

戦略的創造研究推進事業  
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ  
研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・  
システムの創製」

研究課題「低次元量子構造を用いる  
機能光デバイスの創製」

## 研究終了報告書

研究期間：平成14年11月～平成19年10月

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)

## 1 研究実施の概要

本研究提案は、光ファイバ通信用長波長光源に用いられている GaInAsP/InP 長波長半導体材料の低損傷かつ高精度な極微構造形成技術を開拓することにより、低しきい値電流で高効率動作可能な高性能半導体レーザを実現すること、および新機能光スイッチの可能性を開拓することを目的として行ったものである。提案時には、活性層幅 23nm、周期 80nm の量子細線を 5 層積層した多層量子細線構造レーザが実現され、活性層幅 43nm までの多層細線活性層を有するレーザのしきい値電流が活性層を細線化しない量子薄膜レーザよりも低いという、いわゆる体積効果が確認された段階であった。

そこで、量子サイズ効果の顕れる極微構造を、界面非発光再結合電流成分の影響を無視できるほど低減し、なおかつサイズ不均一性を低減して光利得スペクトル幅を低減することができれば、従来の通信用半導体レーザを凌駕する低しきい値電流かつ高効率の動作、すなわち低消費電力動作が実現できると考えた。また、低次元量子構造による優れた活性(光増幅)媒質の実現を目指す研究と並行して、新しい共振器構造による低消費電力動作可能なレーザの実現を目指した研究を推進しようと計画した。具体的には、波長多重方式による広帯域光通信システムに応用可能な単一波長動作レーザ光源として、従来の分布帰還(Distributed Feedback: DFB)レーザとは異なり、活性層を 100nm 以下の幅の細線状に加工し、ブラッグ回折格子における前進波と後進波の結合係数を非常に大きくした新型 DFB レーザ、およびその活性層幅を狭め、量子閉じ込め効果による遷移エネルギーを高めることによる異種機能光デバイスの集積の研究を行った。

また、これらの研究とは全く異なる新しい切り口として、高屈折率差導波路構造を利用した半導体薄膜 DFB レーザの研究を計画した。従来の二重ヘテロ接合構造(Double Heterostructure: DH)レーザでは活性層とクラッド層の屈折率差が 5%程度と低いために、活性媒質である量子薄膜とレーザ光電界分布との相互作用の割合(光閉じ込め係数)が 1%程度しか得られないのに対し、活性層を含む半導体層の厚さを 150nm 程度に薄膜化し、実効的な光閉じ込めをポリマーあるいは SiO<sub>2</sub> 等の低屈折率誘電体とすることにより、屈折率差を従来の DH 構造の 7-8 倍に高めることができ、活性層に対する光閉じ込め係数を 3 倍程度に高められるため、理想的な低次元量子構造を用いることと同程度の低消費電力動作が期待される。

上述した極微構造形成技術の研究を進めるだけでなく、その光非線形性を利用した超高速光スイッチの材料としての可能性の探索的研究も共同研究者グループと共に並行して行えると考え、本研究提案では、(1)極微構造グループと(2)光スイッチグループの2つのグループで研究を行った。以下に、それぞれの研究グループの研究全体の概要を述べる。

### (1) 極微構造グループ

GaInAsP/InP 長波長半導体材料による高品質低次元量子構造の実現については、極微構造界面における非発光再結合電流成分の低減とサイズ不均一性の低減による発光スペクトル幅低減が必須であると考えられる。

前者については、歪補償量子井戸構造を元基板として、エッチング後に再成長する結晶である InP との格子不整合が蓄積しない構造を用い、ドライエッチングと再成長時の低損傷形成プロセスを探索した結果、幅 20-30nm の量子細線において、1 回成長の多層量子井戸構造と同等に近い内部量子効率を得る水準にまで到達した。この作製プロセスを適用して活性層を回折格子周期で配置した量子細線 DFB レーザおよび新型単一波長レーザである DR レーザを試作し、200A/cm<sup>2</sup> 以下の低しきい値電流密度動作を実現した。また、本研究開始当初に試作した幅 23nm の 5 層歪補償量子細線レーザの室温連続動作寿命試験を行った結果、38,500 時間経過後の現在も劣化無く動作しており、GaInAsP/InP 長波長材料による高品質低次元量子構造の実現に関してはほぼ達成できたものと考えられる。

後者については、量子井戸構造の発光スペクトル幅より狭い試料がまだ得られていないのが現状である。発光スペクトル形状は高エネルギー側で量子井戸構造のそれより急峻であり、横(細線幅)方向量子閉じ込め効果は顕れているものの、その分散が平均±3nm 程度残存していると考えられる。

極微構造中への量子閉じ込め効果の評価については、歪応力を考慮したバンド構造解析を行

うと共に、ストライプを量子細線と同方向および垂直な方向に形成した 2 種類の量子細線レーザを試作し、その PL 発光の偏波異方性、および各々の光利得の注入電流依存性を測定・評価した。その結果、発光ピーク波長の細線幅依存性については、歪応力を考慮しない場合より 14meV 程度大きなエネルギーシフトが解析から得られ、実験結果を説明する結果が得られた。PL 発光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から期待されるより大きな異方性が観測された。これは歪応力が分布することにより、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。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、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(ブラッグ波長デチューニング)ことにより、しきい値電流の特性温度改善および広い温度範囲で比較的動作電流の揃った良好な特性を得ることに成功した。さらに、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(DRレーザ)の 1mA 以下での低電流動作、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半導体薄膜構造 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。

## (2) 光スイッチグループ

全光スイッチングデバイスを形成するために必要なポンプ光誘起屈折率変化の大きさと応答速度を測定によって明確化することと、デバイスのスイッチングパワー低減を目指して、低次元量子構造を適用することで屈折率変化の増大の可能性を探ることを目標に、研究に着手した。また、低次元量子構造を導入することによって、ポンプ光誘起屈折率変化に偏波依存性が生じ、これを用いて新しい全光スイッチングデバイスへの展開をはかることも期待できる。

研究の初期段階において、ポンプ光誘起屈折率変化をサブピコ秒の時間分解能で測定するために、ループ型干渉計を用いた測定系を構築した。プローブ光波長に対して透明領域にある GaInAsP バルク結晶、GaInAsP 量子井戸構造、GaInAsP 量子細線構造をもつ受動光導波路を製作し、各々のポンプ光誘起屈折率を測定した。

GaInAsP バルク結晶については、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測定で実証することができた。また、量子構造による屈折率変化の増大については、GaInAsP 量子井戸においてはバルク結晶に比して大きな屈折率変化が得られることがわかった。GaInAsP 量子細線については、製作した導波路で量子細線密度が低いことに起因して、明確な屈折率変化の増大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 バルク結晶、GaInAsP 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、ピコ秒時間幅のパルス状ポンプ光の時間変化に追従する応答を示し、所期の目的とする超高速全光スイッチの構成材料として適していることを明らかにすることができた。一方、ポンプ光強度を強めると、キャリア生成をともなう回復時間の遅い(数 100 ピコ秒)屈折率変化が健在化することが分かった。超高速スイッチングデバイスとして用いる場合には、低ポンプ光強度で動作するようにデバイス設計に留意する必要がある。

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て形成される全光スイッチングデバイス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を測定した。DFB 導波路を形成する周期構造が帯域制限を持つため、プローブ光のスイッチング時間応答の速度制限要因となりえる。しかし、測定結果より、プローブ光応答は 2 ピコ秒程度の立下り時間広がりであるため、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。

## 2 研究構想及び実施体制

### (1) 研究構想

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。そして、研究開始時に、

(ア) GaInAsP/InP 長波長半導体材料による高品質低次元量子構造の実現

(イ) 上記方法による高性能(低消費電力)レーザの実現

(ウ) 人工異方性形状の低次元量子構造の実現と新しい機能光デバイスの実現

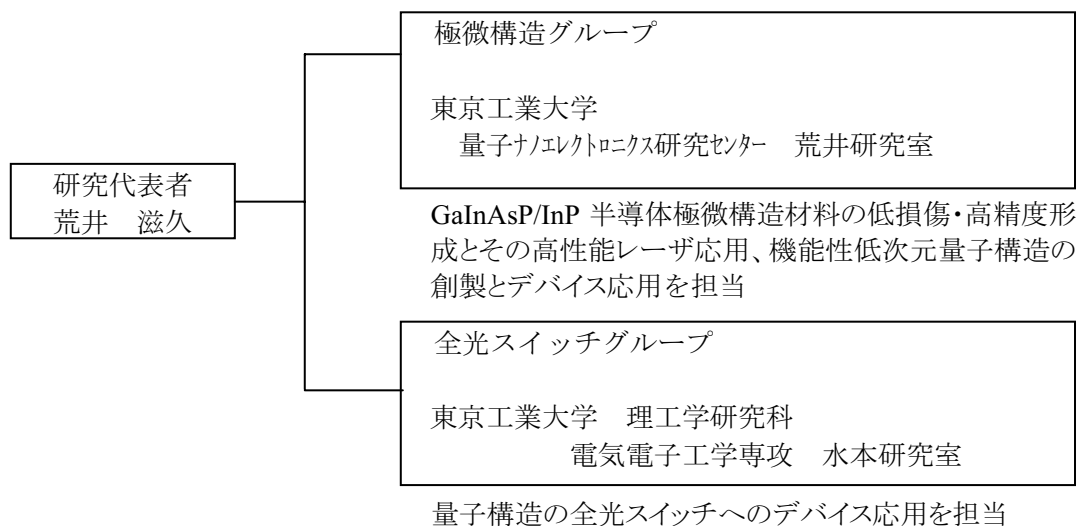
を目標として設定した。

そのために、極微構造界面における非発光再結合電流成分の低減と低電流動作レーザの実現、および極微構造中への量子閉じ込め効果の評価、そしてこの極微構造を集積した高性能化を具体的に行うことにした。さらに任意形状量子構造の作製方法も平行して開発することに取り組むこととした。

全光スイッチグループは、GaInAsP バルク結晶ならびに GaInAsP 量子井戸、GaInAsP 量子細線におけるポンプ光誘起屈折率変化の大きさと時間応答を測定によって明確化し、光強度に依存した屈折率変化を用いた全光スイッチング素子の開拓を進めることを研究の第一目標とした。さらに、量子構造において、ポンプ光誘起屈折率変化の感度増大、量子構造特有の光学特性の発現可能性を明らかにすることも研究の目標とした。

全光スイッチグループは、量子構造光導波路の製作において、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こととした。

### (2) 実施体制



### 3 研究実施内容及び成果

#### 3.1 極微構造グループ(東京工業大学 荒井グループ)

##### (1) 研究実施内容及び成果

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、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) GaInAsP/InP 長波長半導体材料による高品質低次元量子構造の実現

半導体レーザ応用では、重い正孔帯と軽い正孔帯の縮退を解き、どちらかの正孔帯のみを利用することにより低電流動作を実現するために歪量子井戸構造が用いられるのが一般的となっている。本研究グループでは、歪量子井戸構造の代わりに歪補償量子井戸構造を用い、極微加工して周囲を基板材料と同じ格子定数の InP 結晶で埋めることにより、結晶欠陥が少なく、界面非発光再結合電流の低い高品質低次元量子構造の実現を目指した。

図 3.1.1 に断面 SEM 写真を示す 5 層歪補償量子細線構造(細線幅 23nm、周期 80nm)を活性層とする量子細線レーザを電子線直接描画、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試作した結果、図 3.1.2 に示すように、このようなトップダウン的手法で作製された量子細線レーザで初めて室温連続動作を達成することに成功した(2002 年 12 月 12 日)。1つの元ウェーハから、量子薄膜レーザおよび幅の異なる(23nm, 43nm, 70nm)細線状活性層を有するレーザを作製し、しきい値電流密度および外部微分量子効率を比較した結果しきい値電流密度は極微加工を施さない歪補償量子井戸構造レーザの約 1.6 倍となったが、微分量子効率および内部量子効率には大きな差異が認められなかった。これは、極微加工プロセスによる光吸収係数増加や界面非発光再結合電流が極めて低いことを示している。しきい値電流密度が増加した要因は、活性層体積が小さすぎるため、高い利得が必要となり、高次準位で発振したためと考えられる。

その後、5 層歪補償量子細線レーザの室温連続動作寿命試験を大気中で行った結果、測定室の停電による通電試験の停止期間を除いて、38,500 時間経過後も劣化を示す大き

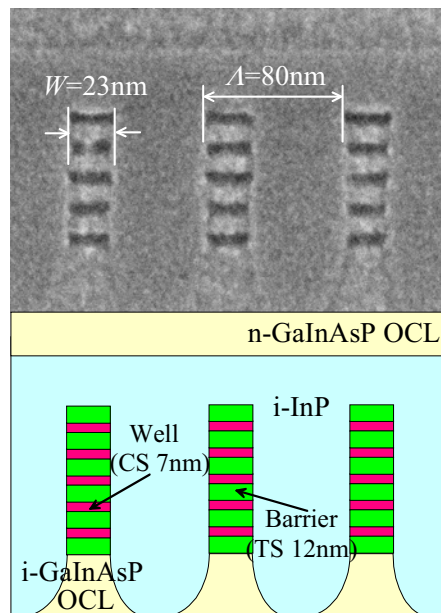


図 3.1.1. Q-Wire23 の断面 SEM 写真

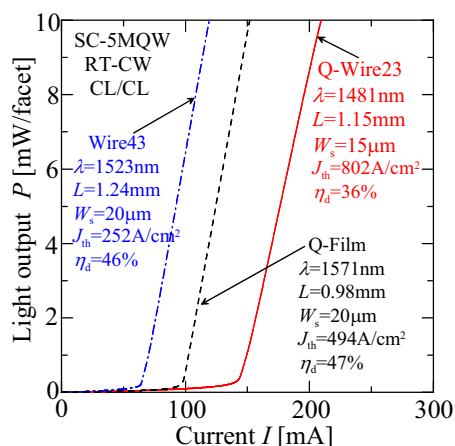


図 3.1.2. Q-Wire23、Wire43、及び Q-Film の室温連続動作特性

なしい値電流増加や微分量子効率低下は認められず、少なくとも、極微加工界面においては良質のエッチング・再成長界面が形成されていると判断できる結果が得られた。

(1-2) 低しい値量子細線 DFB レーザ

歪補償量子細線レーザのしきい値光利得を低減し、基底準位発振による低電流密度動作を実現することを目的として、図 3.1.3 に示すように、量子細線幅 24nm の多層量子細線活性層を回折格子周期 240nm で配置した分布帰還(DFB)レーザを試作した。しきい値電流は 2.7mA (しきい値電流密度 270A/cm<sup>2</sup>) であり、1.5μm 波長帯の低次元量子構造を用いたレーザとして従来にない低しい値電流動作が得られた。

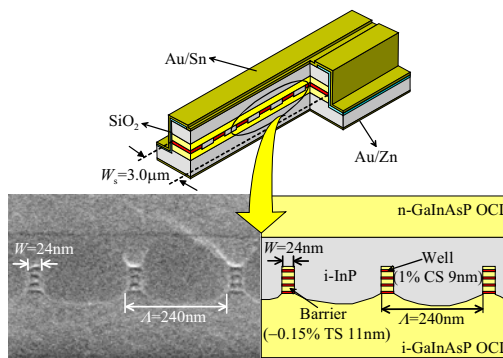


図 3.1.3 Q-WireDFB24 の断面 SEM 写真

歪補償量子細線 DFB レーザの作製プロセスをさらに検討した結果、歪補償量子細線構造界面における非発光再結合電流は無視できる程低く、1 回成長の歪補償量子井戸構造レーザと同等の自然放出光効率が得られることが明らかとなった。

図 3.1.4 には、ストライプ幅 3.4μm、共振器長 350μm、量子細線幅 30nm の歪補償量子細線 DFB レーザの入出力特性および室温連続動作における発振スペクトル(注入電流: 2I<sub>th</sub>)を示す。しきい値電流密度は 176A/cm<sup>2</sup>(しきい値電流 2.1mA)まで低減された。また、しきい値の 2 倍の動作電流における副モード抑圧比 (Sub-Mode Suppression-Ratio: SMSR) は 51dB となり、良好な単一モード特性が観測された。活性層を細線状に配置した構造であるため、活性層の体積が量子薄膜構造の約 1/8 に低減しているにもかかわらず、観測されたストップバンド幅 (5.3nm) は理論的に推定された屈折率結合係数 (210cm<sup>-1</sup>) と良い一致を示す値となった。

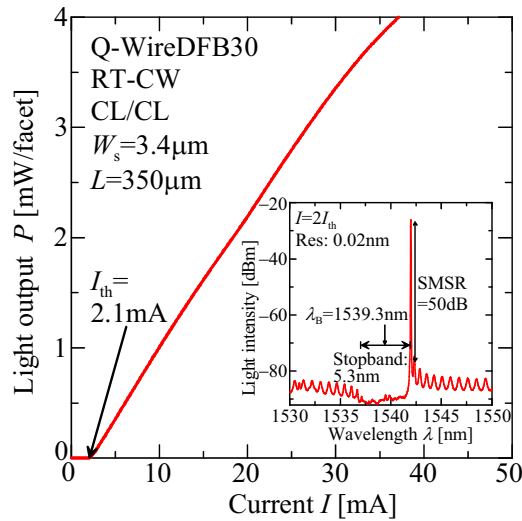


図 3.1.4. 量子細線 DFB レーザの室温連続動作特性

(1-3) 量子細線幅分布の評価

本作製法で試作した多層量子細線構造の細線幅分布を低減することを目的として、その要因を調べるために、多層量子細線構造および単層量子細線構造を試作し、その比較評価を行った。図 3.1.5 に示すように、5 層量子細線構造では 18% (標準偏差 6.4nm) の分布広がり観測されたのに対し、単層量子細線構造では 8.7% (標準偏差 2.8nm) であった。より狭い量子細線に対して量子効果の長所を引き出すために、さらに分布広がりを半分程度までに抑える必要がある。5 層量子細線構造においても、各層毎に細線幅分布広がり評価すると、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ものであることが明らかとなった。

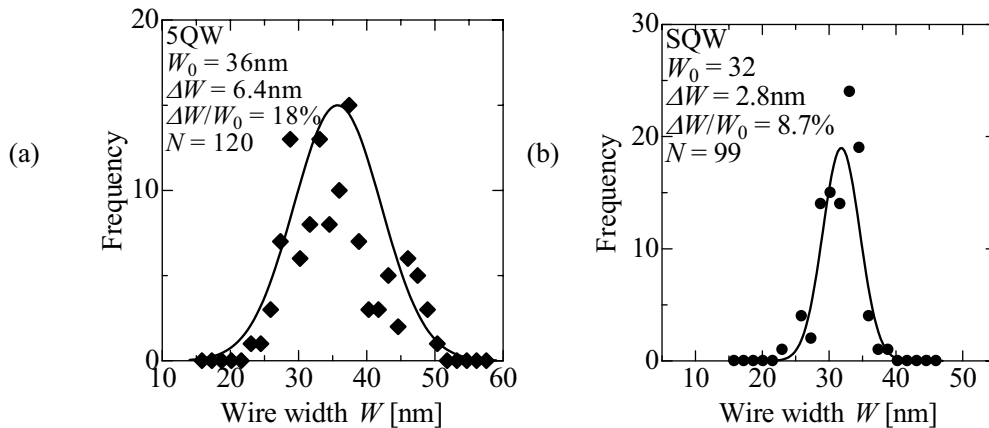


図 3.1.5. 量子細線 DFB レーザの細線ゆらぎ (a) 5 層量子細線、(b) 単層量子細線

(1-4) ブラッグ波長デチューニングによる量子細線 DFB レーザの温度特性改善

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。通常の DFB レーザとは異なり、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



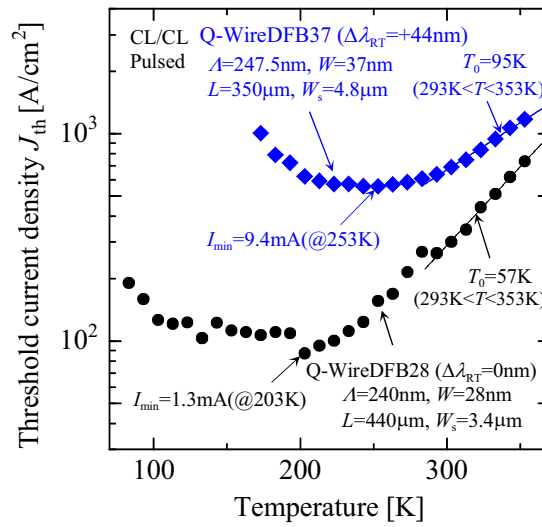


図 3.1.6. しきい値電流密度の温度依存性

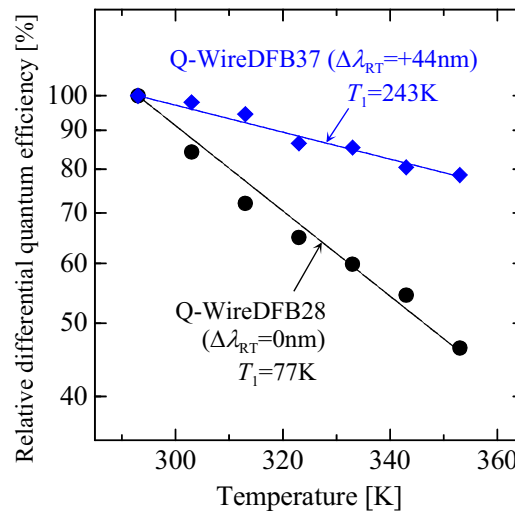


図 3.1.7. 外部微分量子効率の温度依存性

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 3.1.6 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。293K (20°C) から 353K (80°C) の温度範囲におけるしきい値電流密度の特性温度 ( $T_0$ ;  $I_{th}(T) = I_{th0} \exp(T/T_0)$ ) は 95K となり、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。しきい値の温度安定性が増ただけでなく、外部微分量子効率の温度特性も安定化した。図 3.1.7 に示すように、外部微分量子効率の特性温度 ( $T_1$ ;  $I_{th}(T) = I_{th0} \exp(-T/T_1)$ ) は 243K となり、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。



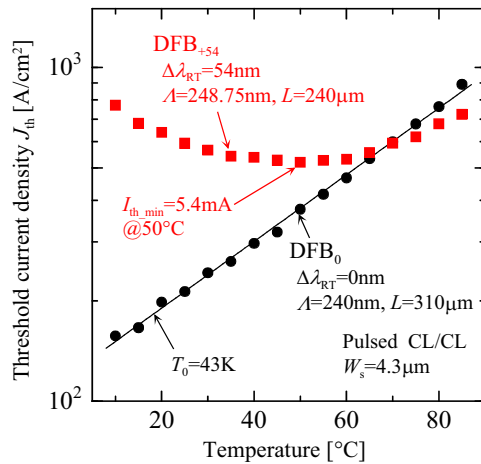


図 3.1.8. しきい値電流密度の温度依存性

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 3.1.8 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/cm<sup>2</sup>) 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、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。

### (1-5) 一括形成型分布反射型(DR)レーザ

量子閉じ込め効果に起因するエネルギーシフトを利用し、図 3.1.9 に示すように幅の広い細線状活性層を活性領域、幅が狭い細線状活性層を受動領域とする新しい単一波長レーザおよび光機能デバイスの集積法を提案した。

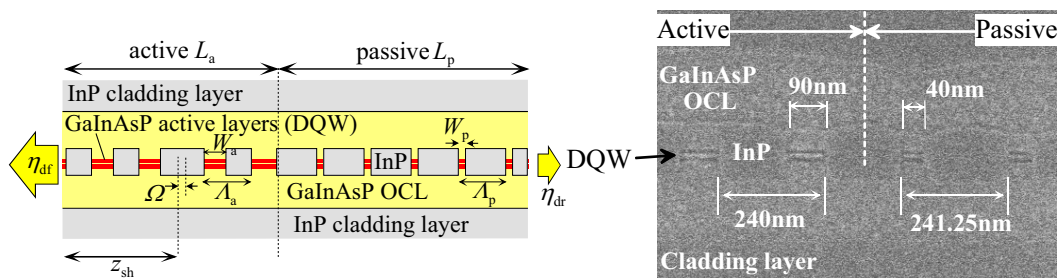


図 3.1.9. 分布反射型 (DR) レーザの構造模式図と断面 SEM 写真

DFB レーザ (細線幅 70-90nm) に細線幅 (30-40nm) の分布反射器 (DBR) 領域を集積した分布反射型 (DR) レーザを作製した結果、図 3.1.10 に示すように、室温連続動作条件下で片端面からの高い微分量子効率 36% (しきい値電流 2.5mA)、ならびに低しきい値電流 0.8mA (しきい値電流密度 180A/cm<sup>2</sup>) の良好な動作を実現した。しきい値電流は理論値に比べ、まだ 2 倍程度高い値ではあるが、これは極微構造界面ではなく、メサストライプ側面

における非発光再結合電流成分によるものと考えられ、良好な埋め込みヘテロ構造が実現できれば達成できると考えられる。

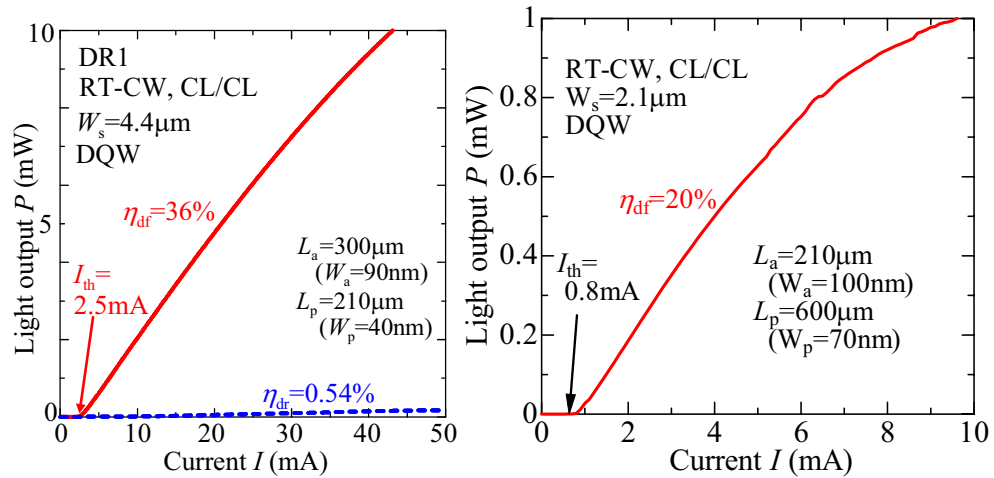


図 3.1.10. DR レーザの室温連続動作特性(左図:高効率動作、右図:低しきい値電流動作)

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 2.1 $\mu\text{m}$ 、活性領域長 180 $\mu\text{m}$ 、受動領域長 260 $\mu\text{m}$  の DR レーザの出力端面に 280nm の誘電体膜 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 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。

**(1-6) 電界吸収型変調器 (EAM) 一括集積型分布反射型 (DR) レーザ**

次に、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

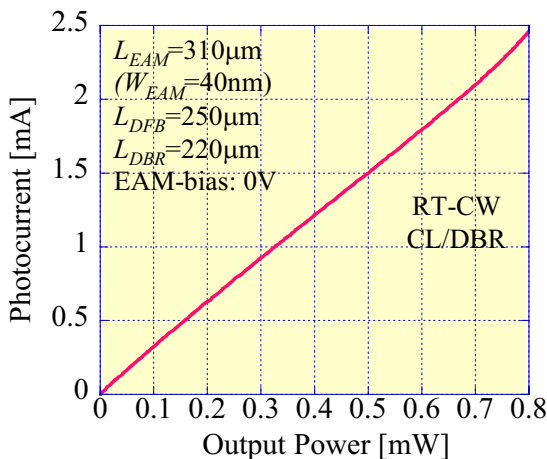


図 3.1.11. EAM の光出力-光電流特性

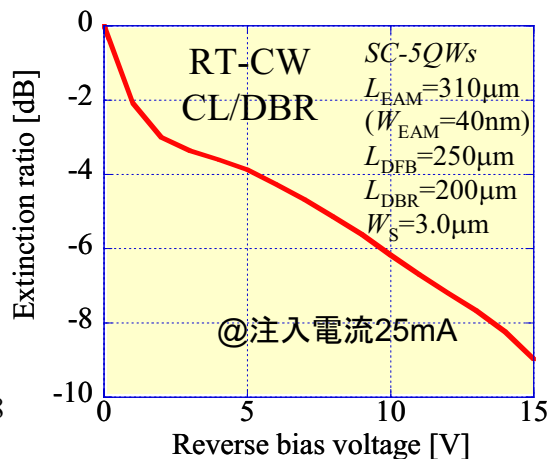


図 3.1.12. EAM-DR の消光比の逆バイアス依存性

3.8 $\mu\text{m}$  の極微溝で分離し、分離電気抵抗値としてこれまで最高の 60M $\Omega$ 以上を実現している。レーザ光出力として数 mW $\sim$ 10mW 程度が要求される長距離光ファイバ通信では、EAM とレーザの分離電気抵抗は数百 k $\Omega$ 以上あれば十分といわれるが、伝送路損失が無視できるほど小さな光インタコネクション等では光出力は数十 $\sim$ 数百 $\mu\text{W}$ 程度で使用できる可能性があり、分離電気抵抗も数 M $\Omega$ 以上が必要と考えられる。活性層の細線幅 40nm, 周期 100nm, 長さ 300 $\mu\text{m}$  の EAM を集積した素子において室温連続動作下において、しきい値電流 3.5mA,  $\eta_{\text{dr}}=7.5\%$ 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 3.1.11 にレーザ出力と EAM 領域の光吸収電流の関係を、図 3.1.12 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。

細線幅変調によるブルーシフトは高い透過率の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 $\mu\text{m}$  の PM を集積した素子において、低しきい値電流 2.5mA (室温連続動作)、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。

### (1-7)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 $_{\perp}$ ) と平行方向 (Q-Wire $_{\parallel}$ ) 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 3.1.13 に示すように、Q-Wire $_{\parallel}$ のしきい値電流密度が Q-Wire $_{\perp}$ と比較して約 2 倍高い結果となった。

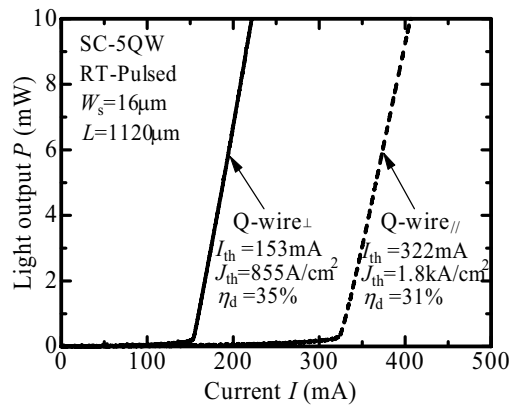


図 3.1.13 Q-Wire $_{\parallel}$ と Q-Wire $_{\perp}$ レーザの電流-光出力特性

この要因として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 3.1.14 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ので差異は観測されなかったが、Q-Wire $_{\parallel}$ の透明キャリア密度は Q-Wire $_{\perp}$ と比較して少々大きく、また注入電流に対する微分利得は Q-Wire $_{\perp}$ の方が 4 倍程度高い値が観測され、しきい値電流は Q-Wire $_{\parallel}$ の方が Q-Wire $_{\perp}$ と比較して約 2 倍程度高い値となった。

次に、種々の細線幅の歪補償量子細線構造を作製して、その PL 発光ピーク波長シフト量および発光強度の偏光度  $(I_{\parallel}-I_{\perp})/(I_{\parallel}+I_{\perp})$  の細線幅依存性を測定した結果、図 3.1.15 に示すように、PL 発光ピーク波長シフト量は歪を考慮した理論解析結果とほぼ一致する結果が得られたが、偏光度については 30-60nm という比較的大きな量子構造でも 20%を越え

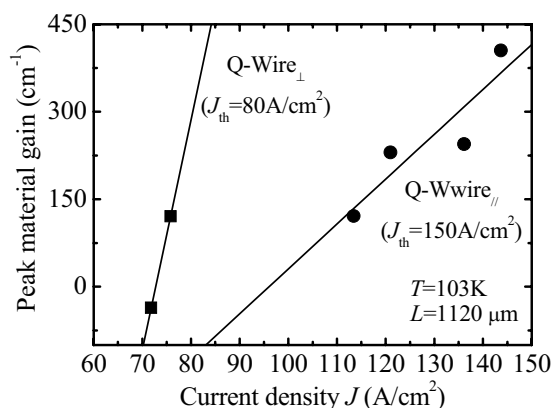


図 3.1.14. Q-Wire<sub>∥</sub>とQ-Wire<sub>⊥</sub>の最大材料利得の注入電流密度依存性

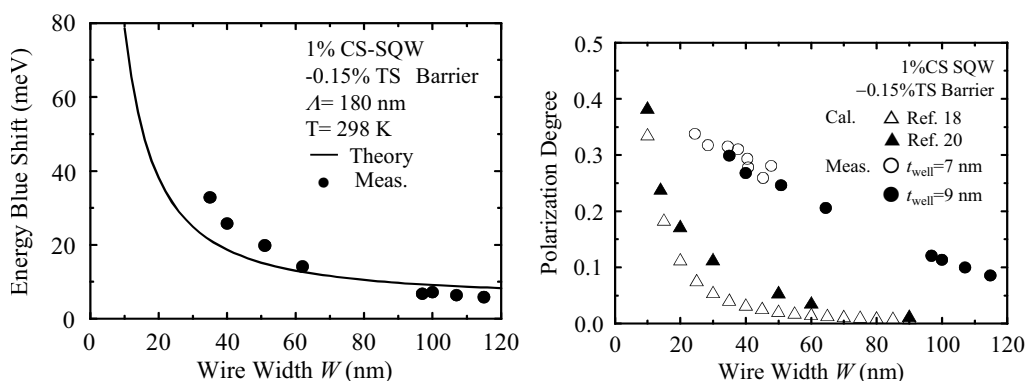


図 3.1.15 Q-Wire 構造の PL ピーク波長エネルギーシフト量(左図)と PL 強度の偏光度の細線幅依存性力特性

る値が観測され、これまで用いてきた理論では説明できない結果となった。歪応力分布によってエネルギーバンド構造が変調され、広い細線幅でも等価的に狭い領域にキャリアが閉じ込められていると見なせることによるものと考えられる。

### (1-8) 任意形状量子構造作製

前述の偏波異方性を利用して、ある量子準位が複数の量子ドットにまたがる結合量子ドット、あるいはそれよりフレキシブルな結合量子構造を作製することにより、信号光を別の制御光で変調・スイッチするデバイスの可能性が拓けると考え、横方向量子閉じ込め効果を有する微細な任意形状を形成するための基礎的研究を行った。

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 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>-RIE にて形状を転写し、OMVPE 法にて埋め込み再成長した。EB 露光に関しては、基板からの後方散乱および近接効果を考慮して適性露光量を計算す

る方法によって露光分布を求め、L 字形状、量子ダッシュ形状、リング形状を作製した。図 3.1.16 には、周期 150nm、一辺の長さ 81nm、幅 20nm、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。さらに、100nm 周期の長さ 49nm、幅 37nm の量子 dash 構造の作製にも成功した。

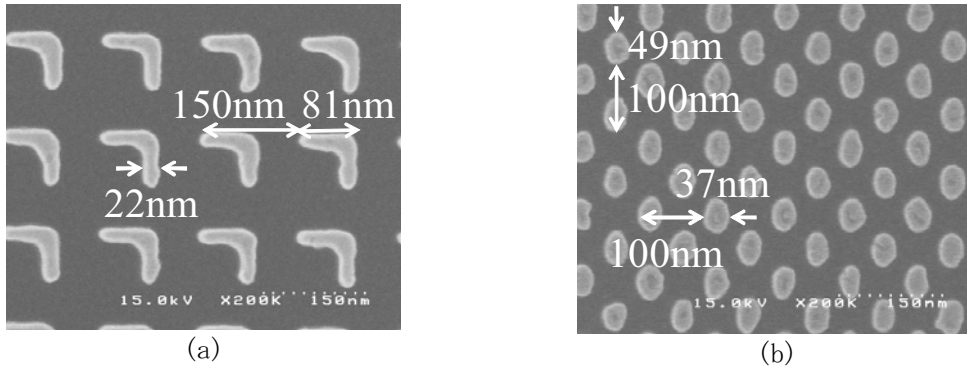


図 3.1.16 作製した任意構造の SEM 像(a) L 型形状 (b) 量子ダッシュ構造

(1-9) 半導体薄膜分布帰還 (DFB) レーザ

本研究を提案提案した当初には、室温連続動作条件下での光励起パワー 1.5mW でのレーザ動作が得られており、同一の回折格子周期に対する発振波長の揺らぎが ±1.2nm 程度であることを報告したが、本研究期間中に、①表面凹凸形状回折格子による低しきい値動作、②負の屈折率温度特性材料による発振波長の温度依存性低減、③直接貼り付け法による SOI 基板上へのレーザ実現を行った。

① 表面凹凸形状回折格子による低しきい値動作

図 3.1.17 の半導体薄膜 DFB レーザの断面構造模式図に 2 種類の構造を示す。下図は半導体コア層表面を平坦になるように成長時間を制御したデバイスであり、上図

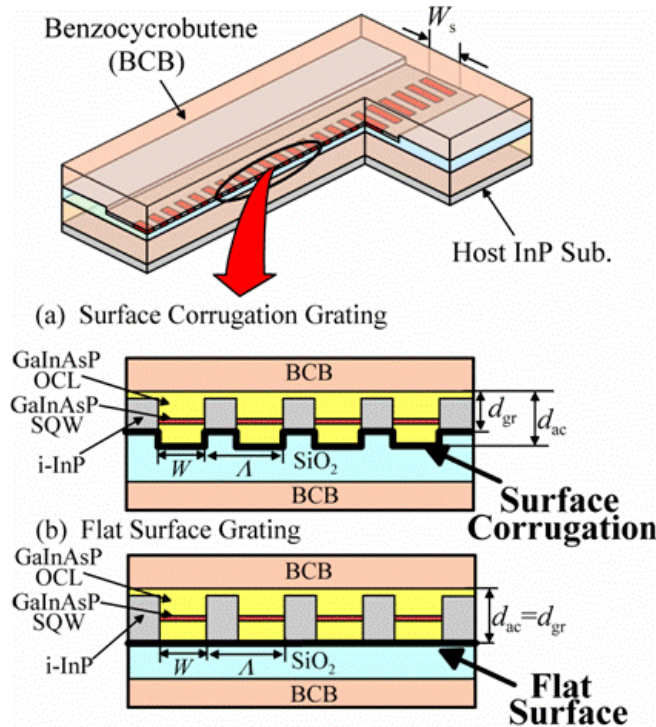


図 3.1.17 半導体薄膜レーザの構造図



は回折格子形成後の成長時間を短めに設定して、表面に凹凸形状が残るようにしたデバイスである。平坦な半導体薄膜 DFB レーザでも従来の DH 構造に比べて 3 倍以上の光閉じ込め係数が実現可能であり、回折格子の屈折率結合係数も約 1 桁高い値が実現可能であるが、表面に凹凸形状を形成することにより、さらに大きな屈折率結合係数が実現できた。ストライプ幅  $0.2\mu\text{m}\sim 2.0\mu\text{m}$  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  $0.4\mu\text{m}$ 、及び  $0.6\mu\text{m}$  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  $68\text{nm}$  (屈折率結合係数  $2950\text{cm}^{-1}$ ) を確認した。これは平坦に埋め込んだストライプ幅  $2.0\mu\text{m}$  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することができた。40nm の凹凸形状回折格子を形成した半導体薄膜 DFB レーザにおいて、図 3.1.18 に示すように、共振器長  $80\mu\text{m}$  の素子でしきい値励起光パワー  $0.34\text{mW}$  での室温連続発振を得ることができ、本研究開始当初の約 1/5 までしきい値励起光パワーを低減することに成功した。副モード抑圧比 (SMSR) はしきい値の 2 倍において  $35\text{dB}$  を記録した。また、25nm の深さの凹凸形状回折格子を形成した半導体薄膜レーザにおいて  $85^\circ\text{C}$  までの連続動作が得られた。

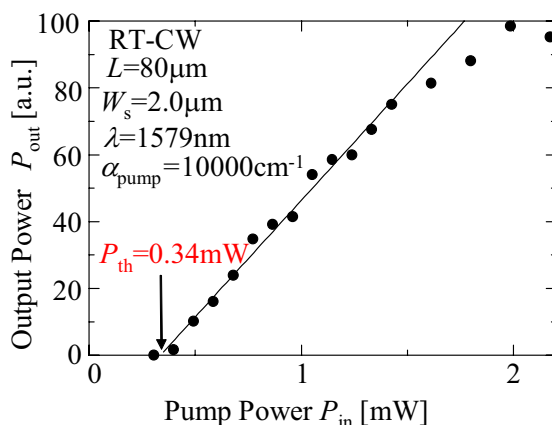


図 3.1.18 凹凸形状回折格子を用いた半導体薄膜 BH-DFB レーザの入出力特性

## ② 負の屈折率温度特性材料による発振波長の温度依存性低減

図 3.1.18 下部に示した平坦コア半導体薄膜 DFB レーザでは片側のクラッド層に BCB を用いているが、BCB は半導体の屈折率変化の温度係数と逆の符号を有しているため、半導体コア層に分布する光エネルギーと BCB クラッド層に分布するそのバランスをとるように設計することにより、レーザとなる半導体薄膜導波路構造の実効屈折率を温度無依存可することができる。理論解析から半導体コア層厚を 40nm まで薄

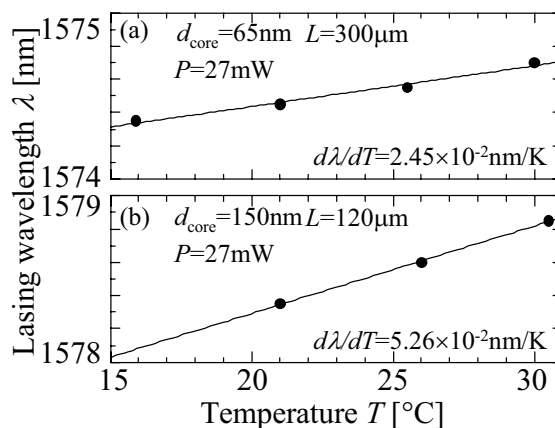


図 3.1.19 BCB クラッド層に用いた半導体薄膜 BH-DFB レーザの発振波長の温度依存性

層化すれば温度無依存条件が満たされることが明らかとなった。そこで、半導体コア層厚の異なる半導体薄膜 DFB レーザを作製し、その発振波長の温度依存性を比較した。図 3.1.19 に示すように、発振波長の温度依存性は半導体コア層厚 150nm の素子では通常の DH 構造 DFB レーザの約 1/2、半導体コア層厚 65nm の素子では約 1/5 という小さな値が得られた。

### ③ 直接貼り付け法による SOI 基板上へのレーザ実現

Si/SiO<sub>2</sub> 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℃ 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。

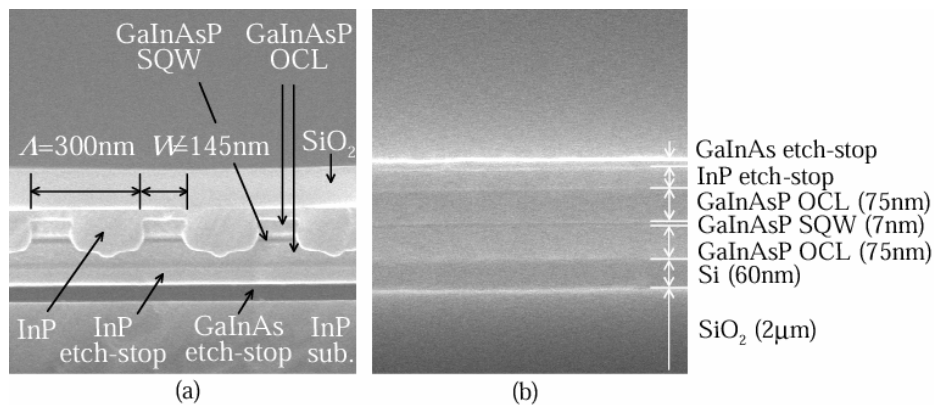


図 3.1.20 SOI 基板上に貼り付けた半導体薄膜 DFB レーザの断面 SEM 写真

この方法を用いて図 3.1.20 に示すように、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た。共振器長 120 $\mu\text{m}$ 、ストライプ幅 2 $\mu\text{m}$  の素子において、図 3.1.21 に示すように、室温連続動作しきい値励起光強度 2.8mW、しきい値の 2 倍の励起強度における SMSR 28dB が得られた。

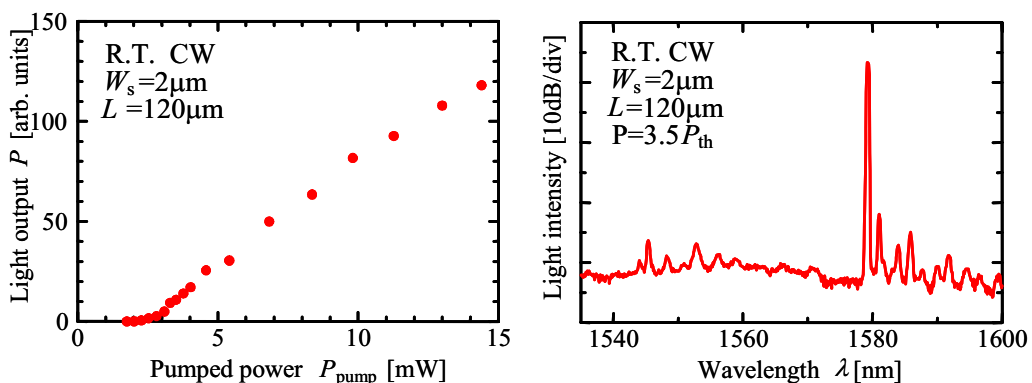


図 3.1.21 SOI 基板上半導体薄膜レーザの光励起発振特性

さらに、SOI 基板と半導体薄膜 DFB 構造を直接貼り付けた後に、SOI の表面 Si 層および活性層をストライプ幅 1.5 $\mu\text{m}$  のリブ導波路構造に加工し、図 3.1.22 に示すように、140 $\mu\text{m}$  の DFB レーザ領域の先に 500 $\mu\text{m}$  の出力導波路を集積した素子を試作した。室温連続動作下におけるしきい値励起光出力は 11.3mW と高い値となったが、



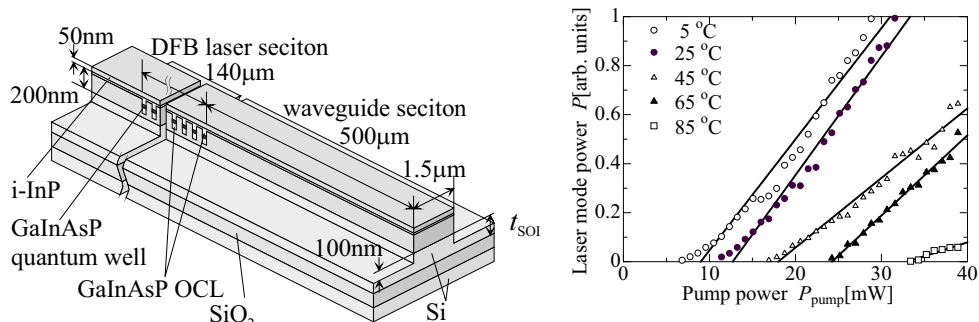


図 3.1.22 SOI 基板上リブ導波路半導体薄膜 DFB レーザの光励起発振特性

85°Cまでの連続動作、およびしきい値の2倍の励起強度におけるSMSR 29dBが得られた。

## (2) 研究成果の今後期待される効果

GaInAsP/InP 結晶材料の極微細構造形成プロセスにおいては、極微細構造界面における非発光再結合電流成分は幅 20nm の量子細線構造でも約 20%以下に低減でき、また、室温連続動作寿命も 38,500 時間以上と初期的実験としては十分長いことが明らかとなった。理想的量子細線構造に期待される狭い光利得スペクトル特性に起因する低しきい値・高効率動作実現のためには、EB 露光パターンのサイズ分布を 3nm からさらに半分程度に低減する必要があり、新しい EB レジストの試用、少ない積層数で適用できる新しいデバイス構造の実現が必要となると考えられる。

圧縮歪量子井戸を伸張歪バリア層で構成した歪補償量子井戸構造から形成した量子細線の PL 強度の偏波異方性の研究から、理論的に期待されるよりもかなり広い 30-40nm 程度の幅の量子細線でも偏波異方性が顕著となることが実験的に明らかになった。これは格子整合量子細線とは異なる結果であり、作製した幅よりも実効的に狭い領域にキャリアが閉じ込められている可能性があることを示している。

しかし、EB 露光、低損傷ドライエッチングおよび OMVPE による埋め込み再成長を用いた GaInAsP/InP 結晶材料の極微細構造形成に関しては、世界的に他の追随を許すものではなく、以下に挙げるように新しいデバイスおよび概念の有効性を実験的に明らかにした。

### ① 活性層分離型 DR レーザの低電流動作

ストライプ幅 2.1μm のメサストライプ素子においてしきい値電流 0.8mA、前端面からの外部微分量子効率 20%が得られている。埋め込みヘテロストライプ構造等を用いてメサ側面での非発光再結合電流成分を低減化すれば、さらに 30%程度、ストライプ幅を 1-1.5μm に狭めることにより 0.3-0.4mA 程度まで動作電流低減が可能である。

また、活性層位置と空間的整合性の高い共振モードのみがレーザ発振するという原理を反映して、反射戻り光耐性の高い単一波長動作が期待されており、光アイソレータが不要な動作速度をどこまで上げられるかが、単一の光源モジュールとして、あるいは光集積回路内の光源としての応用可能性を広げる上で重要な課題である。長距離広帯域光ファイバ通信には 10mW 程度の光出力が要求されており、1mA 以下の低しきい値電流動作は要求されないが、1mW 程度の光出力で十分な MAN や LAN には、電子冷却素子不要・10Gbit/s 程度の直接変調動作等の観点で低電流動作が望まれており、大変有力なデバイスになると考えられる。

### ② 細線幅変調による異種機能集積

細線幅を 80-100nm とした活性領域に対して、細線幅を 40nm とした領域を前端面からの光出力を部分的に吸収する光パワーモニタとして集積し、基本的動作を実証した。従来の光パワーモニタはレーザの後端面側にエッチング溝を介して集積されたり、あるいは別素子をマウント上にハイブリッド集積されていた。

レーザ単体デバイスのパワーモニタとしては従来形式でも十分であるが、この光出力を部分的に吸収する光パワーモニタは、吸収量を入射光量の 1%程度に制御できれば、インラインパワーモニタとして光集積回路の種々の場所に使用できるため、多波長の信号光の出力レベルを適正化するための可変光パワー減衰器 (Variable Optical Attenuator: VOA)をはじめ、種々の応用可能性を有している。

### ③ 半導体薄膜構造による低消費電力光デバイス

高屈折率差光導波路構造による積層方向での光電界強度分布の強力な閉じ込め作用により、レーザ共振器におけるモード利得を従来の二重ヘテロ接合構造の 3 倍程度に高めるといふ基本的利点を活かすことにより、量子薄膜構造を活性層に用いても従来の二重ヘテロ接合構造に理想的量子細線構造を用いるのと等価な低消費電力動作が可能であることを、理論・実験両面から明らかにした。これまでは光励起による DFB レーザの 85℃までの連続動作をはじめ、負の屈折率温度依存性を有する BCB をクラッド層とすることによる発振波長の温度依存性の低減、直接貼り付け法による SOI 基板上への形成等を実現してきた。

現在、SOI 基板を介した電流注入構造の試作、選択拡散による横接合ストライプ (Transverse Junction Stripe: TJS) 構造の導入を行っており、電流注入動作による低消費電力動作、高効率動作の実現を目指して研究を推進している。電流注入による動作が実現できれば、上述の①および②の研究成果を全て半導体薄膜構造の上で実現することにより、従来の光集積デバイス・光集積回路とは全く異なる光プラットフォームが構築できると考えている。すなわち、レーザのしきい値電流は従来の DH 構造レーザの約 1/100 となり、必要な SNR を維持するための光出力も約 1/100 とすることができれば、半導体レーザや半導体光増幅器などの能動素子の動作電力も約 1/100 に低減した超低消費電力・高機能光デバイスおよび光集積回路が実現可能となると考えられる。

この半導体薄膜構造による低消費電力光デバイスの研究に関しては、平成 19 年度開始の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)として採択されており、この CREST プログラムの「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)、浅田雅洋教授 (THz 固体素子によるチップ間信号伝送)らの協力を得ながら推進する。

### 3.2 光スイッチグループ(東京工業大学 水本グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

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ためにその実現が期待されている。本研究グループでは、GaInAsP に発生する光強度に依存した屈折率変化と分布帰還(DFB)造を利用して、導波路型的全光スイッチを開拓してきた。

特に本研究課題においては、動作速度の明確化とスイッチングパワー低減の観点から、バルク半導体結晶と量子構造をそれぞれ光導波層に用いた場合について、光強度依存屈折率変化の大きさと応答速度を測定により明確化することを中心に研究を進めてきた。

以下に、研究の実施内容と成果を述べる。

#### (2-1) 光強度依存屈折率変化測定系

DFB 型全光スイッチングデバイスの応答速度は、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。微弱な屈折率変化を、サブピコ秒オーダーの時間分解能で測定するために、図 3.2.1 に示すループ型干渉計を用いた測定系を考案した。

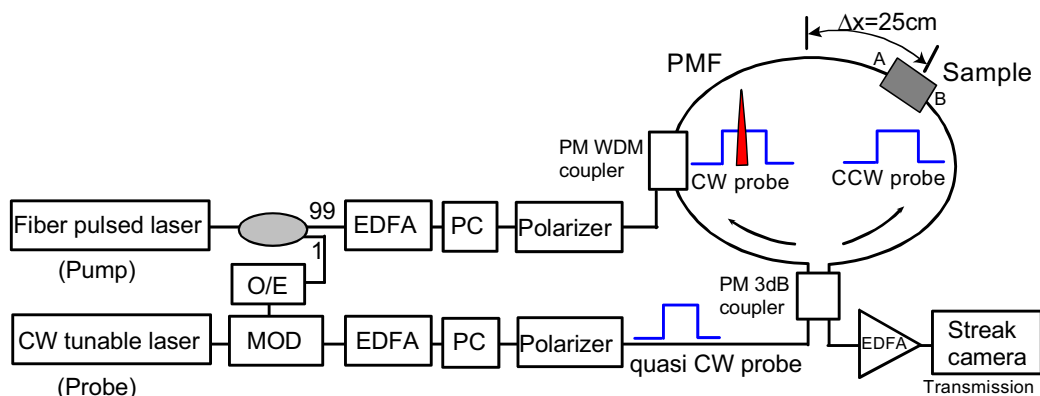


図 3.2.1 ループ型干渉計によるポンプ光誘起屈折率変化測定系

この干渉計は、光 3dB 方向性結合器とファイバーループを用いて形成されている。安定した干渉を得るために、ファイバーループも含めた全ての光学要素は偏波保存系で形成されている。光 3dB 方向性結合器から入射されたプローブ光は、同振幅で互いに逆方向にファイバーループ中を伝搬する。ファイバーループ中の非対称な位置に被測定サンプルを設置することによって、ファイバーループを互いに逆方向に伝搬するプローブ光(CW 成分とCCW 成分)は、時間差をもってサンプルを通過する。図の配置では、プローブ光 CCW 成分が先にサンプルを通過し、CCW 成分と CW 成分の時間差は 2.4ns である。

一方、ファイバーループ中に設けた WDM カプラを介して、プローブ光 CW 成分と時間的に同期させてパルス波ポンプ光を入射する。プローブ光の CCW 成分と CW 成分の時間差のため、ポンプ光がサンプルに到達した時刻にはプローブ光 CCW 成分はサンプルを通過しているため、ポンプ光と同期したプローブ光 CW 成分のみがサンプル中のポンプ光誘起屈折率変化・吸収変化によって変調される。ポンプ光によって変調を受けたプローブ光 CW 成分と変調を受けていない CCW 成分が、3dB 方向性結合器で干渉する結果、二つのプローブ光成分のアンバランス分だけがファイバーループの透過出力端に出力される。残りのプローブ光は、3dB 方向性結合器のプローブ光入射側に出力される。

透過出力端から出力されるプローブ光を、サブピコ秒の時間分解能を有するストリークカメラで観測することによって、サンプル中で発生した屈折率変化による変調分と吸収変化による変調分を観測することができる。吸収変化による変調分を別途測定し、ループ型干渉計の出力からその寄与分を差し引くことによって、サンプル中に生じたポンプ光誘起屈

折率変化のみを測定することができる。

**(2-2) GaInAsP バルク半導体における光強度依存屈折率変化**

ポンプ光誘起屈折率変化を測定するために、ポンプ光によって誘起される吸収変化を明確化する必要がある。バンドギャップ波長 1410nm の GaInAsP において、ポンプ光誘起吸収変化のポンプ光強度依存性、ポンプ光波長およびプローブ光波長依存性を図 3.2.2 に示す。

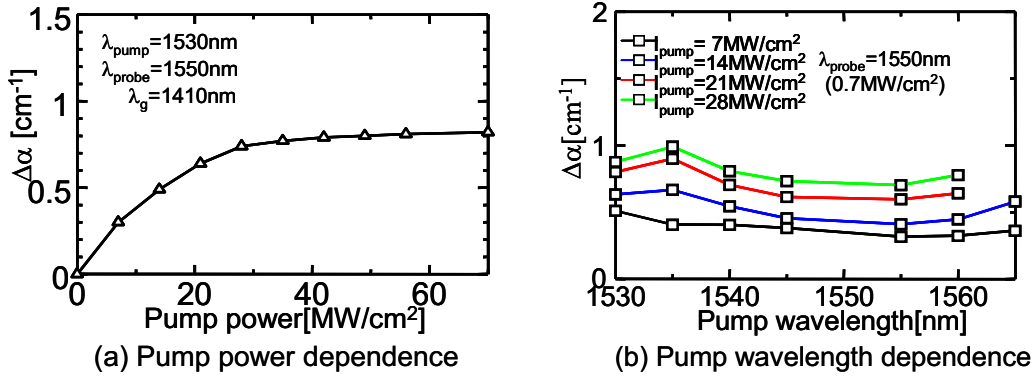


図 3.2.2 ポンプ光誘起吸収変化の(a)ポンプ光強度依存性および(b)ポンプ光波長依存性。GaInAsP のバンドギャップ波長 1410nm、プローブ光波長 1550nm。

次に、ループ型干渉計を用いて、バンドギャップ波長 1410nm の GaInAsP の屈折率変化を測定した結果を図 3.2.3 に示す。波長 1530nm のポンプ光に対してプローブ光波長 1550nm のループ干渉計透過率が変化している様子が、図(a)よりわかる。ここで、別途測定したポンプ光誘起吸収変化による透過プローブ光の変化(図(b))を差し引き、屈折率変化による透過プローブ光の時間波形を求めた結果を図(c)に示す。

ポンプ光強度に依存する GaInAsP の屈折率変化は、半値全幅 4ps の時間幅をもつポンプ光パルスに追従して発生していることがわかる。すなわち、ポンプ光誘起屈折率変化は、少なくともピコ秒以下の応答速度を有している。

ループ型干渉計で GaInAsP バルク半導体導波路にけるポンプ光誘起屈折率変化を測定し、吸収変化の影響を差し引いて測定データを整理した結果を図 3.2.4 に示す。バンドギャップ波長  $\lambda_g=1410$  nm、1300 nm、1200 nm のバルク GaInAsP において、波長 1550nm のプローブ光(ポンプ光波長は 1530nm)に対して、それぞれ  $4 \times 10^{-12}$  cm<sup>2</sup>/W、 $-1 \times 10^{-12}$  cm<sup>2</sup>/W、 $-0.6 \times 10^{-12}$  cm<sup>2</sup>/W の光強度依存屈折率変化が得られた。これらの値は、二準位モデルによって計算した屈折率変化の GaInAsP 組成依存性の理論予測とよく一致すること

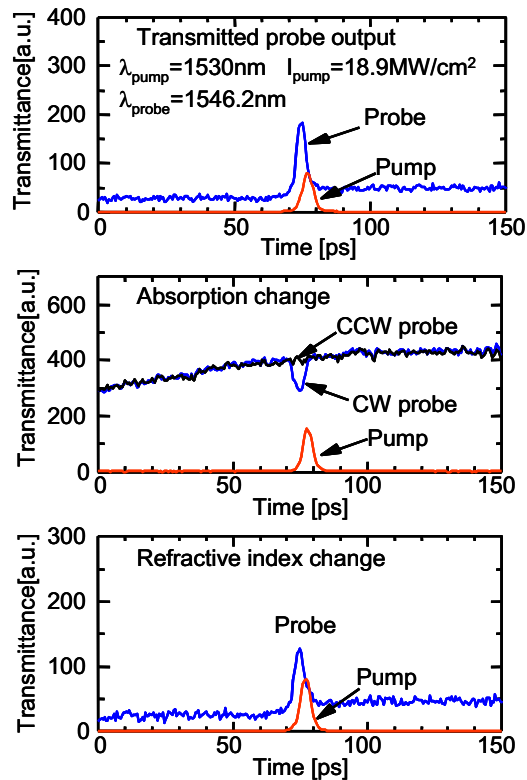


図 3.2.3 ループ型干渉計によるポンプ光誘起屈折率変化測定結果( $\lambda_g=1410$ nm)。

が明らかになった。

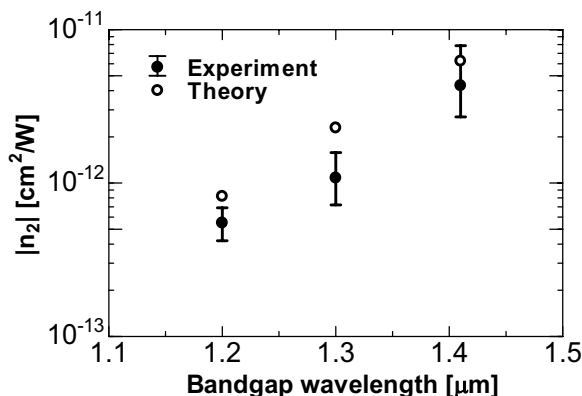


図 3.2.4 GaInAsP バルク半導体( $\lambda_g=1200, 1300, 1410\text{nm}$ )における光強度依存屈折率変化の大きさ。

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 MW/cm<sup>2</sup>、40 MW/cm<sup>2</sup>、50 MW/cm<sup>2</sup> 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。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、図 3.2.5 に示すように数 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、導波路コアの断面積から導波路中のピーク光強度はおよそ 1 MW/cm<sup>2</sup> と見積られ、この上限を超えていない。したがって、DFB 導波路形スイッチングデバイスでは、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。

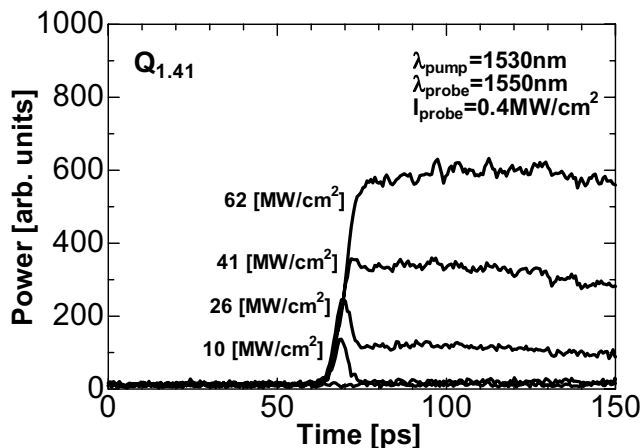


図 3.2.5 高ポンプ光強度における遅い(数 100ps)回復時間の屈折率変化

### (2-3) 半導体量子構造における光強度依存屈折率変化

GaInAsP/InP からなる量子構造導波路中のポンプ光強度によって誘起される屈折率変化を、バルク半導体と同様にループ型干渉計を用いて測定した。測定した量子構造サンプルは、次のとおりである(図 3.2.6)。

- GaInAsP-7 層量子井戸
- GaInAsP-7 層量子井戸を幅 30nm、周期 100nm で細線加工した 7 層量子細線

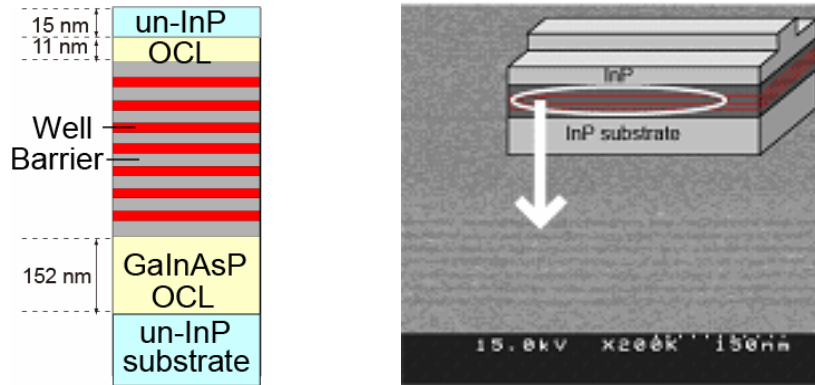


図 3.2.6 GaInAsP-7 層量子井戸導波路構造。GaInAsP-well 層厚 7nm、barrier 層( $\lambda_g=1200\text{nm}$ )厚 12nm、OCL( $\lambda_g=1200\text{nm}$ )。

$\lambda_g=1490\text{nm}$ (厚さ 7nm)、 $\lambda_g=1430\text{nm}$ (厚さ 7nm)、1%圧縮歪  $\lambda_g=1430\text{nm}$  (厚さ 7nm)の 3 種類の GaInAsP-well 層をもつ量子井戸について示す。いずれも barrier 層は  $\lambda_g=1200\text{nm}$  (厚さ 12nm)、OCL 層の GaInAsP 組成は  $\lambda_g=1200\text{nm}$  である。7 層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起される光強度依存屈折率変化の大きさを測定した。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 Q-Well<sub>1,49</sub>と Q-Well<sub>1,43</sub>において、波長 1550 nm 帯のプローブ光に対して  $6 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{W}$  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(図 3.2.7)。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、大きな屈折率変化が得られた。

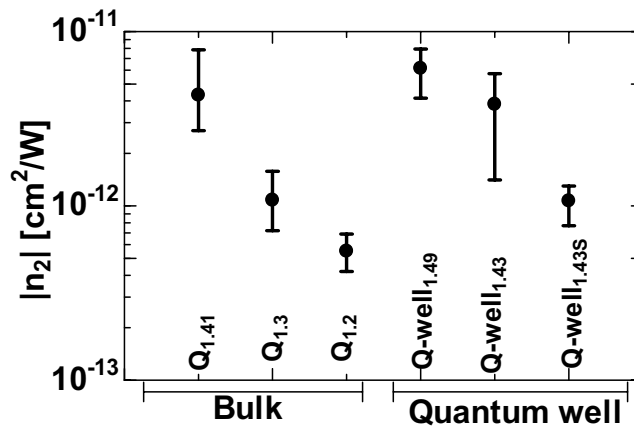


図 3.2.7 GaInAsP- 7 層量子井戸導波路構造と GaInAsP バルク結晶のポンプ光依存屈折率変化の比較。well 層として  $\lambda_g=1490\text{nm}$ (厚さ 7nm)、 $\lambda_g=1430\text{nm}$ (厚さ 7nm)、1%圧縮歪  $\lambda_g=1430\text{nm}$  (厚さ 7nm)の 3 種類の量子井戸について示す。いずれも barrier 層組成は  $\lambda_g=1200\text{nm}$ (厚さ 12nm)、OCL 組成層は  $\lambda_g=1200\text{nm}$ 。

なお、弱いポンプ光強度ではピコ秒オーダーのパルス状ポンプ光に追従する時間応答を示すが、GaInAsP バルク半導体と同様、ポンプ光強度が強くなるとキャリアの生成を伴う遅い回復時間を有する過程が発生する。 $\lambda_g=1490\text{nm}$  の GaInAsP-well 層を用いた量子井戸構造の場合、図 3.2.8 に示すように  $3 \text{ MW}/\text{cm}^2$  以上のポンプ光強度において、回復時間の遅い屈折率変化が健在化した。



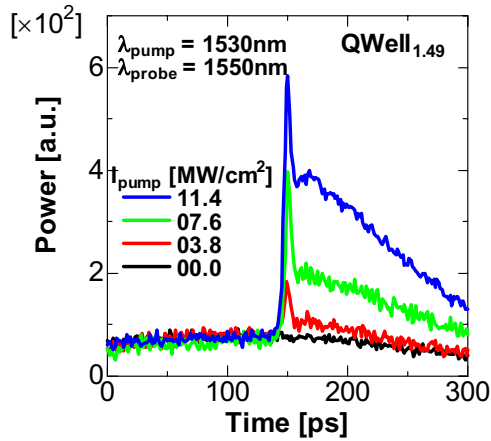


図 3.2.8 量子井戸構造(well- $\lambda_g=1490\text{nm}$ )におけるポンプ光強度に対する屈折率変化の時間応答の様子。ポンプ光強度を高くすると回復時間の遅い応答が顕在化する。

一方、細線幅 30 nm、周期 100 nm の 7 層量子細線を導波層コアとする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い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 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。バンドギャップ波長 1490nm の well 層をもつ量子井戸導波路(図 3.2.6)において、波長 1530nm のポンプ光と波長 1550nm のプローブ光に対して、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。結果を図 3.2.9 に示す。

ポンプ光とプローブ光をいずれも 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、ポンプ光とプローブ光ともに 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。

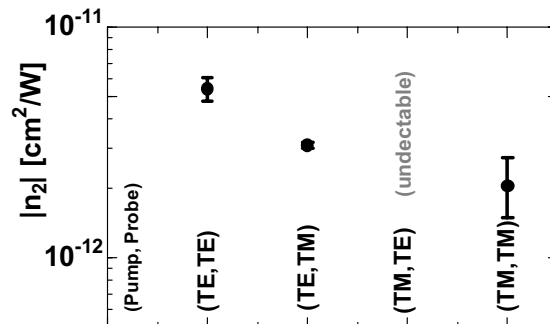


図 3.2.9 量子井戸における(a)ポンプ光誘起屈折率変化によってファイバ干渉計のプローブ光透過率が変化する様子と(b)光強度依存屈折率変化のポンプ光/プローブ光偏波依存性。



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。  
 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、量子閉じ込めシュタルク効果(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ブ光波長の長波長側への離調が大きいと考えられる。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ブ光波長の依存性など、より詳細な検討が必要である。

**(2-5) 垂直回折格子 DFB 導波路型全光スイッチ**

(100) InP 基板上に MOCVD 法によって結晶成長した GaInAsP バルク結晶を導波層として用い、GaInAsP 層に発生するポンプ光強度に依存した屈折率変化と分布帰還(DFB)構造を利用して全光スイッチが形成できる。

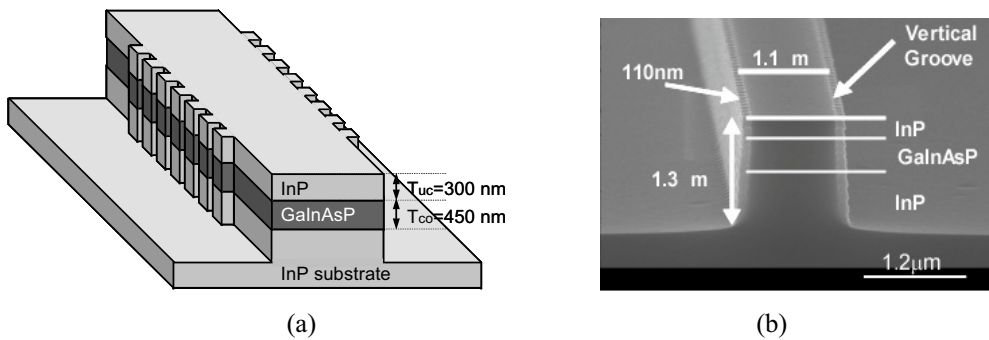


図 3.2.10 垂直回折格子 DFB 導波路型全光スイッチの構造

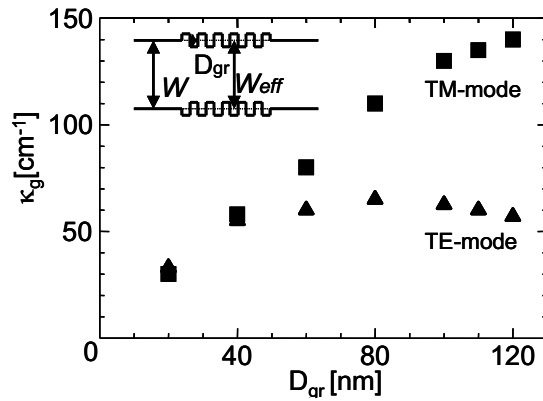


図 3.2.11 垂直回折格子 DFB 導波路におけるグレーティング結合係数

GaInAsP バルク導波路をハイメサ状に形成し、ハイメサ導波路の側壁に回折格子を形成することで分布帰還構造を形成した(図 3.2.10)。この垂直回折格子形グレーティングは、光波エネルギーが強い導波路側壁に回折格子が形成されるため、前進波と後退波の相互作用の大きさを表すグレーティング結合係数を大きくすることができる。導波路幅の変調深さ(グレーティングの溝深さに相当)に対するグレーティング結合係数の大きさを測定した結果を、図 3.2.11 に示す。グレーティング深さ 80nm で、TM モードに対して結合係数  $110cm^{-1}$  が得られる。

このように大きなグレーティング結合係数を用いて DFB 導波路型全光スイッチを形成した結果、従来の導波路クラッド上面に回折格子を形成した構造に比べて、出力光のオフ状態とオン状態の消光比を改善することができた。測定で得られた消光比は、およそ 10dB で

あった(図 3.2.12)。

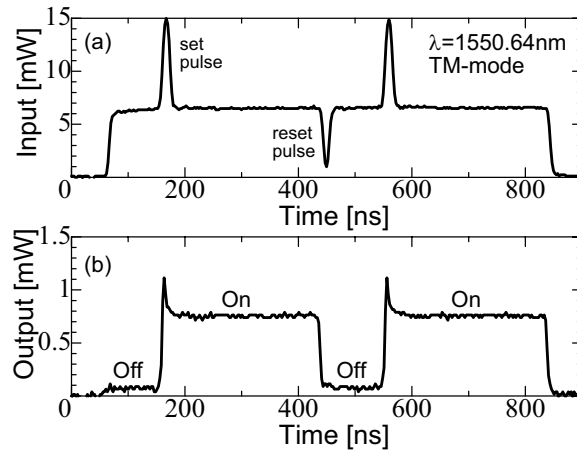


図 3.2.12 垂直回折格子 DFB 導波路型全光スイッチにおける双安定動作。出力光の on/off 消光比として約 10dB が得られている。

#### (2-6) DFB 導波路型全光スイッチングデバイスによる全光波長変換

全光スイッチングデバイスの応用として、全光波長変換について検討した。動作原理を図 3.2.13 に示す。信号光を DFB 導波路型全光ゲートのオン/オフを制御するポンプ光として用いる。信号光の有無によって、連続波として入力するプローブ光の透過状態を制御し、信号光パルスの有無をこれとは異なる波長を有するプローブ光にコピーすることができる。ポンプ光誘起屈折率変化によってプローブ光の透過率が高感度に変調されるように、プローブ光波長を DFB 導波路のストップバンド長波長端に一致させる必要がある。

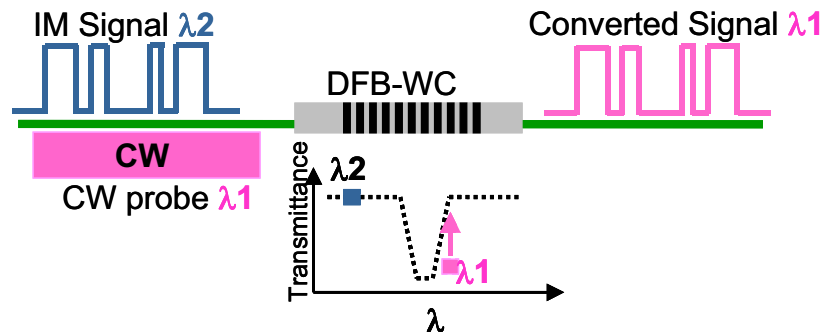


図 3.2.13 DFB 導波路型全光ゲートを用いた波長変換の動作原理

プローブ光波長 1554.23nm で動作する素子において、ピークパワー  $6 \pm 0.5$  dBm の信号光(ポンプ光)に対して、変換効率(=出力プローブ光パワー/入射信号光パワー)  $-9.5$  dB の全光波長変換特性を得た(図 3.2.14)。なお、導波層のバンド端(この例では 1430nm)から離れたポンプ光波長(1530~1560nm)を用いる場合、ポンプ光波長が変化しても屈折率変化はほとんど変化しない。そのため、ポンプ光の波長変化に対する変換効率の依存性は小さい。バンドギャップ波長 1430nm の GaInAsP を導波層として用いた DFB 型全光ゲートスイッチにおいて、ポンプ光波長を 1530~1560nm の範囲で変化させても、変換効率は  $-9.5 \pm 0.5$  dB でほぼ一定であった。

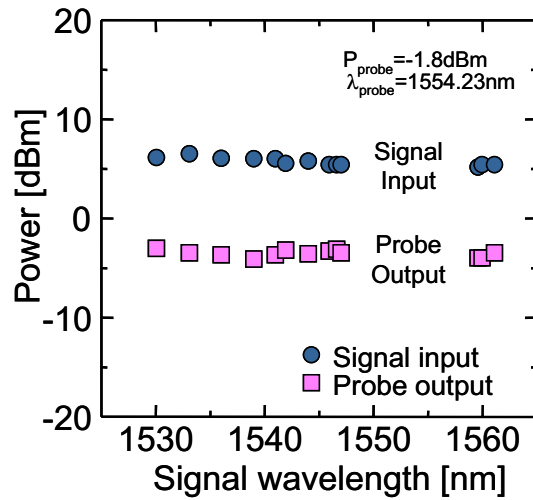


図 3.2.14 GaInAsP-DFB 導波路全光ゲートスイッチにおける全光波長変換特性

### (2-7) 分布帰還導波路における動作速度制限

GaInAsP を導波層とする DFB 導波路において、ピコ秒パルスポンプ光に対する応答を観測して、分布帰還構造による帯域制限に起因するプローブ光応答速度の制限について調べた。すなわち、時間的に強度が一定のプローブ光を、その波長が分布帰還導波路のストップバンド端に一致するように設定して入射させる。ポンプ光パルスを同時に入射させると、ポンプ光の強度変化に応じて発生する屈折率変化を反映して、プローブ光の透過率が変化する(図 3.2.15(a))。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。

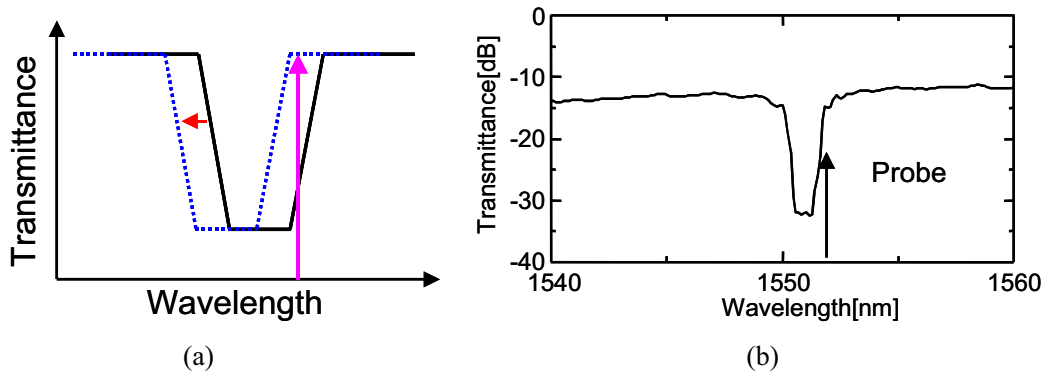


図 3.2.15 GaInAsP-DFB 導波路の応答速度を検証する波長配置

厚さ 450nm、バンドギャップ波長 1410nm の GaInAsP を導波層とし、導波層上に装荷した厚さ 300nm の InP 上クラッド層の上面に周期 235nm のグレーティングを形成した。幅 2.5  $\mu\text{m}$  の導波路で、図 3.2.15(b)に示すように中心波長 1551nm のストップバンドが観測された。この GaInAsP-DFB 導波路のストップバンド長波長側に CW プローブ光の波長を設定し、パルス状のポンプ光を同時に入射して、プローブ光透過率の時間変化を測定した。

結果として、図 3.2.16 に示すように、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。

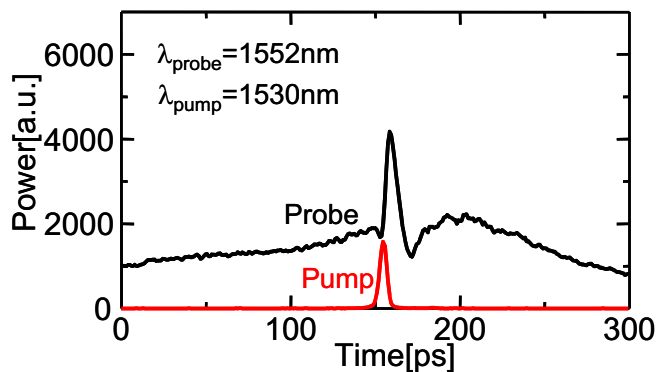


図 3.2.16 GaInAsP-DFB 導波路の短パルス応答

一方、DFB 導波路のストップバンド短波長側の高透過率状態にプローブ光波長を設定すると、負のポンプ光誘起屈折率変化によってストップバンドが短波長側にシフトするために、ポンプ光が入射している間だけプローブ光の透過率が減少する(図 3.2.17)。

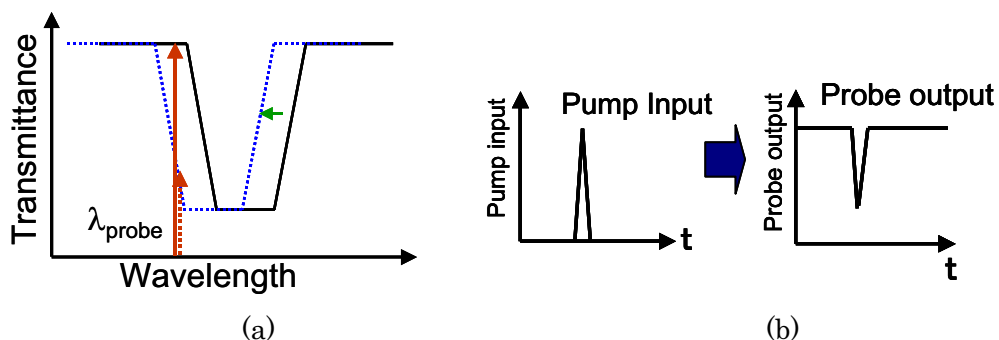


図 3.2.17 ピコ秒ポンプパルスによる DFB 導波路の透過率制御

GaInAsP ( $\lambda_g=1410\text{nm}$ )を導波層とする分布帰還導波路(図 3.2.18 (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時間幅のパルス状ポンプ光を入射してプローブ光の透過率変化を観測した。図 3.2.18(b)に示すように、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が明らかになった。

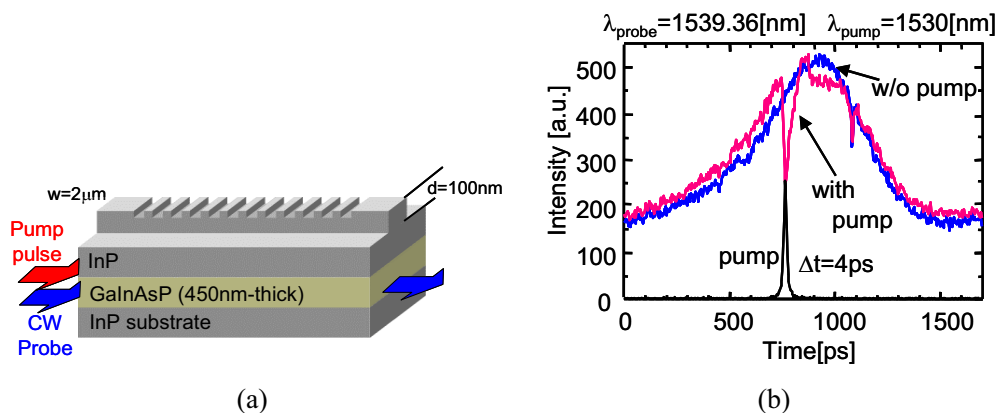


図 3.2.18 ピコ秒ポンプパルスによる DFB 導波路の透過率制御

**(2) 研究成果の今後期待される効果**

本研究の成果として、化合物半導体 GaInAsP におけるポンプ光誘起屈折率変化を実験的に明らかにすることができた。特に、ピコ秒オーダーのパルス状ポンプ光に追隨して屈折率変化が発生することが測定によって明らかになった。全光スイッチなどの光機能デバイスへの応用・展開が期待できる。

また、量子構造におけるポンプ光誘起屈折率変化の解明は完全になされているとはいえないが、量子井戸においてバルク結晶に比して屈折率変化が増大することと、大きな偏波依存性があることが確認できた。今後、この効果を積極的に利用してデバイス化を展開することが期待される。

## 4 研究参加者

## ① 極微構造研究グループ(低損傷極微構造形成および低電力半導体レーザーの研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
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	極微構造形成プロセス、 歪量子細線レーザー、グ ループの研究統括	平成14年11月～ 平成19年10月
丸山武男	〃	助教	任意形状量子構造の作 製と光学特性評価、全 光スイッチの設計と試作	平成14年11月～ 平成19年10月
八木英樹	〃	CREST 研究員	歪量子細線レーザーの作 製・評価	平成16年4月～ 平成17年10月
阪本真一	東京工業大学 電気電子工学 専攻	D3	歪量子細線と半導体薄 膜構造による極低消費 電力レーザー	平成18年4月～ 平成19年10月
Dhanorm Plumwongrot	東京工業大学 電気電子工学 専攻	D3	任意形状量子構造の作 製と光学特性評価	平成18年4月～ 平成19年10月
Saeed Mahmud Ullah	東京工業大学 電気電子工学 専攻	D3	歪量子細線を用いる高 機能レーザーと機能光デ バイスの集積化	平成18年4月～ 平成19年10月
西本頼史	東京工業大学 電気電子工学 専攻	修士課程 2年	低損傷成プロセスと低電 流歪量子細線レーザーの 設計・試作	平成18年4月～ 平成19年3月
田村洋介	東京工業大学 電気電子工学 専攻	修士課程 2年	任意形状量子構造の作 製と光学特性評価	平成18年4月～ 平成19年3月
末光 涼	東京工業大学 電気電子工学 専攻	修士課程 2年	歪量子細線を用いる高 機能レーザーと機能光デ バイスの集積化	平成14年4月～ 平成19年3月
奥村忠嗣	東京工業大学 電気電子工学 専攻	M2	任意形状量子構造の作 製と光学特性評価、全 光スイッチの設計と試作	平成18年7月～ 平成19年10月
内藤秀幸	東京工業大学 電気電子工学 専攻	M2	歪量子細線と半導体薄 膜構造による極低消費 電力レーザー	平成18年7月～ 平成19年10月
李 承勲	東京工業大学 電気電子工学 専攻	M2	歪量子細線を用いる高 機能レーザーと機能光デ バイスの集積化	平成18年7月～ 平成19年10月
黒川宗高	東京工業大学 電気電子工学 専攻	M1	低損傷成プロセスと低電 流歪量子細線レーザーの 設計・試作	平成19年4月～ 平成19年10月

② 光スイッチグループ(光制御光スイッチングデバイスの研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
水本哲弥	東京工業大学 大学院理工学研究科	教授	全光スイッチの設計・ 評価、グループの研究 統括	平成14年11月～ 平成19年3月
横井秀樹	芝浦工業大学 工学部電子工学科	准教授	全光スイッチの設計と 試作	平成14年11月～ 平成19年3月

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Haque, Anisul (バン格拉デシュ工科大学 電気電子工学科 教授)	低次元量子構造 (特に量子細線) における偏光やレ ーザ特性など光学 的な実験結果に関 する理論分野から の意見を得るとと もに議論を行う。	東京工業大学 量子ナノエレクトロニ クス研究センター	平成17年6月 ～平成17年 7月(2ヶ月)



## 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 0 件、国際誌 42 件)

### 【荒井チーム】

- (1) T. Okamoto, N. Nunoya, Y. Onodera, S. Tamura and S. Arai, "Low-Threshold Singlemode Operation of Membrane BH-DFB Lasers," *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 23, pp. 1444-1446, Nov. 2002.
- (2) H.-C. Kim, H. Kanjo, S. Tamura and S. Arai, "Distributed Reflector Lasers with First-Order Vertical Grating and Second-Order Bragg Reflectors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no.12, part 1, no. 12, pp. 7396-7397, Dec. 2002.
- (3) K. Ohira, N. Nunoya, H. Yagi, K. Muranushi, A. Onomura, S. Tamura and S. Arai, "Reliable Operation of GaInAsP/InP Distributed Feedback Laser with Wirelike Active Regions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, part 1, no. 2A, pp. 475-476, Feb. 2003.
- (4) 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, part 1, no. 6A, pp. 3471-3472, Jun. 2003.
- (5) 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, part 2, no. 7A, pp. L748-L750, Jul. 2003.
- (6) H.-C. Kim, H. Kanjo, S. Tamura and S. Arai, "Narrow-stripe distributed reflector lasers with first-order-vertical grating and distributed Bragg reflector," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 8, pp. 1032-1034, Aug. 2003.
- (7) 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.
- (8) 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, part 2, no. 8A, pp. L921-L922, Aug. 2003.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.

- (14) K. Ohira, T. Murayama, M. Hirose, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, "Low-threshold and high-efficiency operation of 1.5  $\mu\text{m}$  distributed reflector laser with DFB grating and Q-wire DBR sections," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 20, pp. 1269-1271, Sep. 2004.
- (15) 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.
- (16) 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 SiO<sub>2</sub>/semiconductor reflectors," *IEICE Electronics Express*, vol. 1, no. 17, pp. 540-544, Dec. 2004.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) 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.
- (20) 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.
- (21) 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.
- (22) 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.
- (23) 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. 16, no. 14, pp. 8814-8818, Sep. 2006.
- (24) 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.
- (25) Y. Nishimoto, K. Miura, H. Yagi, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama and 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.
- (26) 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.
- (27) 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.

- (28) S.-H. Lee, R. Suemitsu, S. M. Ullah, M. Otake, N. Nishiyama and S. Arai, “Very High Electric Isolation Resistance between Distributed Reflector Laser and Front Power Monitor through Deeply Etched Narrow Groove,” to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 39, 2007.

【水本チーム】

- (29) H. Yokoi, T. Mizumoto, S. Kuroda, T. Ohtsuka and Y. Nakano, “Elimination of a back-reflected TE mode in a TM-mode optical isolator with a Mach-Zehnder interferometer,” *Applied Optics*, vol.41, no.33, pp.7045-7051, Nov. 2002.
- (30) H. Yokoi, T. Mizumoto and H. Iwasaki, “Nonreciprocal TE-TM mode converter with semiconductor guiding layer,” *Electron. Letters*, vol.38, No.25, pp.1670-1672, Dec. 2002.
- (31) S.-H. Jeong, T. Mizumoto, M. Takenaka and 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.
- (32) 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.
- (33) 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.
- (34) 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.
- (35) 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. Applied Physics*, vol. 43, no.8B, pp.5800-5804, August 2004.
- (36) H. Yokoi, Y. Shoji and T. Mizumoto, “Calculation of nonreciprocal phase shift in magneto-optic waveguide with Si guiding layer,” *Jpn. J. Applied Physics*, vol. 43, no.8B, pp. 5871-5874, August 2004.
- (37) H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin and T. Mizumoto, “Interferometric optical isolator employing a nonreciprocal phase shift operated in a unidirectional magnetic field,” *Applied Optics*, vol.43, no.24, pp. 4745-4752, August 2004.
- (38) 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. Applied Physics*, vol.43, no.10, pp. 7045-7049, Oct. 2004.
- (39) J.-K. Seo and T. Mizumoto, “Nonlinear optical properties in GaInAsP/InP waveguides below the bandgap wavelength,” *Jpn. J. Applied Physics*, vol.45, no.4A, pp.2612-2617, April 2006.
- (40) Y. Shoji and T. Mizumoto, “Wideband design of nonreciprocal phase shift optical isolators using phase adjustment in Mach-Zehnder interferometers,” *Applied Optics*, vol.45, no.27, pp.7144-7150, Sept. 2006.
- (41) Y. Shoji and T. Mizumoto, “Ultra-wideband design of waveguide magneto-optical isolator operating in 1.31 $\mu$ m and 1.55 $\mu$ m band,” *Optics Express*, vol.15, pp.639-645, Jan. 2007.
- (42) Yosia, Y. Akano, K. Tamura, T. Mizumoto and S. Ping, “All-optical transistor operation based on the bistability principle in nonlinear distributed feedback GaInAsP-InP waveguide: a transient perspective,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol.24, no.7, pp.1584-1588, July 2007.

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

- (1) T. Mizumoto and H. Yokoi, "Waveguide optical isolators fabricated by wafer bonding," Material Research Society Symposium Proceedings, vol. 834, pp. 135-146, 2005.

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

- ① 招待講演 (国内会議 3 件、国際会議 12 件)

【荒井チーム】

- (1) S. Arai, T. Okamoto, Y. Onodera, T. Yamazaki and S. Tamura, "Low Threshold GaInAsP/InP Membrane BH-DFB Lasers," (Invited), *The 8th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2003)*, Shanghai, Oct. 2003.
- (2) S. Arai, H.-C. Kim and H. Kanjo, "1.5 $\mu$ m-wavelength single mode semiconductor lasers with deeply etched vertical grating," (Invited), *Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2004)*, CWC3, p. 118, San Francisco, Cal. (USA), May 2004.
- (3) 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," (Invited), *Photonics WEST Optoelectronics 2005*, 5738-36, San Jose, Cal. (USA), Jan. 2005.
- (4) 丸山武男、奥村忠嗣、荒井滋久, "(招待講演) シリコン上レーザ実現への展望," 2007年電子情報通信学会ソサイアティ大会, CK1-8, 鳥取, Sep. 10, 2007.

【水本チーム】

- (5) T. Mizumoto, "Integration of a waveguide isolator with a semiconductor laser," (Invited), 2003 Integrated Photonics Research Topical Meeting (IPR 2003), Washington DC, IWB1, pp.238-240, June 18, 2003.
- (6) T. Mizumoto, "Waveguide optical isolator integratable to LDs and SOAs," (Invited), *Optical Fiber Communication Conference 2004 (OFC2004)*, Los Angeles, TuE5, Feb. 25, 2004
- (7) J.-S. Yan, H. Yokoi and T. Mizumoto, "Novel design of multi-mode interference Mach Zehnder interferometric integrated optical isolator with unidirectional magnetic field," (Invited), *9th International Conference on Ferrite (ICF-9)*, ICF9-EB-1-2004, pp. 45-46, San Francisco, Cal. (USA), August 25, 2004.
- (8) T. Mizumoto and H. Yokoi, "Waveguide optical isolators fabricated by wafer bonding," (Invited), *2004 MRS Fall Meeting*, Symposium J, J4-3, Boston, MA (USA), Dec. 1. 2004.
- (9) T. Mizumoto, J. -K. Seo, S. Arai and Y. Nakano, "All optical switching in GaInAsP/nP DFB waveguides," (Invited), *Integrated Photonics Research and Applications (IPRA-2005)*, ICM6, San Diego (USA), Apr. 11, 2005.
- (10) 水本哲弥, "光機能デバイスのための異種結晶集積化," (招待講演), 電子情報通信学会 集積光デバイス技術研究会, IPD05-22, 愛媛, Feb. 2, 2006.
- (11) T. Mizumoto, K. Sakurai, Y. Shoji and H. Saito, "Waveguide optical isolator integratable to photonic devices," (Invited), *Integrated Photonics Research and Applications Topical Meeting (IPRA-2006)*, ITuG1, Uncasville (USA), Apr. 25, 2006.
- (12) T. Mizumoto, K. Sakurai, Y. Shoji and H. Saito, "Integration of optical isolators and semiconductor lasers by wafer bonding," (Invited), *Asia Pacific Optical Communications (APOC2006)*, 6352-90, Gwangju (Korea), Sept. 7, 2006.
- (13) T. Mizumoto, "Wafer bonding of magneto-optic garnet and its application to integrated

optical devices,” (Invited), *The 210th Meeting of Electrochemical Society, Third International Symposium on Integrated Optoelectronics*, 1258, Cancun (Mexico), Oct. 31, 2006.

- (14) 水本哲弥, “異種結晶接合による光アイソレータと LD 集積化,” (招待講演), レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会, F18aVI, 宮崎, Jan. 18, 2007.
- (15) T. Mizumoto, Y. Akano, K. Tamura and M. Yoshimura, “DFB waveguide all-optical switching devices employing pump-induced refractive index change in GaInAsP,” (Invited), *International Conference on Materials for Advanced Technologies 2007 (ICMAT 2007)*, Symposium-D, Singapore, DA-2-IN4, July 2, 2007.

② 口頭発表 (国際会議 61 件、国内会議 90 件)

【荒井チーム】

- (1) T. Okamoto, Y. Onodera, T. Yamazaki, S. Tamura and S. Arai, “Membrane Distributed Feedback Lasers for Ultra Low Threshold Current Operation,” *The 9th Int. Symposium on Quantum Effect Electronics*, pp. 58-61, Tokyo (Japan), Nov. 2002.
- (2) H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, “RT-CW Operation of GaInAsP/InP Quantum-Wire Lasers Fabricated by Dry Etching and Regrowth Method,” *Sixth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2003)*, PDP-1, pp. 1 (PD), Tokyo (Japan), Jan. 2003.
- (3) K. Ohira, T. Murayama, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, “New Type Distributed Reflector Laser with Passive DBR Section By Using Lateral Confinement Effect,” *Sixth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT2003)*, PDP-3, pp. 3(PD), Tokyo (Japan), Jan. 2003.
- (4) K. Ohira, T. Murayama, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, “Distributed Reflector Lasers Integrated with Passive Grating Region By Using Lateral Quantum Confinement Effect,” *The 15th Indium Phosphide and Related Materials Conf. (IPRM2003)*, Santa Barbara (USA), WB1.5, pp. 251-254, May 2003.
- (5) H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, “Over 2,000 Hours of RT-CW Operation of GaInAsP/InP Vertically-Stacked Multiple-Quantum-Wire Laser,” *The 15th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2003)*, Santa Barbara, Cal. (USA), ThA2.5, pp. 378-379, May 2003.
- (6) T. Okamoto, Y. Onodera, T. Yamazaki, S. Tamura and S. Arai, “Low Threshold Membrane BH-DFB Laser Arrays for 1490-1565nm Wavelength Range,” *15th Indium Phosphide and Related Materials Conf. (IPRM2003)*, Santa Barbara, FA2.5, pp. 558-561, May, 2003.
- (7) A. Haque, T. Maruyama, H. Yagi, T. Sano and S. Arai, “In-Plane Polarization Dependence of Gain in Strained Quantum-Wire Lasers with Strain-Compensating Barriers,” *The IEEE/LEOS International Conference on Numerical Simulation of Semiconductor Optoelectronic Devices (NUSOD-03)*, Tokyo (Japan), MA3, pp. 7-8, Oct. 2003.
- (8) T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, “Polarization Anisotropy in Strained Quantum-Wire Structures Considering The Strain Relaxation Effect,” *The 16th Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS2003)*, Tucson (USA), MD5, pp. 43-44, Oct. 2003.
- (9) K. Ohira, T. Murayama, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, “A Novel Distributed Reflector Laser Consisting of Width Modulated Wires in Active DFB and Passive DBR Sections,” *The 16th Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS2003)*, Tucson (USA), TuD5, pp. 204-205, Oct. 2003.

- (10) T. Okamoto, T. Yamazaki, S. Sakamoto, S. Tamura and S. Arai, "Low Threshold Operation of Optically Pumped Membrane BH-DFB Laser Arrays with a Wide Wavelength Range," *The 16th Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS2003)*, WT 2, pp. 636-637, Tucson (USA), Oct. 2003.
- (11) S. Arai, H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, T. Maruyama, A. Haque, D. Plumwongrot, and S. Tamura, "GaInAsP/InP Long Wavelength Quantum-Wire Lasers," *Pre-Conference of IEEE International Semiconductor Laser Conference 2004 IEICE LQE/OPE Technical Meeting*, Kobe (Japan), 20-B, pp.33-36, Dec. 2003.
- (12) S. Arai, "Photonics Nanodevice Integration Engineering in Tokyo Tech", *2004 RCIQE International Seminar for 21st Century COE Program: "Quantum Nanoelectronics for Meme-Media-Based Information Technologies (II)"*, Sapporo (Japan), Feb. 2004.
- (13) H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, D. Plumwongrot, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, "Reliable RT-CW operation of GaInAsP/InP multiple-quantum-wire lasers fabricated by dry etching and regrowth method," *Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2004)*, CThL4, pp. 138, San Francisco, Cal. (USA), May 2004.
- (14) H. Yagi, T. Sano, K. Ohira, K. Miura, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, "GaInAsP/InP Multiple-Quantum-Wire Lasers with Narrow (14 nm) Quantum-Wire Structure," *The 16th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2004)*, TuA3-4, pp. 100-103, Kagoshima (Japan), May/June. 2004.
- (15) T. Okamoto, T. Yamazaki, S. Sakamoto, S. Tamura and S. Arai, "Short Cavity Membrane BH-DFB Laser with  $\lambda/4$  Phase Shift", *The 16th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2004)*, WA-3-3, pp. 519-522, Kagoshima (Japan), May 2004.
- (16) K. Ohira, T. Murayama, M. Hirose, H. Yagi, S. Tamura, A. Haque and S. Arai, "Low-Threshold and High Efficiency Distributed Reflector Laser with Wirelike Active Regions and Quantum-Wire DBR," *The 16th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2004)*, WA4-6, pp. 562-563, Kagoshima (Japan), May/June. 2004.
- (17) H. Yagi, T. Sano, K. Miura, T. Maruyama, A. Haque and S. Arai, "1.5  $\mu\text{m}$  Wavelength GaInAsP/InP Multiple-Quantum-Wire Lasers with SiO<sub>2</sub>/Semiconductor Reflector," *The 9th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2004)*, 14E1-4, pp. 522-523, Yokohama (Japan), Jul. 2004.
- (18) T. Okamoto, T. Yamazaki, S. Sakamoto, S. Tamura and S. Arai, "Improved Temperature Insensitivity of Membrane BH-DFB Laser with Polymer Cladding Layers", *The 9th Optoelectronics and Communication Conference (OECC2004)*, 14E2-3, pp. 528-529, Yokohama(Japan), July 2004.
- (19) T. Okamoto, T. Yamazaki, S. Sakamoto, S. Tamura and S. Arai, "Multiple-Wavelengths Low-Threshold Membrane BH-DFB Laser Arrays", *The 19th IEEE International Semiconductor Laser Conference(ISLC2004)*, WC1, pp. 20-21, Shimane(Japan), Sept. 2004.
- (20) K. Ohira, T. Murayama, M. Hirose, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, "Low-Threshold Operation of Distributed Reflector Laser with Width Modulated Wirelike Active Regions," *The 19th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC2004)*, FB5, pp. 133-134, Shimane (Japan), Sep. 2004.
- (21) T. Maruyama, D. Plumwongrot, H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto and S. Arai, "Polarization anisotropic characteristics of GaInAsP/InP quantum-wire lasers - threshold current and gain spectrum-" *The 17th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2005)*, ThA-1-2, Glasgow (UK), May 2005.

- (22) H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama, and S. Arai, “GaInAsP/InP distributed-feedback lasers consisting of strain-compensated quantum-wire active regions,” *The 10th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2005)*, 5F1-4, Seoul (Korea), Jul. 2005.
- (23) H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, T. Maruyama and S. Arai, “Low threshold current density operation of GaInAsP/InP DFB lasers consisting of quantum-wire active regions,” *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO-PR/IQEC 2005)*, CTuJ1-4, pp. 61, Tokyo (Japan), Jul. 2005.
- (24) S. Sakamoto, T. Okamoto, T. Yamazaki, H. Kawashima, J. -L. Tang, S. Tamura and S. Arai, “Narrow stripe membrane BH-DFB lasers for lateral mode control,” *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO-PR/IQEC 2005)*, CTuJ4-6, pp. 429, Tokyo (Japan), Jul. 2005.
- (25) D. Plumwongrot, T. Maruyama, A. Haque, H. Yagi, K. Miura, Y. Nishimoto and S. Arai, “In-plane spontaneous emission anisotropy in GaInAsP/InP strain-compensated quantum-wire structures,” *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO-PR/IQEC 2005)*, JWAB3-P8, pp. 790, Tokyo (Japan), Jul. 2005.
- (26) Y. Nishimoto, K. Miura, H. Yagi, D. Plumwongrot, K. Ohira, T. Maruyama, and S. Arai: “High T<sub>0</sub> operation of 1590 nm GaInAsP/InP quantum-wire DFB lasers by Bragg wavelength detuning,” *The 18th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2006)*, Princeton (USA), TuA1-5, May 2006.
- (27) S. Sakamoto, H. Kawashima, H. Naitoh, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai: “Narrow stripe membrane BH-DFB lasers with surface corrugation for stable single-mode operation,” *The 18th Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2006)*, Princeton (USA), TuA1-7, May 2006.
- (28) S. Sakamoto, H. Kawashima, H. Naitoh, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai: “Low Threshold Membrane BH-DFB Lasers Using Surface Corrugation Structure”, *The 11th International Conference on Optical Electrical Communication Conference (OECC2006)*, Kaohsiung (Taiwan), 5E1-3, Jul. 2006.
- (29) T. Maruyama, T. Okumura, S. Sakamoto, K. Miura, Y. Nishimoto and S. Arai: “GaInAsP/InP long-wavelength membrane BH-DFB lasers directly bonded on SOI Substrate,” *The 11th International Conference on Optical Electrical Communication Conference (OECC2006)*, Kaohsiung (Taiwan), 5E1-4, Jul. 2006.
- (30) S. Sakamoto, H. Naitoh, H. Kawashima, M. Ohtake, S. Tamura, T. Maruyama N. Nishiyama and S. Arai: “85 °C continuous wave operation of membrane BH-DFB Laser cladded by benzocyclobutene,” *10th Int. Symp. On Contemporary Photonics Technology (CPT 2007)*, Tokyo (Japan), G-6, Jan. 2007.
- (31) T. Okumura, T. Maruyama, M. Kanemaru, S. Sakamoto, S. Tamura, S. Arai, “Fundamental-mode Operation of GaInAsP/InP Membrane DFB Lasers Bonded on SOI Substrate and Its Waveguide Integration,” *The 19th Indium Phosphide and Related Material (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), TuB2-2, May 2007.
- (32) R. Suemitsu, S. M. Ullah, S. Lee, M. Otake, N. Nishiyama, S. Arai, “Integration of Front Power Monitor with Distributed Reflector Laser through Deep Etched Narrow Groove Isolation,” *The 19th Indium Phosphide and Related Material (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), TuB2-5, May 2007.
- (33) H. Naitoh, S. Sakamoto, M. Ohtake, T. Okumura, T. Maruyama, N. Nishiyama and S. Arai, “80 °C CW Operation of GaInAsP/InP Membrane BH-DFB Laser With Air-Bridge Structure,” *The 19th Indium Phosphide and Related Material (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), ThB1-2, May 2007.



- (34) S. M. Ullah, R. Suemitsu, S. Lee, N. Nishiyama, S. Arai “Sub milliampere Operation of 1540nm Wavelength Distributed Reflector Laser with Wirelike Active Regions,” *The 19th Indium Phosphide and Related Material (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), ThB2-1, May 2007.
- (35) Y. Nishimoto, D. Plumwongrot, S. Ullah, Y. Tamura, M. Kurokawa, T. Maruyama, N. Nishiyama, S. Arai “Improved Temperature Dependences of GaInAsP/InP DFB Lasers with Wirelike Active Regions by Bragg Wavelength Detuning,” *The 19th Indium Phosphide and Related Material (IPRM 2007)*, Matsue (Japan), ThB2-3, May 2007.
- (36) H. Itoh, M. Yoshita, H. Akiyama, D. Plumwongrot, T. Maruyama, S. Arai, “Photoluminescence of GaInAsP/InP Single Quantum Wires with Lateral Widths down to 6 nm Fabricated by Dry Etching and Regrowth,” *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007)*, Baltimore (USA), CThGG3, May 2007.
- (37) T. Maruyama, T. Okumura, M. Kanemaru, S. Sakamoto, S. Tamura and S. Arai: “GaInAsP/InP Membrane DFB Lasers Directly Boded on SOI Substrate with Rib-waveguide Structure,” *The 11th International Conference on Optical Electrical Communication Conference (OECC2007)*, Yokohama (Japan), 12D1-3, Jul. 2007.

【水本チーム】

- (38) J.-K. Seo, T. Mizumoto, M. Takenaka and Y. Nakano, “Measurement of intensity-dependent refractive index change using a loop mirror interferometer,” *Sixth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2003)*, PDP-2, p.2 (PD), Tokyo (Japan), Jan. 15, 2003.
- (39) S.-H. Jeong and T. Mizumoto, “GaInAsP/InP waveguide all-optical gate switch and its application to wavelength converter,” *The 9th Int. Symposium on Quantum Effect Electronics*, pp. 54-57, Tokyo (Japan), Nov. 20, 2002.
- (40) K. Sakurai, H. Yokoi and T. Mizumoto, “Demonstration of optical isolator with  $\text{CeY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  guiding layer employing nonreciprocal phase shift,” *the 8th Optoelectronics and Communication Conference (OECC2003)*, Shanghai, 15B4-4, vol.1, pp. 169-170, Oct. 15, 2003.
- (41) T. Sakai, Y. Shoji, H. Yokoi and T. Mizumoto, “Enhancement of magneto-optic effect in optical isolator with semiconductor guiding layer by selective oxidation of AlInAs,” *the 8th Optoelectronics and Communication Conference (OECC2003)*, Shanghai, 15E4-3, vol.1- pp. 179-180, Oct. 15, 2003
- (42) K. Sakurai, H. Yokoi and T. Mizumoto, “Interferometric isolator with  $\text{CeY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  guiding layer employing nonreciprocal phase shift,” *the 9th Microoptics Conference (MOC'03)*, Tokyo, C-4, pp. 48-51, Oct. 29, 2003.
- (43) J.-K. Seo, S.-H. Jeong, T. Mizumoto, M. Takenaka and Y. Nakano, “Measurement of nonlinear response of GaInAsP DFB waveguide using a pump-probe method,” *7th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2004)*, Tokyo, F-4, pp. 127-128, Jan. 16, 2004.
- (44) H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin and T. Mizumoto, “Interferometric optical isolator with distinct layer structures employing nonreciprocal phase shift,” *7th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2004)*, Tokyo, P-11, pp. 87-88, Jan.15, 2004.
- (45) Y. Shoji, H. Yokoi, and T. Mizumoto, “Ultracompact optical isolator with a silicon high index contrast waveguide,” *Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2004)*, CThT7, San Francisco, Cal. (USA), May 20, 2004.

- (46) J.-K. Seo and T. Mizumoto, "Measurement of nonlinear index changes in an InGaAsP/InP waveguide using an optical loop mirror interferometer," *Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2004)*, CThJ5, San Francisco, Cal. (USA), May 20, 2004.
- (47) H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin and T. Mizumoto, "Demonstration of interferometric optical isolator operated under unidirectional magnetic field," *9th Optoelectronics and Communication Conference (OECC 2004)*, 13P-126, pp. 362-363, Yokohama (Japan), July 13, 2004.
- (48) H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin and T. Mizumoto, "Demonstration of optical isolator employing nonreciprocal phase shift operated under unidirectional magnetic field," *the 10th Microoptics Conference (MOC'04)*, L-16, p. 93, Jena (Germany), Sept. 3, 2004.
- (49) H. Yokoi, Y. Shoji and T. Mizumoto, "Feasibility of optical isolator with Si guiding layer employing nonreciprocal phase shift," *the 10th Microoptics Conference (MOC'04)*, L-17, p. 94, Jena (Germany), Sept. 3, 2004.
- (50) K. Sakurai, H. Yokoi, T. Mizumoto, D. Miyashita and Y. Nakano, "Fabrication of laterally-coupled distributed feedback laser for integration with optical isolator," *the 10th Microoptics Conference (MOC'04)*, L-45, p. 108, Jena (Germany), Sept. 3, 2004.
- (51) J.-K. Seo, T. Ishii, T. Mizumoto, H. Yagi, D. Plumwongrot and S. Arai, "Intensity-dependent refractive index changes below bandgap in quantum well and quantum wire GaInAsP waveguides," *the 10th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2005)*, 8E1-1, pp.836-837, Seoul, July 8, 2005.
- (52) Y. Shoji and T. Mizumoto, "Fabrication of ultracompact optical isolator with Si-photon wire waveguides," *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference (CLEO-PR/IQEC 2005)*, CTuK1-2, pp.67-68, Tokyo, July 12, 2005.
- (53) T. Mizumoto, J.-K. Seo and N. Tanaka, "All-Optical Inverting Response in a GaInAsP/InP DFB Waveguide," *2005 IEEE LEOS annual meeting*, ML-6, pp.131-132, Sydney, Oct. 24, 2005.
- (54) Y. Shoji, H. Yokoi and T. Mizumoto, "Mach-Zehnder interferometer with Si wire waveguides for ultra-compact optical isolator," *the 11th Microoptics Conference (MOC'05)*, D1, pp.52-53, Tokyo, Oct. 31, 2005.
- (55) J.-K. Seo, T. Ishii, T. Mizumoto, H. Yagi, D. Plumwongrot and S. Arai, "Comparison of intensity-dependent index change below the bandgap wavelength among bulk, quantum well and quantum wire incorporated GaInAsP waveguides," *the 11th Microoptics Conference (MOC'05)*, K6, pp.278-279, Tokyo, Nov. 1, 2005.
- (56) T. Mizumoto, H. Saito and Y. Shoji, "Semi-leaky optical isolator fabricated by surface activation wafer bonding," *the 11th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2006)*, 5B4-1, Kaoshung (Taiwan), July 5, 2006.
- (57) Y. Shoji and T. Mizumoto, "Novel design of nonreciprocal phase shift optical isolators for wideband operation," *the 11th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2006)*, 5B4-5, Kaoshung (Taiwan), July 5, 2006.
- (58) Y. Yazaki, Y. Shoji and T. Mizumoto, "Demonstration of interferometric waveguide optical isolator with a unidirectional magnetic field," *the 12th Microoptics Conference (MOC'06)*, C-5, pp.66-67, Seoul (Korea), Sept. 11, 2006.
- (59) Y. Shoji and T. Mizumoto, "Novel polarization-independent waveguide optical isolator employing nonreciprocal phase shift," *the 12th Microoptics Conference (MOC'06)*, D-5, pp.82-83, Seoul (Korea), Sept. 12, 2006.
- (60) Y. Shoji and T. Mizumoto, "Wideband operation of magneto-optical isolator with phase

adjusted Mach-Zehnder interferometer,” 2006 IEEE LEOS Annual Meeting, ThV2, Montreal (Canada), Nov. 1, 2006.

- (61) T. Mizumoto, J.-K. Seo, K. Tamura and Y. Akano, “All-optical switching in a GaInAsP DFB waveguide,” *International Conference on Computer and Devices for Communication (CODEC-06)*, OLT-27, p.187, Kolkata (India), Dec.20, 2006.

#### 【荒井チーム】

- (1) 八木英樹、佐野琢哉、大平和哉、丸山武男、アニスル・ハク、田村茂雄、荒井滋久; GaInAsP/InP 歪補償多層量子細線レーザの室温連続発振: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28a-YF-4, pp. 1233, 神奈川, Mar. 2003.
- (2) 勘定寛、金孝昶、田村茂雄、荒井滋久; 垂直回折格子を有する分布反射型(VG-DR)レーザの端面位相制御: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZQ-13, p. 1240, 神奈川, Mar. 2003.
- (3) 大平和哉、村山智則、八木英樹、田村茂雄、荒井滋久; 横方向量子閉じ込め効果を用いた受動領域を有する分布反射型(DR)レーザ: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZQ-14, p. 1240, 神奈川, Mar. 2003.
- (4) 岡本健志、小野寺祐一、山崎達也、田村茂雄、荒井滋久; 半導体薄膜BH-DFBレーザの波長制御性: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZQ-16, 神奈川, p. 1241, Mar. 2003.
- (5) 岡本健志、小野寺祐一、山崎達也、田村茂雄、荒井滋久; 半導体薄膜BH-DFB多波長レーザアレイの試作: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZQ-17, p. 1241, 神奈川, Mar. 2003.
- (6) アニスル・ハク、八木英樹、佐野琢哉、丸山武男、荒井滋久;  $8 \times 8$ 行列k-p法による歪補償量子細線のバンド構造解析: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZE-14, p. 1466, 神奈川, Mar. 2003.
- (7) 丸山武男、アニスル・ハク、佐野琢哉、八木英樹、荒井滋久; 歪量子細線構造における偏光依存性の解析: 第50回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZE-15, p. 1466, 神奈川, Mar. 2003.
- (8) 岡本健志、小野寺祐一、山崎達也、田村茂雄、荒井滋久; 半導体薄膜BH-DFBレーザアレイに関する研究: 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会 OPE2003-30/LQE2003-24, pp.35-38, 東京, July 2003.
- (9) 八木英樹、佐野琢哉、大平和哉、丸山武男、アニスル・ハク、荒井滋久; ドライエッチングと再成長法によるGaInAsP/InP歪補償多層量子細線レーザの室温連続発振: 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会 OPE2003-31/LQE2003-25, pp.39-42, 東京, Jul. 2003.
- (10) 丸山武男、アニスル・ハク、荒井滋久; 歪量子細線構造のバンド構造と偏光異方性解析: 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会 OPE2003-32/LQE2003-26, pp.43-46, 東京, Jul. 2003.
- (11) 村山智則、大平和哉、八木英樹、田村茂雄、荒井滋久; 横方向量子閉じ込め効果を用いた高反射率DBRの反射率特性評価: 第64回応用物理学会学術講演会, 30p-YB-3, p.1039, 福岡, Aug. 2003.
- (12) 大平和哉、村山智則、八木英樹、田村茂雄、荒井滋久; 活性領域と受動DBR領域を集積した分布反射型(DR)レーザの低しきい値動作: 第64回応用物理学会学術講演会

- 演会, 30p-YB-4, p.1039, 福岡, Aug. 2003.
- (13) 勘定寛、金孝昶、田村茂雄、荒井滋久; 端面位相制御型垂直回折格子を有する分布反射型(VG-DR)レーザの試作: 第64回応用物理学会学術講演会, 30p-YB-7, p. 1040, 福岡, Aug. 2003.
  - (14) 金孝昶、勘定寛、田村茂雄、荒井滋久; 垂直回折格子と引っ張り歪み量子井戸を有する分布帰還形(VG-DFB)レーザ: 第64回応用物理学会学術講演会, 30p-YB-8, p. 1040, 福岡, Aug. 2003.
  - (15) 八木英樹、佐野琢哉、タノーム・ブルームウォンロート、大平和哉、丸山武男、アニスル・ハク、荒井滋久; GaInAsP/InP 歪補償多層量子細線レーザの室温連続動作寿命: 第64回応用物理学会学術講演会, 30p-YB-10, p. 1041, 福岡, Aug. 2003.
  - (16) 岡本健志、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: 第64回応用物理学会学術講演会, 30p-YB-11, p. 1041, 福岡, Aug. 2003.
  - (17) 山崎達也、岡本健志、田村茂雄、荒井滋久; 半導体薄膜BH-DFBレーザアレイの低しきい値動作: 第64回応用物理学会学術講演会, 30p-YB-12, p. 1042, 福岡, Aug. 2003.
  - (18) アニスル・ハク、丸山武男、八木英樹、佐野琢哉、荒井滋久; 歪補償障壁層を有する歪量子細線レーザの光利得の偏光異方性: 第64回応用物理学会学術講演会, 30a-ZF-11, p. 1249, 福岡, Aug. 2003.
  - (19) 村山智則、大平和哉、広瀬誠人、八木英樹、田村茂雄、荒井滋久; 細線状活性層を用いた分布反射型(DR)レーザの低しきい値動作: 第51回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZZ-2, p. 1259, 東京, Mar. 2004.
  - (20) 岡本健志、山崎達也、阪本真一、田村茂雄、荒井滋久; 誘電体クラッドを用いた半導体薄膜BH-DFBレーザにおけるアサーマル効果の観測: 第51回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZZ-5, p. 1260, 東京, Mar. 2004.
  - (21) 山崎達也、岡本健志、阪本真一、田村茂雄、荒井滋久; 一括励起半導体薄膜BH-DFB多波長レーザアレイの試作: 第51回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZZ-6, p. 1260, 東京, Mar. 2004.
  - (22) 佐野琢哉、八木英樹、大平和哉、ブルームウォンロート・タノーム、丸山武男、ハク・アニスル、荒井滋久; 狭細線(14nm)構造を有するGaInAsP/InP歪補償5層量子細線レーザ: 第51回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZZ-4, p. 1270, 東京, Mar. 2004.
  - (23) 八木英樹、佐野琢哉、ブルームウォンロート・タノーム、三浦幸治、丸山武男、ハク・アニスル、荒井滋久; GaInAsP/InP歪補償多層量子細線レーザの再成長界面のTEM観測: 第51回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZZ-5, p. 1270, 東京, Mar. 2004.
  - (24) 三浦幸治、八木英樹、佐野琢哉、ブルームウォンロート・タノーム、丸山武男、ハク・アニスル、荒井滋久; SiO<sub>2</sub>/半導体反射鏡を有するGaInAsP/InP歪補償多層量子細線レーザ: 第51回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZZ-6, p. 1271, 東京, Mar. 2004.
  - (25) 八木英樹、佐野琢哉、ブルームウォンロート・タノーム、三浦幸治、大平和哉、丸山武男、ハク・アニスル、荒井滋久; CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>ドライエッチングと埋め込み再成長法によるGaInAsP/InP歪補償多層量子細線レーザ: 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会 OPE2004-18/LQE2004-16, pp.1-6, 東京, Jul. 2004.

- (26) 大平和哉、村山智則、広瀬誠人、八木英樹、田村茂雄、アニスル・ハク、荒井滋久；活性層分離型DFBと量子細線DBRを有する分布反射型レーザの低電流・高効率動作：電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会，OPE2004-19/LQE2004-17 (2004-07), pp. 7-10, 東京, Jul. 2004.
- (27) 岡本健志、山崎達也、阪本真一、田村茂雄、荒井滋久；誘電体クラッド半導体薄膜BH-DFBレーザ：電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会，OPE2004-20/LQE2004-18 (2004-07), pp. 11-14, 東京, Jul. 2004.
- (28) 大平和哉、村山智則、サイド・マムド・ウラ、八木英樹、田村茂雄、荒井滋久；量子細線活性層の横方向量子閉じ込めを用いた集積法とその光通信用レーザへの応用：第52回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZH-1, p. 1297, 埼玉, Mar. 2005.
- (29) 三浦幸治、八木英樹、西本頼史、プルームウォンロート・タノーム、大平和哉、丸山武男、荒井滋久；1540 nm波長帯GaInAsP/InP歪補償量子細線DFBレーザの室温連続動作：第52回応用物理学関係連合講演会, 29p-V-10, p. 1552, 埼玉, Mar. 2005.
- (30) プルームウォンロート・タノーム、丸山武男、八木英樹、三浦幸治、西本頼史、田村茂雄、荒井滋久；EB露光法による量子細線におけるサイズ分布の研究：第52回応用物理学関係連合講演会, 30p-YW-11, p. 829, 埼玉, Mar. 2005.
- (31) 八木英樹、三浦幸治、西本頼史、プルームウォンロート・タノーム、大平和哉、丸山武男、荒井滋久；GaInAsP/InP歪補償量子細線DFBレーザの低しきい値電流動作：第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZH-1, p. 1304, 埼玉, Mar. 2005.
- (32) 村山智則、大平和哉、サイド・マムド・ウラ、八木英樹、田村茂雄、荒井滋久；位相シフトDFB領域と量子細線DBR領域を集積した分布反射型(DR)レーザの低しきい値動作：第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZH-2, p. 1304, 埼玉, Mar. 2005.
- (33) 阪本真一、岡本健志、山崎達也、川島宏幸、湯京龍、田村茂雄、荒井滋久；凹凸形状回折格子を用いた半導体薄膜BH-DFBレーザアレイ：第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZH-5, p. 1305, 埼玉, Mar. 2005.
- (34) 川島宏幸、阪本真一、岡本健志、山崎達也、湯京龍、田村茂雄、荒井滋久；狭ストライプ半導体薄膜BH-DFBレーザの横モード制御：第52回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZH-6, p. 1306, 埼玉, Mar. 2005.
- (35) 丸山武男、タノーム・プルームウォンロート、八木英樹、三浦幸治、西本頼史、荒井滋久；GaInAsP/InP歪量子細線レーザの利得異方性：電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2005-17/LQE2005-16 (2005-06), pp.15-18, 東京, Jun. 2005.
- (36) 八木英樹、三浦幸治、西本頼史、タノーム・プルームウォンロート、大平和哉、丸山武男、荒井滋久；1540nm 波長帯GaInAsP/InP 歪補償量子細線DFBレーザの低しきい値電流動作：電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会，OPE2005-18, LQE2005-17 (2005-06), pp. 19-22, 東京, Jun. 2005.
- (37) 三浦幸治、八木英樹、西本頼史、タノーム・プルームウォンロート、大平和哉、丸山武男、荒井滋久；低損傷界面を有するGaInAsP/InP歪補償量子細線DFBレーザ：第66回応用物理学学会学術講演会, 7p-ZN-14, 徳島, Jul. 2005.
- (38) タノーム・プルームウォンロート、丸山武男、アニスル・ハク、八木英樹、三浦幸治、西本頼史、荒井滋久；GaInAsP/InP 量子細線構造の偏光異方性：第66回応用物理学学会学術講演会, 9p-W-15, p. 1221, 徳島, Jul. 2005.
- (39) 丸山武男、タノーム・プルームウォンロート、八木英樹、三浦幸治、西本頼史、荒井滋久；GaInAsP/InP歪補償多層量子細線構造の利得異方性：第66回応用物理

学会学術講演会, 9p-W-16, p. 1221, 徳島, Jul. 2005.

- (40) 三浦幸治、タノーム・ブルームウォンロート、西本頼史、大平和哉、八木英樹、丸山武男、荒井滋久；GaInAsP/InP極微構造の低損傷形成による低電流歪補償量子細線DFBレーザ：電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, LQE2005-122 (2005-12), pp. 41-44, 東京, Dec. 2005.
- (41) 三浦幸治、西本頼史、タノーム・ブルームウォンロート、大平和哉、丸山武男、荒井滋久；歪補償単層量子井戸を用いたGaInAsP/InP量子細線DFBレーザ：第53回応用物理学関係連合講演会, 23a-ZN-2, p. 1227, 東京, Mar. 2006.
- (42) 阪本真一、内藤秀幸、田村茂雄、丸山武男、荒井滋久；凹凸形状回折格子を用いた半導体薄膜BH-DFBレーザ：電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, OPE2006-15/LQE2006-19, pp. 1-6, 東京, Jun. 2006.
- (43) 西本頼史、タノーム・ブルームウォンロート、丸山武男、荒井滋久；ブラッグ波長デチューニングによるGaInAsP/InP量子細線DFBレーザの特性温度の改善：電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, OPE2006-19/LQE2006-23, pp. 21-14, 東京, Jun. 2006.
- (44) プルームウォンロート・タノーム、伊藤弘毅、田村洋介、西本頼史、丸山武男、秋山英文、荒井滋久；GaInAsP/InP 単一量子細線構造のPL特性：第67回応用物理学学会学術講演会, 31a-RE-1, p. 1268, 滋賀, Aug. 2006.
- (45) 田村洋介、Dhanorm Plumwongrot、西本頼史、丸山武男、荒井滋久；GaInAsP/InP 任意形状低次元量子構造の作製：第67回応用物理学学会学術講演会, 31a-RC-6, p. 648, 滋賀, Aug. 2006.
- (46) 奥村忠嗣、丸山武男、阪本真一、西本頼史、荒井滋久；直接貼り付け法によるSOI基板上GaInAsP/InP半導体薄膜レーザ：電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2006-104, pp. 7-12, 東京, Dec. 2006.
- (47) サイド・マムド ウラ、末光涼、李承勲、大武誠人、西山伸彦、荒井滋久；Low threshold current DR laser with wirelike active regions and integration of EAM with high electrical isolation：電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2006-114, pp. 61-65, Dec. 2006.
- (48) 丸山武男、奥村忠嗣、金丸正樹、阪本真一、荒井滋久；SOI基板上導波路集積型BH-DFB半導体薄膜レーザ：電子情報通信学会シリコンフォトンクス研究会, SiPH2006-11, pp. 49-52, 東京, Jan. 2007.
- (49) プルームウォンロート・タノーム、田村洋介、西本頼史、黒川宗高、丸山武男、荒井滋久；Plasma Induced Material Composition Alteration in GaInAsP/InP Quantum-Well Structure：第54回応用物理学関係連合講演会, 27a-SM-9, p. 1483, 神奈川, Mar. 2007.
- (50) 丸山武男、奥村忠嗣、金丸正樹、阪本真一、荒井滋久；導波路集積型SOI基板上GaInAsP/InP薄膜DFBレーザ：第54回応用物理学関係連合講演会, 28a-SG-11, p. 1221, 神奈川, Mar. 2007.
- (51) 内藤秀幸、阪本真一、大竹守、奥村忠嗣、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久；エアブリッジ構造を用いたGaInAsP/InP半導体薄膜BH-DFBレーザ：第54回応用物理学関係連合講演会, 28p-SG-11, p. 1225, 神奈川, Mar. 2007.
- (52) ウラ・サイドマムド、末光涼、李承勲、西本頼史、大武誠人、西山伸彦、荒井滋久；細線状活性層の線幅変調による電界吸収変調器集積DRレーザ：第54回応用物

理学関係連合講演会, 28p-SG-14, p. 1226, 神奈川, Mar. 2007.

- (53) 末光涼、ウラ・サイドマムド、李承勲、西本頼史、大武誠人、西山伸彦、荒井滋久；深い極微溝による電氣的分離を利用したDRレーザ前端面へのパワーモニター  
の集積：第54回応用物理学関係連合講演会, 28p-SG-15, p. 1226, 神奈川, Mar. 2007.
- (54) 内藤秀幸、阪本真一、大竹守、奥村忠嗣、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久；エア  
ブリッジ構造を用いたGaInAsP/InP半導体薄膜BH-DFBレーザ：電子情報通信学会  
レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2007-21, pp. 19-22, Jun. 2007.
- (55) 奥村忠嗣、丸山武男、金丸正樹、荒井滋久；直接貼付法によるSOI基板上  
GaInAsP/InP-LED：第67回応用物理学学会学術講演会, 7a-C-13, p. 1160, 札幌, Sep.  
2007.
- (56) 黒川宗高、Dhanorm Plumwongrot、西本頼史、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久；2  
段階OMVPE成長GaInAsP/InP量子井戸レーザにおけるRIEプラズマ損傷とその低  
減：第67回応用物理学学会学術講演会, 7p-C-6, p. 1162, 札幌, Sep. 2007.

#### 【水本チーム】

- (57) 横井秀樹、櫻井一正、水本哲弥、大塚節文、中野義昭，“非相反移相効果を利用した  
TMモード動作光アイソレータにおける反射TEモード抑制,” 電子情報通信学会  
光通信システム/光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス合同研究会,  
電子情報通信学会技術報告書, vol.102, no.447, OPE2002-105, pp.47-51, 岡山, Nov.  
2002.
- (58) ジャリル・モハマド・アブドラ、水本哲弥、石川 弘、上塚尚登，“ループ形全光スイ  
ッチTOADの最適動作条件の検討,” 映像情報メディア学会無線・光伝送研究会, 映  
像情報メディア学会技術報告, vol.27, No.17, ROFT2003-40, pp.1-4, 甲府, March 1,  
2003.
- (59) 櫻井一正、横井秀樹、水本哲弥、宮下大輔、中野義昭，“光アイソレータ集積化のた  
めの半導体レーザ製作,” 2003年電子情報通信学会総合大会, C-4-12, p. 298, 仙台,  
March 19, 2003.
- (60) 徐 在國、水本哲弥、竹中 充、中野義昭，“ループ形干渉計を用いる光強度依存屈折  
率変化測定法の検討,” 2003年電子情報通信学会総合大会, C-3-35, p. 175, 仙台,  
March 21, 2003.
- (61) 櫻井一正、横井秀樹、水本、宮下大輔、中野義昭，“光アイソレータとの集積化を目  
指したファブリペローレーザの製作,” 第50回応用物理学関係連合講演会,  
28p-ZQ-8, p. 1238, 神奈川, March 28, 2003.
- (62) 徐、水本、竹中、中野，“ループ形干渉計を用いる非線形屈折率変化測定法の検討,”  
2003年春季第50回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZK-18, p. 1283, March 29, 2003.
- (63) 徐、鄭、水本、竹中、中野，“水本哲弥ポンプ・プローブ法を用いたGaInAsP  
DFB 導波路における非線形応答測定,” 2003年電子情報通信学会エレクトロニク  
スソサイエティ大会, C-4-18, p.294, Sept. 25, 2003.
- (64) J.-K. Seo, T. Mizumoto, M. Takenaka and Y. Nakano, “全光スイッチング素子を目的と  
したGaInAsPの光強度依存吸収変化/屈折率変化の測定,” Technical Report of IEICE,  
OCS2003-78 (2003-10), pp. 53-57, 甲府, Oct. 2, 2003.
- (65) H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin and T. Mizumoto, “一方向外部磁界で動作する非相反移相  
効果を利用した光アイソレータ,” Technical Report of IEICE, OPE2003-152 (2003-11),



- pp. 49-53, 福岡, Nov., 2003.
- (66) J.-K. Seo, T. Mizumoto, M. Takenaka and Y. Nakano, “GaInAsP-DFB導波路の光強度依存吸収変化とその時間応答特性の測定,” Technical Report of IEICE, OPE2003-257 (2004-01), pp. 69-74, 松山, Jan. 29, 2004.
- (67) H. Yokoi, Y. Shoji and T. Mizumoto, “Si導波層を有する光非相反素子,” Technical Report of IEICE, OPE2003-273 (2004-02), pp. 17-22, 東京, Feb., 2004.
- (68) H. Yokoi, Y. Shoji, E. Shin and T. Mizumoto, “異なる層構造を有する干渉計を利用した非相反移相形光アイソレータ,” 第51回応用物理学関係連合講演会, 28p-N-4, p. 1291, 東京, Mar. 28, 2004.
- (69) J.-K. Seo and T. Mizumoto, “ループ形干渉計によるGaInAsP/InP導波路の光強度依存屈折率変化測定,” 第51回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZK-5, p. 1318, 東京, Mar. 31, 2004.
- (70) 横井秀樹, 庄司雄哉, 瀧 悦, 水本哲弥, “一方向外部磁界で動作する干渉形光アイソレータの動作実証,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2004-168, pp. 51-56, 博多, Nov. 2004.
- (71) 齋藤日出紀, 櫻井一正, 水本哲弥, “プラズマ処理を用いたCe:YIG/InPおよびCe:YIG/Siダイレクトボンディング,” 第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZQ-6, p. 1339, 埼玉, Mar. 31, 2005.
- (72) 櫻井一正, 齋藤日出紀, 武井亮平, 水本哲弥, “ダイレクトボンディングにおけるO<sub>2</sub>プラズマ表面処理の光導波路への影響,” 第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZQ-7, p. 1339, 埼玉, Mar. 31, 2005.
- (73) 小野雅紀, 水本哲弥, “導波路型光アイソレータ用SmCo薄膜磁石の製作,” 第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZQ-9, p. 1340, 埼玉, Mar. 31, 2005.
- (74) 徐 在國, 水本哲弥, “GaInAsP( $\lambda_g=1390\text{nm}$ )/InP導波路における光強度依存屈折率変化の測定,” 第52回応用物理学関係連合講演会, 1a-ZQ-12, p. 1352, 埼玉, April 1, 2005.
- (75) 徐在國, 水本哲弥, 八木英樹, Dhanorm Plumwongrot, 荒井滋久, “量子薄膜・量子細線を導入したGaInAsP/InP導波路の光強度依存屈折率変化測定,” 2005年秋季第66回応用物理学学会講演会, 8a-T-25, p. 1037, 徳島, Sept. 8, 2005.
- (76) 庄司雄哉, 横井秀樹, 水本哲弥, “超小型光アイソレータのためのSi細線導波路マッハ・ツェンダー干渉計の製作,” 2005年秋季第66回応用物理学学会講演会, 8a-T-30, p. 1039, 徳島, Sept. 8, 2005.
- (77) 田家実, 庄司雄哉, 水本哲弥, “シリコン細線導波路によるTE-カット偏光子,” 2005年秋季第66回応用物理学学会講演会, 8a-T-31, p. 1039, 徳島, Sept. 8, 2005.
- (78) 櫻井一正, 齋藤日出紀, 武井亮平, 水本哲弥, “ダイレクトボンディングにおけるO<sub>2</sub>プラズマ表面処理の非相反移相型光アイソレータの光導波特性への影響,” 2005年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-71, p.215, 札幌, Sept. 20, 2005.
- (79) 田家実, 庄司雄哉, 水本哲弥, “シリコン細線導波路を用いたTEモード遮断偏光子,” 2005年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-76, p.220, 札幌, Sept. 20, 2005.
- (80) 庄司雄哉, 横井秀樹, 水本哲弥, “Si細線導波路を用いた超小型光アイソレータのためのマッハ・ツェンダー干渉計の製作と表面活性化処理接合の検討,” 2005年電子

- 情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, CS-8-9, p.S85-86, 札幌, Sept. 22, 2005.
- (81) 庄司雄哉, 水本哲弥, “非対称マッハツェンダー干渉計を用いた非相反移相型光アイソレータの広帯域化,” 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 電子情報通信学会技術報告書, vol.105, OPE2005-114, pp.21-26, 神戸, Jan. 31, 2006.
- (82) 徐在國, 水本哲弥, “GaInAsP(バンドギャップ波長1200~1400nm)導波路の光強度依存屈折率変化測定,” 2006年春季第53回応用物理学関係連合講演会, 22a-Y-7, p. 1241, 東京, Mar. 22, 2006.
- (83) 庄司雄哉, 横井秀樹, 水本哲弥, “TMモード非相反移相効果を用いた偏波無依存型光アイソレータの提案,” 2006年春季第53回応用物理学関係連合講演会, 25p-W-1, p. 1252, 東京, Mar. 25, 2006.
- (84) 矢崎, 庄司, 水本, “一方向磁界印加形干渉光アイソレータの動作検証,” 2006年秋季第67回応用物理学学会講演会, 29a-ZX-3, p. 1067, 滋賀, Aug. 29, 2006.
- (85) 庄司, 水本, “位相調整によるマッハツェンダー干渉型光アイソレータの広帯域化,” 2006年秋季第67回応用物理学学会講演会, 29a-ZX-4, p. 1067, 滋賀, Aug. 29, 2006.
- (86) 横井, 庄司, 西村, 鈴木, 水本, “Si導波層を有する光アイソレータのためのテーパ状三分岐光結合器の結合特性,” 2006年秋季第67回応用物理学学会講演会, 29a-ZX-5, p. 1068, 滋賀, Aug. 29, 2006.
- (87) 水本, 齊藤, 武井, “半漏れ型光アイソレータの試作・特性評価,” 2006年秋季第67回応用物理学学会講演会, 29a-ZX-6, p. 1068, 滋賀, Aug. 29, 2006.
- (88) 武井, 水本, “SOIグレーティング光導波路の製作,” 2006年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, CS-3-11, p.S-46, 金沢, Sept. 21, 2006.
- (89) 水本, 齊藤, 武井, “半漏れ型光アイソレータの試作,” 2006年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-84, p.206, 金沢, Sept. 22, 2006.
- (90) 庄司, 水本, “非相反移相型光アイソレータの広帯域化の動作実証,” 2006年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-85, p.207, 金沢, Sept. 22, 2006.

③ ポスター発表 (国際会議 12 件、国内会議 12 件)

#### 【荒井チーム】

- (1) A. Haque, H. Yagi, T. Sano, T. Maruyama and S. Arai, “Energy-Band Structures of GaInAsP/InP Vertically Stacked Multiple Quantum-Wire Lasers with Strain-Compensating Barriers,” *The 15th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2003)*, Santa Barbara, Cal. (USA), ThP11, pp. 433-436, May 2003.
- (2) H. Yagi, K. Miura, D. Plumwongrot, Y. Nishimoto, K. Ohira, T. Maruyama and S. Arai, “Low threshold current 1540 nm wavelength GaInAsP/InP quantum-wire distributed-feedback lasers,” *The 17th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2005)*, WP-32, Glasgow (UK), May 2005.
- (3) K. Ohira, T. Murayama, H. Yagi, S. Tamura and S. Arai, “Low threshold current distributed-reflector laser with phase-shifted DFB and high-reflection DBR sections,” *The 17th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2005)*, WP-41, Glasgow (UK), May 2005.

- (4) T. Maruyama, T. Okumura, S. Sakamoto, K. Miura, Y. Nishimoto, and S. Arai: "Direct bonding of GaInAsP/InP membrane structure on SOI wafer," *The 18th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2006)*, Princeton (USA), WP-2, May 2006.
- (5) S. M. Ullah, S.-H. Lee, R. Suemitsu, K. Ohira, and S. Arai: "Improved performance of distributed-reflector laser with antireflection coating," *The 18th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2006)*, Princeton (USA), WP-25, May 2006.
- (6) S. Sakamoto, H. Naitoh, H. Kawashima, Y. Nishimoto, S. Tamura, T. Maruyama and S. Arai: "1-step OMVPE grown strongly index-coupled membrane DFB laser with surface corrugation grating structure," *2006 IEEE 19th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2006)*, Hawaii (USA), P 10, Sep. 2006.

#### 【水本チーム】

- (7) H. Yokoi, Y. Shoji and T. Mizumoto, "Optical isolator with Si guiding layer fabricated by wafer bonding," *the 9th Microoptics Conference (MOC'03)*, Tokyo, H-37, pp. 268-271, Oct. 30, 2003.
- (8) J.-S. Yang, H. Yokoi, T. Mizumoto, M.-C. Sung, D.-G. You, J. Lee and K. Jeong, "Spin reorientation transitions of epitaxial magnetic thin films Cu/Ni/Cu(001) Structure by Ion Irradiation," *the 9th Microoptics Conference (MOC'03)*, Tokyo, H-38, pp. 272-274, Oct. 30, 2003.
- (9) J.-K. Seo, S.-H. Jeong, T. Mizumoto, M. Takenaka and Y. Nakano, "Measurement of Intensity-Dependent Response of GaInAsP Distribution Feedback Waveguide," *the 9th Microoptics Conference (MOC'03)*, Tokyo, H-39, pp. 276-278, Oct. 30, 2003.
- (10) H. Saito, K. Sakurai, and T. Mizumoto, "Wafer direct bonding by plasma treatment for waveguide isolator," *the 11th Microoptics Conference (MOC'05)*, H-6, pp.128-129, Tokyo, Nov. 1, 2005.
- (11) M. Taya, Y. Shoji, and T. Mizumoto, "TE-cut polarizer base on Silicon wire waveguide," *the 11th Microoptics Conference (MOC'05)*, H10, pp.136-137, Tokyo, Nov. 1, 2005.
- (12) Y. Akano, K. Tamura, and T. Mizumoto, "Integrated all-optical inverting gate and bistable elements for optical Flip-Flop," *10th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2007)*, LM-21, Tokyo, Jan. 11, 2007.

#### 【荒井チーム】

- (1) 大平和哉、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：第62回応用物理学会学術講演会, 1a-ZN-8, p. 1019, 仙台, Sep. 2004.
- (2) 阪本真一、岡本健志、山崎達也、田村茂雄、荒井滋久；EB露光量制御による微小波長間隔半導体薄膜BH-DFBレーザアレイ：第65回応用物理学会学術講演会, 1a-ZN-9, 宮城, p. 1019, Sep. 2004.
- (3) 岡本健志、阪本真一、山崎達也、田村茂雄、荒井滋久；高屈折率差導波路構造を用いた半導体薄膜BH-DFBレーザ：第65回応用物理学会学術講演会, 1a-ZN-10, 宮城, p. 1020, Sep. 2004.
- (4) 丸山武男、プルームウォンロート・タノーム、八木英樹、三浦幸治、荒井滋久；GaInAsP/InP 歪補償多層量子細線レーザの細線方向依存性：第65回応用物理学会学術講演会, 1a-ZN-14, p. 1021, 宮城, Sep. 2004.
- (5) 阪本真一、内藤秀幸、川島宏幸、西本頼史、田村茂雄、丸山武男、荒井滋久；半

導体薄膜BH-DFBレーザの高温連続動作：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-5, p. 1046, 滋賀, Aug. 2006.

- (6) 阪本真一、内藤秀幸、川島宏幸、田村茂雄、丸山武男、荒井滋久；凹凸形状回折格子を用いた短共振器半導体薄膜BH-DFBレーザの低しきい値動作：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-6, p. 1046, 滋賀, Aug. 2006.
- (7) 内藤秀幸、阪本真一、川島宏幸、西本頼史、田村茂雄、丸山武男、荒井滋久；1回OMVPE成長による凹凸形状半導体薄膜DFBレーザ：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-7, p. 1047, 滋賀, Aug. 2006.
- (8) 西本頼史、タノーム・プルムウォンロート、田村洋介、丸山武男、荒井滋久；ブラッグ波長デチューニングを用いたGaInAsP/InP活性層分離型DFBレーザの温度依存性：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-8, p. 1047, 滋賀, Aug. 2006.
- (9) 李承勲、サイド・マムド・ウラ、末光涼、荒井滋久；Threshold Current Reduction of Distributed Reflector (DR) Laser after Antireflection Coating：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-9, p. 1047, 滋賀, Aug. 2006.
- (10) サイド・マムド・ウラ、末光涼、李承勲、荒井滋久；A Low Threshold Current Operation of Distributed Reflector (DR) Laser：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-10, p. 1048, 滋賀, Aug. 2006.
- (11) 丸山武男、奥村忠嗣、阪本真一、荒井滋久；直接貼付法によるSOI基板上GaInAsP/InP薄膜DFBレーザ：第67回応用物理学会学術講演会，29a-ZT-15, p. 1049, 滋賀, Aug. 2006.
- (12) Dhanorm Plumwognrot、田村洋介、西本頼史、黒川宗高、丸山武男、西山伸彦、荒井滋久；Wire-Length Dependence of Polarization Anisotropy in GaInAsP/InP Quantum-Wire Structures：第67回応用物理学会学術講演会，7a-N-11, p. 1421, 札幌, Sep. 2007.

(4)特許出願:なし

①国内出願 (0 件)

②海外出願 (0 件)

(5)受賞等

①受賞

【第25回応用物理学会論文賞 JJAP 論文奨励賞(応用物理学会)】

ヨルク・ウイドマン、金 孝昶、海老原幸司、陳 博、太田征孝、田村茂雄、沈 鍾寅、荒井滋久

「GaInAsP/InP Distributed Reflector Lasers Consisting of Deeply Etched Vertical Gratings」

平成15年8月30日

【第15回応用物理学会講演奨励賞(応用物理学会)】

岡本健志、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28日

【第17回応用物理学会講演奨励賞(応用物理学会)】

大平和哉、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29日

【19th Int'l Conf on Indium Phosphide and Related Materials "Best Student Paper Award"】

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

②新聞報道

・日経産業新聞、2003年9月15日：

「量子細線レーザーの室温連続動作5300時間達成」

・日経産業新聞、2006年8月22日：

「半導体レーザーセ氏80度で動作 東工大、光配線向け開発」

③その他

・日経先端技術、2003年9月8日、No. 45, pp. 3-5, Sep. 2003.:

「量子細線レーザーの室温連続動作5300時間達成について」

・Nature Photonics 誌 (July, 2007, p.383) Research Highlights

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

本 CREST プログラム主体でのワークショップ・シンポジウム等には特に行わなかったが、極微構造研究グループと光スイッチグループはデバイス作製上の装置・プロセス技術を共有するための個々の研究者間の連絡を密にし、月例の共同輪講会を開催してきた。

両グループの共同的研究の成果としては、光スイッチグループの垂直回折格子 DFB 構造を用いる光制御光スイッチ実現、SOI 基板上への半導体薄膜 DFB レーザの実現が挙げられる。前者は、極微構造研究グループの装置・技術を光スイッチグループに、後者は光スイッチグループの直接貼り付け法の装置・技術を極微構造研究グループに、それぞれ移転した結果として得られた成果である。

8 研究成果の展開

(1) 他の研究事業への展開

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。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、およびこのCRESTプログラムの同一領域の「超ヘテロナ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)、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り、本CREST領域での研究成果を集中させることにより、新たな方向に研究を展開する。

(2) 実用化に向けた展開

本研究で考案・試作したデバイスの実用化に向けた展開はできていない。しかし、本研究で実現した低損傷極微構造形成技術を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提供した結果、NEC ナノエレクトロニクス研究所から「可変光減衰器を集積した多波長レーザー光源」が実現された。

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1) 領域内の活動とその効果

本CRESTプログラムの「量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明」(代表 秋山英文、東京大学物性研究所)のチームとは一昨年より、本研究グループで試作した孤立量子細線の

光学的特性評価について共同で研究を行っている。電子ビーム露光、ドライエッチング、埋め込み再成長法で作製した 6~100nm の量子細線の PL 発光波長シフト、偏波異方性、レーザの光利得スペクトル測定について、秋山チームの優れた測定・解析能力を借りて、われわれが作製している極微構造の評価を行い、すでに CLEO/IQEC'07 および JAP で論文発表が行われている。今後、レーザデバイスの室温以上における動作特性からの評価はわれわれのチームが、孤立量子構造等、超高感度が要求される極低温域での測定に関しては秋山チームが分担して推進できる研究態勢が構築できている。

また、光スイッチグループとは引き続き緊密な連携をとり、研究を推進してゆく。本年から採択された特別推進研究の共同研究者には含めていないが、異種基板との直接貼り付け法や半導体薄膜構造による光スイッチの可能性については、今後、強力な共同研究を提案できる基礎が整い次第開始したい。

(2) 領域横断的活動とその効果:特になし。

## 10 研究成果の今後の貢献について

(1) 科学技術の進歩が期待される成果

低次元量子構造(量子細線・量子ドット)による従来デバイスを凌駕する高性能・高機能光デバイスについては、我々の研究グループでは実現できなかったが、数十 nm 程度の極微構造の作製およびそれを利用する能動光デバイス(レーザ、光増幅器、光吸収変調器等の発光・吸収デバイス)については、界面非発光再結合電流成分を十分に低減する技術を確認することができた。SOI 基板に周期的空孔を形成したフォトニック結晶では発光・光増幅・吸収に関しては適用可能性が低く、光機能能性の観点から能動光デバイス実現が強く望まれる。しかし、能動光デバイスでは、空孔表面における非発光再結合電流成分を十分低減することが必須であり、本研究成果で示したような低損傷界面形成は必須となると考えられる。

本研究プログラムで実現した半導体薄膜 DFB 構造レーザが電流注入動作できるようになれば、従来の 1/100 程度の超低消費電力で駆動可能な単一波長レーザをはじめとする高機能光デバイスおよび光集積回路実現への道が開けると考えられ、光ファイバ通信だけではなく、チップ間光インタコネクション、あるいは次世代集積回路のための新たなブレークスルーをもたらすものと期待される。

(2) 社会・経済の発展が期待される成果

本研究プログラムで扱ったデバイスがまだ実用化段階に至っていないので、社会・経済の発展への寄与はないが、上述の超低消費電力単一波長レーザ、あるいは次世代集積回路のための新たなブレークスルーが実現できれば、科学技術のみならず、社会・経済の発展に大きく寄与することが期待される。

## 11 結び

(1) 研究の目標等から見た達成度の自己評価、今後の研究の展開

低次元量子構造(量子細線・量子ドット)による従来デバイスを凌駕する高性能・高機能光デバイスを実現することはできなかったが、低損傷極微構造形成法を推進したことにより、メサストライプ構造でもしきい値電流 0.8mA の 1.5-1.6 $\mu$ m 波長帯の新型単一波長レーザを実現することに成功した。メサ側面の非発光再結合電流成分が無視できる埋め込みヘテロストライプ構造を用いれば、しきい値電流をさらに半減できる可能性があり、室温以上の温度で動作可能な光ファイバ通信波長帯の単一波長レーザとして世界最小電流かつ高効率動作が期待できる。この部分に対する研究目標達成度は約 60%と判断する。

また、量子サイズ効果を利用し、活性層幅変調による活性領域と異種機能光デバイス領域を集積する提案とデバイス試作に関しては、上記の新型単一波長レーザである DR レーザに

における DFB 領域と DBR 領域の集積、DR レーザと前端面光パワーモニタの集積および DR レーザと電界吸収光変調器の集積という初期的成果を得ている。従来の集積光デバイス作製技術である選択領域成長法 (Selective Area Growth: SAG) に比べると、異なるバンドギャップに相当する領域間の遷移領域を 100nm 以下 (SAG 法では約 100 $\mu$ m) にできるため、例えば光パワーの一部分を吸収・モニタするインライン型の光パワーモニタ等、超小型の機能光素子集積の観点で新たなデバイス実現に有望と考える。この部分に対する研究目標達成度は約 85% と判断する。

半導体薄膜構造レーザについてはまだ電流注入動作下でのしきい値電流および微分量子効率が測定できていないので、理論的に明らかにした極低電流・高効率性が実証できていないが、SOI 基板上への直接貼り付けによる光励起半導体薄膜 DFB レーザの研究が国内外から注目されている。電流注入動作が達成されれば、「シリコンフォトニクス」という近年盛況な研究分野にインライン集積可能な光源、光増幅器等の機能光デバイスを集積する道が開けるものであり、大きな進展が期待できる。この部分に対する研究目標達成度は約 80% と判断する。

以上から、本研究プログラムの達成度は約 75% と判断する。

今後は、これまで得た研究成果をもとに次世代 LSI の高速化のボトルネックを解決するための光配線のための低消費電力・超高速光デバイスおよびその集積化プロセスの研究を展開してゆく予定であり、本 CREST プロジェクトで培った他研究チームとの共同研究態勢が非常に有効となった。

## (2) プロジェクト運営、戦略的創造研究推進事業について

本研究プロジェクトは分担する研究チームも少なく、学内の近い部局のグループであったため、特にチーム内の発表会等を行わなくても、十分連携の取れた研究を行うことができた。

研究費の使用については、昨年度までの 4 年半は JST 渋谷事務所のお蔭で大変スムーズに処理することができた。本年度になって大学が全ての研究費を受託研究費として扱うようになってから、受託研究費の使用制限に対する事務方の不慣れによるためか取扱いが厳しくなり、躊躇することが多かったことも一因かと思う。

近年、学生といえども国際会議等の場で学生が第一著者として発表することに対し、必要な参加費および旅費を教員が外部資金から支給することが当然となっており、その意味で、本研究プロジェクトは研究そのものの推進だけでなく、その成果を発表する機会を通じて若手研究者に世界的な研究発表の場を経験させ、関連分野の研究者との交流を深める機会を得ることに大きな貢献をしたといえる。今後、このような経験を積んだ若手研究者が産業界・学界で活躍することが大いに期待される。

今回の CREST プロジェクトの研究費は年間約 4 千万円で 5 年間という期間であり、その総額は文部科学省科学研究費基盤研究 (A) の約 5 倍であるため、通常では購入できない装置の購入をはじめ他チームとの共同研究も行うことができた。その意味では今後の研究を推進して行く上で重要な共同研究を推進する態勢の構築という無形の資産を得ることができた。そのお蔭で、新たな共同研究提案として平成 19 年度より 5 年間、文部科学省科学研究費特別推進研究を推進することができるようになったものであり、本研究プロジェクトを採択して頂いた研究統括および領域アドバイザーの皆様に深く感謝する次第である。



(3) 研究室での一風景

本研究プロジェクトによる研究費により、重要な装置の導入や極微構造形成のための大型装置の維持等に大変役立てることができた。また、5年間という文部科学省科学研究費基盤研究よりは長い研究期間を設定して頂いたので、個々のデバイスの特性を詰めるという細部にわたる研究成果にこだわることなく、「超低消費電力・高機能光デバイスに向けた研究」という骨太の方針で進めることができたことに感謝したい。



(本研究期間中頃の極微構造研究グループ:2004年7月)



(極微構造研究の基本装置: (上)有機金属気相成長装置、(下)電子ビーム露光装置)



(光スイッチ研究グループ:超高真空下での異種基板直接貼り付け)