エネルギーと等価なバンド端を有するバルク半導体と比較すると、いずれも若干大きな屈折率変化である。また、 10 MW/cm^2 以下のポンプ光強度でピコ秒オーダーのポンプ光に追従する高速な応答を示すが、高ポンプ光強度においてはキャリアの生成を伴う遅い過程が発生し、この点においてはGaInAsPバルク半導体と同様の振る舞いを示すことが明らかになった。

(2-3) GaInAsP/InP 量子細線構造における光強度依存屈折率変化

7層量子井戸構造を細線幅 30 nm、周期 100 nm で量子細線加工して光導波路を形成したサンプルにおいて、波長 1530 nm のポンプ光誘起屈折率変化を測定した結果、バルクおよび量子井戸構造に比べて小さな屈折率変化しか得られなかった。量子細線の密度が低いことが原因と考えられる。

(2-4) GaInAsP/InP 分布帰還導波路におけるピコ秒ポンプパルス応答

GaInAsP($\lambda_g=1410\text{nm}$)をコア層とする分布帰還導波路(図 2-3(a))を形成し、プローブ光波長を分布帰還導波路のストップバンド短波長端に配置してピコ秒のポンプ光でプローブ光の透過率変化を観測した。結果として、(2-1)で述べた GaInAsP バルク半導体の屈折率変化の応答速度を反映し、ピコ秒パルスで DFB 導波路の透過率が制御できることを明らかにした(図 2-3(b))。

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（原著論文）発表

- S. Arai, H. Yagi, K. Ohira, T. Maruyama and S. Tamura, “GaInAsP/InP quantum-wire lasers and distributed reflector lasers with wirelike active regions by lithography and regrowth,” *Proceedings of SPIE*, vol. 5738, Novel In-Plane Semiconductor Lasers IV, pp. 303-317, Apr. 2005.
- K. Ohira, T. Murayama, S. M. Ullah, H. Yagi, and S. Arai, “GaInAsP/InP distributed reflector laser with phase-shifted DFB and quantum-wire DBR sections,” *IEICE Electronics Express*, vol. 2, no. 11, pp. 356-361, Jun. 2005.
- K. Ohira, T. Murayama, S. Tamura and S. Arai, “Low-threshold and high-efficiency operation of distributed reflector lasers with width-modulated wirelike active regions,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 11, no. 5, pp. 1162-1168, Sep./Oct, 2005.
- S. Sakamoto, T. Okamoto, T. Yamazaki, S. Tamura and S. Arai, “Multiple-wavelengths membrane BH-DFB laser arrays,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 11, no. 5, pp. 1174-1179, Sep./Oct, 2005.
- H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama and S. Arai, “Low-threshold-current operation of 1540 nm GaInAsP/InP distributed-feedback lasers with multiple-quantum-wire active regions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, no. 22, p. 223120, Nov. 2005.