

平成17年度
研究開発成果報告書

シームレスな位置情報検出を実現する
高精度角速度センサチップの研究開発

委託先： (株)国際電気通信基礎技術研究所

平成18年4月

情報通信研究機構

平成17年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「シームレスな位置情報検出を実現する高精度角速度センサチップの研究開発」

目 次

1	研究開発課題の背景	1
2	研究開発の全体計画	4
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	5
2-2-1	最終目標	5
2-2-2	中間目標	6
2-3	研究開発の年度別計画	7
3	研究開発体制	8
3-1	研究開発実施体制	8
4	研究開発実施状況	9
4-1	角速度センサチップ最適設計理論の研究	9
4-1-1	序論	9
4-1-1-1	位置付け	9
4-1-1-2	研究方針	9
4-1-2	実施状況	9
4-1-3	実施計画に対する達成状況	10
4-1-4	今後の課題	13
4-2	角速度センサチップ作製技術の研究開発	14
4-2-1	序論	14
4-2-1-1	位置付け	14
4-2-1-2	研究方針	14
4-2-2	実施状況	14
4-2-3	実施計画に対する達成状況	15
4-2-4	今後の課題	16
4-3	角速度センサチップ制御技術の研究開発	16
4-3-1	序論	16
4-3-1-1	位置付け	16
4-3-1-2	研究方針	17
4-3-2	実施状況	17
4-3-3	実施計画に対する達成状況	17
4-3-4	今後の課題	19
4-4	回転角速度検出技術の研究開発	20
4-4-1	序論	20

4-4-1-1	位置付け	20
4-4-1-2	研究方針	20
4-4-2	実施状況	20
4-4-3	実施計画に対する達成状況	20
4-4-4	今後の課題	22
4-5	無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発	23
4-5-1	序論	23
4-5-1-1	位置付け	23
4-5-1-2	研究方針	23
4-5-2	実施状況	23
4-5-3	実施計画に対する達成状況	24
4-5-4	今後の課題	26
4-6	総括	26
5	参考資料・参考文献	
5-1	研究発表・講演等一覧	

1 研究開発課題の背景

ユビキタスネットワーク社会を実現する上で、無線通信システムの重要性は今後ますます増大するものと考えられる。携帯電話、無線 LAN 等が広く普及し、その利便性が定着している現在、単に伝送速度を増大するだけではなく、利用者やアプリケーション側の視点に立ち、使い方が容易で柔軟性のある便利なサービスを付加することが無線システムに要求される次の機能として重要であることが指摘されている。このような観点から最も関心を集めているものの1つが位置情報である。位置情報の応用例として既に位置情報サービス(LBS: Location Based Service)がある。1990年代初頭のカーナビゲーションから始まった位置情報サービスは、携帯電話の普及とともに、天気予報、レストラン情報、交通情報、追跡等、その利用分野を急速に拡大している。

位置情報は、このように情報通信分野の新規事業を創出するばかりでなく、センサネットワーク、ユビキタスコンピューティング、コンテキストウェア情報サービスなど新たな研究領域を生み出すことも期待されている。たとえば、モバイル端末の現在位置を知ること、より動的に状況に応じたアプリケーションを構築することが可能となる。また、データの送信元や着信先の位置、あるいは伝播パスの情報は、情報通信のセキュリティを高める上で極めて重要である。さらに、分散制御を特徴とする無線アドホックネットワークにおいて、通信ルートの決定に位置情報は強力な手段となる。

現在、GPS など外部からの信号を利用して位置情報を得る方法があるが、この場合、電波を受信できないビル街、建物内、地下街等に入ると信号は遮断され位置情報が失われてしまう。したがって、このような状況下でいかにシームレスに位置情報を獲得するかが重要かつ急がれる技術課題となっている。すなわち、モバイル端末機器が外部信号に頼らず自律的に自らの位置を特定できるということが重要な課題である。

このような自律的位置情報検出は慣性センサと総称される加速度センサと回転角速度センサとを組み合わせることにより実現できることが知られている。加速度を2回積分することで位置が得られるが、加速度計の出力は重力加速度を含んでおり、角速度センサを使って水平基準を作り出し重力加速度成分を差し引くことで水平方向の加速度を得ている。また、方位を求めるためにも角速度センサが必要である。このように角速度センサでの誤差は加速度計の出力と合わせて2回積分されることで増幅されるので位置の誤差に重大な影響を及ぼす。このため、自律的位置情報検出のためには非常に高精度の角速度センサが必要である。そのような要求を満足する傑出した高精度の角速度センサとしては光ジャイロの1種である He-Ne レーザを用いたリングレーザジャイロが実用化されている。実際、現在の旅客航空機には位置特定のために He-Ne リングレーザジャイロが標準的に搭載されている。また、H2A ロケットや深海探査艇「うらしま」も He-Ne リングレーザジャイロによって自律的に得た位置情報に従って運行している。この他、船舶、潜水艦、戦闘機にも搭載されている。

このように He-Ne リングレーザジャイロは優れた性能を持つが、He-Ne 放電管に用いる特殊なガラスの加工や He-Ne リングレーザの制御が難しいため非常に高価であり、また最も小さなものでも 3 cm 角の大きさであり、しかも大きな電源が必要であるので、PDA、携帯電話、ノート PC などのモバイル端末に組み込むことは不可能である。さらに消費電力が非常に高く、使用時のコストも非常に大きい。一方、マイクロマシニング技術などを用いた超小型の角速度センサも開発されているが、それらはリングレーザジャイロではなく機械振動式ジャイロであるため精度が低く、カメラの手振れ防止や姿勢制御程度の目的での使用が限界であり、携帯ナビとして機能するほど正確な位置情報検出に用いることは原理的に不可能である。したがって、He-Ne レーザ以外のレーザを用いた超小型でかつ高精度なリングレーザジャイロ方式の角速度センサチップの研究開発は、モバイル端末に搭

載できる実用的な自律的位置情報検出デバイスを実現するために必要不可欠で、時宜を得ている。

ところで、たとえ He-Ne レーザのリングレーザジャイロを用いても長時間の使用で誤差が蓄積するので、自律的位置情報検出だけでは高い精度の位置情報を長時間に渡り提供することは不可能であることには注意が必要である。このため、GPS のような無線システムを用いる位置情報検出と慣性センサを用いる自律的位置情報検出とを組み合わせたハイブリッドの方法が必要不可欠である。これによって正確な位置情報がシームレスに獲得できるようになり、無線システムの占める割合がこれまで以上に大きくなるユビキタスネットワーク社会に極めて大きな影響を与える。また、地下街、地下鉄、トンネル及び地中工事現場等での災害救助、火災消火活動等の支援情報システムにも非常に有効であり、国民生活の安全確保に与える波及効果も極めて大きい。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

GPS と異なり外部信号に頼らない自律的位置情報検出はデータの瞬断がなく安全を最重要視する航空機では標準的に用いられている方法である。これは加速度センサと高精度光ジャイロ角速度センサとを組み合わせることで実用化されている。しかし、モバイル端末に搭載できる超小型の高精度角速度センサは実現されていない。本研究開発は、モバイル端末でも航空機のように自律的位置情報検出が行えるようにするために、光ジャイロの原理を用いて超小型・高精度・安価な角速度センサチップを実現するものである。

リングレーザジャイロは、光速度不変の原理に基づくサニャック効果を応用したデバイスである。サニャック効果とは、閉じた光導波路が回転するとき時計回りの光と反時計回りの光では導波路を一周する時間が異なるというものである。つまり、時計・反時計回りの2つの光にとって導波路の実質的な長さが異なるということである。これは、たとえ動くものの上に置かれても、光の速度は変化しないからである。リングレーザジャイロは、この光路差をレーザ発振周波数の差として検出するものである。すなわち、閉じた光導波路にレーザ媒質が存在すれば、時計・反時計回りの2つの回転波モードでレーザ発振が起きるので、導波路が回転していると、サニャック効果により2つの発振モードの周波数が異なり差を生じることになる。この周波数差は上述の光路差と比例しているが、比例係数にレーザ発振周波数が含まれており、この値は著しく大きいため、位相差を計測する比較的高精度なファイバオプティックジャイロに比べても圧倒的に高精度な測定が可能となる。

本研究開発では、従来1次元であった半導体レーザの形状を2次元的にすることによって、半導体レーザキャビティ内部にリング形状発振モードを形成する方法を用いる。この2次元レーザでは従来の1次元的なキャビティを用いたレーザと異なり、側面もミラーとなっており、He-Neリングレーザの場合と同様の方法でリングモードが形成される。このため、時計・反時計回りの光はよくコリメートされたビームとなる。

このように本研究開発で用いる半導体リングレーザは2次元形状のレーザキャビティ端面すべてがミラーの役割をするので、He-Ne レーザのリングレーザと同じ原理でリングモードが形成され、2つの回転波の干渉縞を得ることができる。したがって、従来の He-Ne リングレーザジャイロと全く同じ原理により、超小型かつ高性能で、しかも安価な角速度センサを実現することができるのである。これを半導体マイクロマシン技術等により小型・高性能化された加速度計と組み合わせることで、モバイル端末機器等の正確な自律

的位置情報検出が可能となる。

ところで、この自律的位置情報検出だけでは誤差が蓄積するので、最終的には、無線システムを用いた位置情報検出と組み合わせたハイブリッドの方法によって、正確な位置情報をシームレスに提供する技術を研究開発しなければならないことには注意が必要である。このハイブリッドの方法は、モバイル端末への搭載ということまで問わなければ、本研究開発による超小型角速度センサチップの研究開発を待たずとも、自律的位置情報検出には既に実用化されている高精度の光ジャイロ等を用いることで、高精度な位置情報を与えるRTK-GPSによる方法と組み合わせたシームレスな位置情報検出技術として別途に研究開発することが可能である。

そこで、以下のように設定したサブテーマに沿って研究開発を進める。

- (1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究
- (2) 角速度センサチップ作製技術の研究開発
- (3) 角速度センサチップ制御技術の研究開発
- (4) 回転角速度検出技術の研究開発
- (5) 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成21年3月末）

2-2-1-1 角速度センサチップ最適設計理論の研究

- (1) 端面の2次元形状によりリングレーザを形成する半導体レーザを設計する。このレーザにおいて時計・反時計回りの2つの回転波モードが励起されていることが確認でき、しかもレーザ端面付近で干渉パターンを形成できるために、遠視野像において広がり幅 10° 以内のビームを実現する。
- (2) 分解能 0.001° /秒までの計測を可能とするために、時計・反時計回りの周波数差10Hzまで2つの回転波モード間の相互作用による引き込み現象を回避する技術を確立する。

2-2-1-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発

- (1) 波長 $860\mu\text{m}$ 、実効屈折率3.3のGaAs/AlGaAsを用いるので、端面の形状効果を完全に反映するように少なくともその3分の1以下の85nmの精度で滑らかな2次元形状のキャビティを実現する。
- (2) 全端面がミラーとなるために、下部クラッド層の位置 $3\mu\text{m}$ よりも深い $4\mu\text{m}$ の垂直端面を有する単一量子井戸レーザを実現する。

2-2-1-3 角速度センサチップ制御技術の研究開発

- (1) サニャック効果を実現するために、時計・反時計回り回転波モードのレーザ発振を実現する。モバイル端末に搭載可能な電源で動作するため、閾値電流密度 $140\text{A}/\text{cm}^2$ を実現する。
- (2) 室温連続発振の条件下でピンフォトダイオードを用いて干渉縞の変化の観測を可能とするため、 $1\mu\text{m}$ 間隔の規則正しい干渉縞の形成を実現する。

2-2-1-4 回転角速度検出技術の研究開発

- (1) 素子の回転角速度に比例する干渉縞の移動によって回転角速度を検出する。従来の

CD、DVD、レーザープリンタ用の半導体レーザーチップパッケージと全く同様に小型で扱いやすいものとするために、半導体レーザーと受光素子を高さ 2mm、直径 5.6mm の CAN パッケージ内に収めた光ジャイロ角速度センサを実現する。

- (2) 自律的位置検出に十分な精度の角速度計測を実現する。位置精度誤差 1 mm/秒のためにバイアス安定性 0.0001° /秒を実現する。
- (3) CAN パッケージ内に収めるために、半導体レーザーの長さを $600 \mu\text{m}$ 程度にする。

2-2-1-5 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

無線としてRTK-GPS、慣性センサとしてHe-Neリングレーザージャイロを用いる条件下で、データ更新時間10ms、位置精度2.5cmを実現する。

2-2-2 中間目標 (平成 19 年 1 月末)

2-2-2-1 角速度センサチップ最適設計理論の研究

- (1) 端面の2次元形状によりリングレーザーを形成する半導体レーザーを設計する。このレーザーにおいて時計・反時計回りの2つの回転波モードが励起されていることを確認でき、しかもレーザー端面付近で干渉パターンをある程度形成できるために、遠視野像においてビーム広がり幅 15° 以内のビームクオリティを実現する。
- (2) 角速度分解能 1° /秒までの計測を可能とするために、時計・反時計回りの周波数差100Hzまで2つの回転波モード間の相互作用による引き込み現象を回避する技術を開発する。

2-2-2-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発

- (1) 波長 $860 \mu\text{m}$ 、実効屈折率3.3のGaAs/AlGaAsを用いるので、端面の形状効果を反映するように少なくともその3分の1に近い100nmの精度で滑らかな2次元形状のキャビティを実現する。
- (2) 全端面をミラーとすることを可能とするために活性層よりも深い $2.5 \mu\text{m}$ の垂直端面を有する単一量子井戸レーザーを実現する。

2-2-2-3 角速度センサチップ制御技術の研究開発

- (1) 室温連続発振を可能とするレーザー発振の閾値電流密度 $200\text{A}/\text{cm}^2$ を実現する。
- (2) マイクロレンズを通してピンフォトダイオードで干渉縞の変化の観測を可能とするため $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 間隔の規則正しい干渉縞の形成を実現する。

2-2-2-4 回転角速度検出技術の研究開発

- (1) レーザーの回転角速度に比例する干渉縞の移動によって回転角速度を検出する。半導体レーザー、マイクロレンズ、2チャンネル光検出器を組み合わせた光ジャイロ角速度センサを実現する。
- (2) 位置精度誤差 $5\text{cm}/\text{秒}$ のために、バイアス安定性 0.1° /秒を実現する。

2-2-2-5 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

無線としてRTK-GPS、慣性センサとしてファイバオプティックジャイロを用いる条件下で、データ更新時間15ms、位置精度4cmを実現する。

2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
シームレスな位置情報検出を実現する高精度角速度センサチップの研究開発							
角速度センサチップ最適設計理論の研究							
角速度センサチップ作製技術の研究開発							
角速度センサチップ制御技術の研究開発							
回転角速度検出技術の研究開発							
無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発							
間接経費							
合 計							

注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

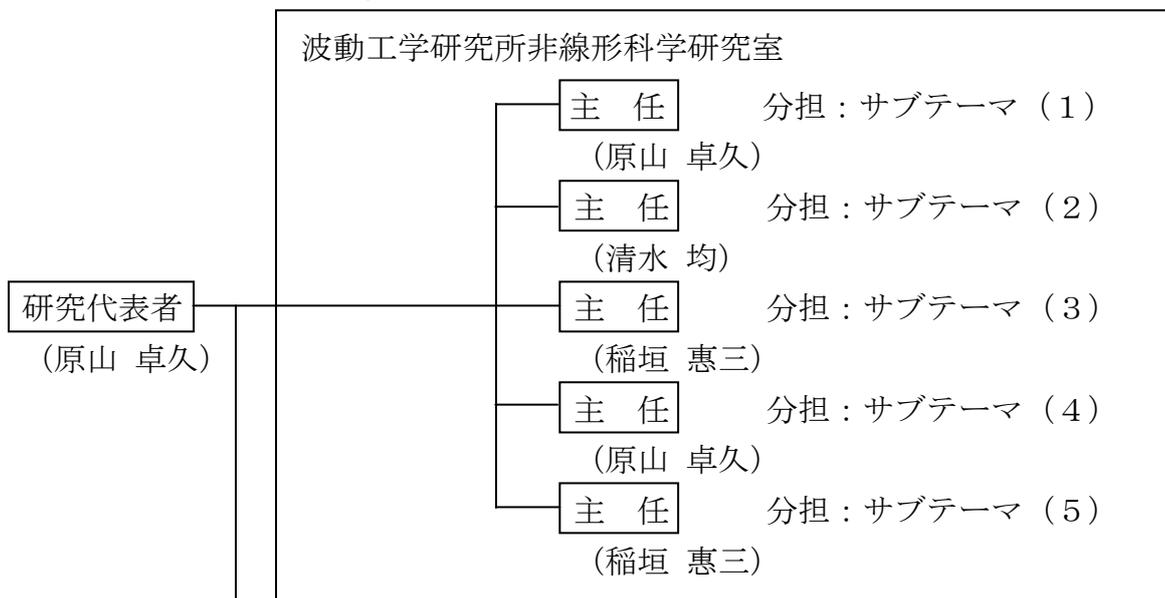
2 備考欄に再委託先機関名を記載

3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

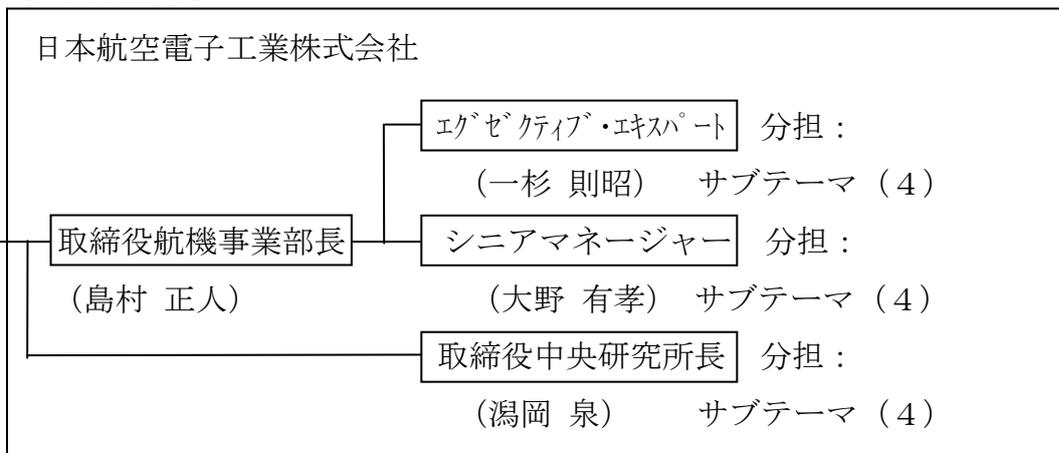
3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制

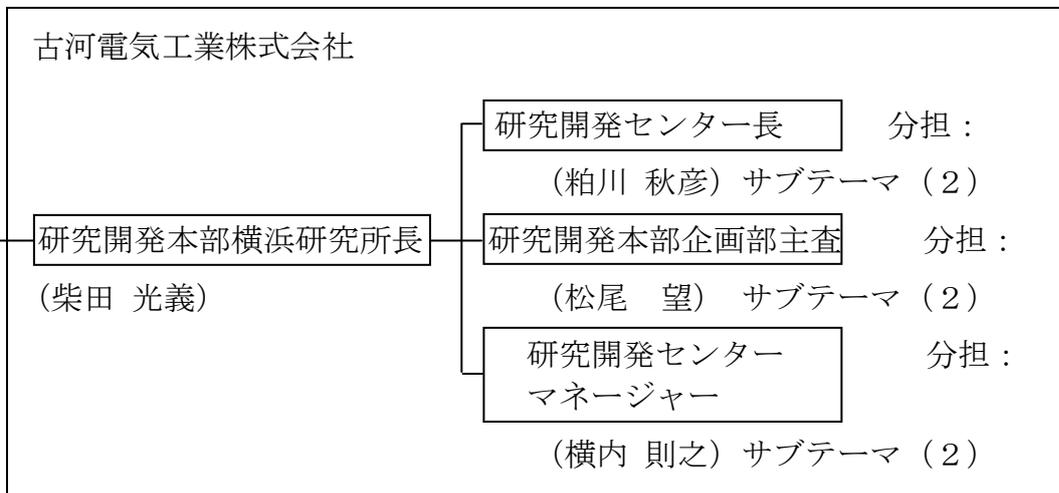
(研究分担者の体制)



(共同研究者)



(共同研究者)



4 研究開発実施状況

現在 He-Ne レーザを用いて実用化されている光ジャイロは正確な自律的位置情報検出に必要な回転角速度計測を十分な精度で達成できる唯一の角速度センサである。これはリングレーザジャイロの原理を用いており、他の方法を用いた角速度センサでこのような高い性能を得ることは原理的に不可能である。本研究開発は、He-Ne レーザを用いたリングレーザジャイロと全く同じ原理を用いて、モバイル端末に搭載可能なほど超小型で高性能かつ安価な角速度センサチップを実現するものである。

以下のようにサブテーマを設定しており、実施内容をサブテーマ毎に説明する。

サブテーマ

- (1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究
- (2) 角速度センサチップ作製技術の研究開発
- (3) 角速度センサチップ制御技術の研究開発
- (4) 回転角速度検出技術の研究開発
- (5) 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

4-1 角速度センサチップ最適設計理論の研究開発

4-1-1 序論

4-1-1-1 位置付け

本研究開発では、従来1次元であるレーザキャビティの形状を2次元にすることで自由空間に出てもビームが広がらないようなリングレーザを形成するので、新しい2次元レーザに関する基礎理論が必要である。また、角速度センサとしての性能向上のためには、2つの回転波モードの引き込みによるロックイン現象の回避など、光と物質の相互作用を取り入れた2次元レーザの非線形動力学理論の構築も重要である。これらの設計理論が本研究開発の角速度センサチップに関する理論的基盤を与える。

4-1-1-2 研究方針

キャビティの2次元形状を適切に設計することが最も重要である。キャビティ内部でリング状の発振モードを実現し自由空間でも広がらない高いビームクオリティが得られるようなキャビティを目指す。これにより、時計回りと反時計回りの2つの回転波モードがレーザキャビティから2つのビームとして出射し明確な干渉縞を形成できる。

ところで、2つの回転波モードはレーザ媒質を介して非線形に相互作用を及ぼし、ロックイン現象を生じることがあることが知られている。このロックインが起きると2つのモードの周波数差が失われ、角速度センサの分解能が低下する。したがってこのロックイン現象を出来る限り抑制することが重要である。

4-1-2 実施状況

従来1次元であった半導体レーザのキャビティ形状を2次元にすることによって、光軸合わせ等の困難な作業なしに2次元レーザ内部に自動的にリングレーザが形成できることが本研究開発の重要なポイントである。また時計回りのビームと反時計回りのビームがレーザキャビティから自由空間に出射したときに大きく広がることがなく規則正しい干渉パターンを作ることも重要である。しかし、2次元形状を有するレーザキャビティは、こ

れまでこのような観点からは研究されていないため、新しい2次元レーザに関する基礎理論を構築した。

また、角速度センサとしての性能向上のためには、時計回り・反時計回りの回転波モードの引き込みによるロックイン現象の回避など、光と物質の相互作用を取り入れた2次元レーザの非線形動力学理論の構築も行った。

我々は、1次元的なレーザキャビティ解析の最も実用的な方法の1つとして知られている Fox-Li の方法を2次元的なレーザキャビティに拡張する方法を確立し、平成16年度にはその数値解析プログラムを作成した。17年度では、これを用いて2次元的なキャビティモードを解析し、ビームクオリティの高い回転波をキャビティ内部に発生するようにキャビティ形状を設計した。ここで、この拡張 Fox-Li モード解析法は、キャビティが細長く、波長に比べて素子サイズが十分大きいとき有効となる近似を用いていることには注意を要する。このような近似が成り立ち、キャビティ内部に自然とリングレーザが形成されるようなキャビティ形状を考案した。

また、従来は閉じたキャビティに用いられる境界要素法を、屈折率変化により光を閉じ込めるタイプの開いたキャビティに拡張することで、任意の2次元形状キャビティの共鳴モードを求めることもできる。そこで、この解析プログラムを作成した。この方法は全く近似を用いないため非常に精度は高いが、波長に比べて素子が大きい場合には計算に膨大な時間を必要とする。しかし、電流注入素子では、電極を波長オーダー（キャビティ内部での波長約 $0.25\mu\text{m}$ の数倍）のサイズまで小さくすることが困難であるため、素子サイズは波長の数百倍になってしまい、拡張された境界要素法によるモード解析には適していない。そこで、波長に比べて素子サイズがあまり大きくない光注入素子を用いた実験を行い、拡張された境界要素法によって数値的に求めたキャビティモードと実際にレーザ発振するモードとを比較した。

また、ロックイン現象について解析するため、キャビティモード間相互作用による非線形動力学理論を構築した。平成16年度に理論構築とそれを用いて数値解析を行ったモード展開理論の有効性とそこで用いた近似の適応限界を明らかにした。このような近似の成立する限界を超える複雑なモード間相互作用は、線形モードによる展開を用いない Maxwell-Bloch 方程式で記述するべきである。そこで、本年度は Maxwell-Bloch 方程式によるモードダイナミクス解析プログラムを作成し、モード展開だけでは説明できない複雑な相互作用を明らかにした。この場合、光の非常に速いキャリア振動までシミュレーションを行うと正確ではあるが膨大な時間を要するため、速い振動成分を取り除く近似を用いて、Maxwell 方程式を Schroedinger 方程式のタイプのものに変形することでより高速なシミュレーションを行うことも併せて検討した。

さらに、ジャイロ機能を解析するために、一定速度で回転運動する座標系におけるモード展開理論や Maxwell-Bloch 方程式を導出し、2次元マイクロキャビティレーザにおける Sagnac 効果を解析した。

4-1-3 実施計画に対する達成状況

拡張 Fox-Li モード解析法を用いて2次元的なキャビティモードを解析し、ビームクオリティの高い回転波をキャビティ内部に発生できるようにキャビティ形状を設計した。また、これを応用して、キャビティ端における全反射を用いてキャビティ内部に光を閉じ込めるタイプのリングレーザに最適なキャビティ形状を決定した。

また、屈折率変化により光を閉じ込めるタイプの開いたキャビティに境界要素法を適用できるように拡張することで、任意の2次元形状キャビティの共鳴モードを求めることができるようになった。この方法の有効性を確認するため、波長に比べて素子サイズがあまり大きくない光注入素子を用いた実験を行い、光注入による2次元レーザの発振に成功し

た。

リングレーザジャイロでは回転角速度が遅いとき異なるはずの時計・反時計回りの光の周波数が一致してしまうロックインと呼ばれる現象がジャイロ性能を大きく左右する。そこで、このロックイン現象について解析するため、キャビティモード間相互作用による非線形動力学を解析した。半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせたリングレーザに関してモデル化を行うのがよいが、この系では、波長に比べてリング径が非常に大きいため、従来理論のモード展開法を適用できない。このため、Maxwell-Bloch 方程式を Schrodinger 方程式のタイプのものに変形し、高速フーリエ変換を援用することでより高速なシミュレーションを行い、モードダイナミクスを解析するプログラムを作成した。

さらに、ジャイロ機能を解析するために、一定速度で回転運動する座標系に一般相対性理論を適用し、このような系におけるモード展開理論及び Maxwell-Bloch 方程式を導出した。これを用いて、2次元マイクロキャビティレーザにおけるサニャック効果を解明し、ロックインの原因がキャビティ形状にあることを明らかにした。従来のリングレーザジャイロ理論では、後方散乱光が逆方向回転の光に対して注入し同期が起きることがロックインの原因であると考えられていた。この新たなロックイン要因の発見は、従来のリングレーザジャイロの高性能化に役立つ上、マイクロキャビティを用いる半導体リングレーザジャイロの性能を決める最も重要なポイントとなり、非常に大きな理論的成果である。

従来、サニャック効果を導出する理論的枠組みでは、回転の効果を含んだマクスウェル方程式の解析手法として WKB 近似を用いる。即ち、リングキャビティの共鳴モードを時計・反時計回りに伝播する成分とそれに垂直方向成分に分解できると仮定し、伝播方向に WKB 解を仮定する。この仮定は、リングキャビティにおいて縮退する2つのモードが存在することを仮定したことになる。キャビティが回転すると、この縮退が解け、時計・反時計回りに伝播する2つのモードの共鳴周波数には角速度に比例した差が生じる。これがサニャック効果であり、この2つのモードを同時にレーザ発振させ、そのビート周波数を利用して角速度を検出するセンサがリングレーザジャイロである。

この従来理論の出発点が WKB 近似であることには注意を要する。特に、本研究開発のように、通常の半導体レーザ程度の非常に小さなリングキャビティにおける共鳴モードでは、キャビティサイズが波長オーダーに近付くため、光の2次元的な広がりや考慮する必要があり、伝播成分とそれに垂直成分というような分解は一般的に不可能である。

そこで、回転の効果を一一般相対性理論により含めた2次元キャビティに対するマクスウェル方程式に量子力学の近縮退状態に対する摂動論を適用し、キャビティの回転角速度がある一定の角速度以上になったときに初めて共鳴モードが定在波から回転波に遷移し、それ以上の角速度からサニャック効果が生じることを導いた。このサニャック効果の起き始める角速度は近縮退の程度に依存する。即ち、回転していないときのリング軌道に関連する2つの近縮退モードの固有周波数差が大きいほど、角速度を検出できない領域が大きくなる。

この理論結果を確かめるため、以下の計算機シミュレーションを行った。キャビティは、Quadrupole キャビティと呼ばれる形状を用いた。このキャビティの共鳴モードは、回転効果を含んだ定常状態に関するマクスウェル方程式

$$(\nabla_{xy}^2 + n^2 k^2) \psi - 2ik(\mathbf{h} \cdot \nabla) \psi = 0 \quad (1)$$

の共鳴である。(1)で、 \mathbf{h} は回転角速度ベクトル

$$\mathbf{h} = \frac{1}{c}(\mathbf{r} \times \boldsymbol{\Omega})$$

であり、
 $\Omega = (0, 0, \Omega)$
 は角速度を表す。

キャビティの静止状態、即ち、(1)で $\Omega = 0$ としたとき、キャビティ端面の4点で反射する菱形のリング軌道に関連する近縮退した2つの共鳴モードが存在し、図4-1-1のようになる。

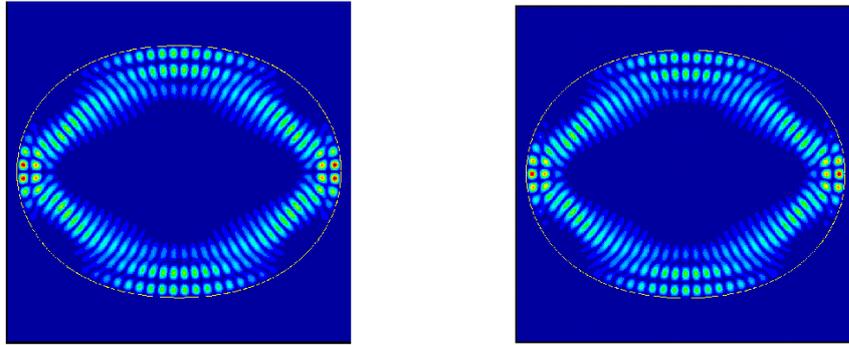


図4-1-1. Quadrupole キャビティの静止状態における近縮退リングモード

キャビティを回転したとき、即ち、(1)で Ω が有限な値を持つときの上記2つの共鳴モードの周波数差は、 Ω に対して図4-1-2のようになる。

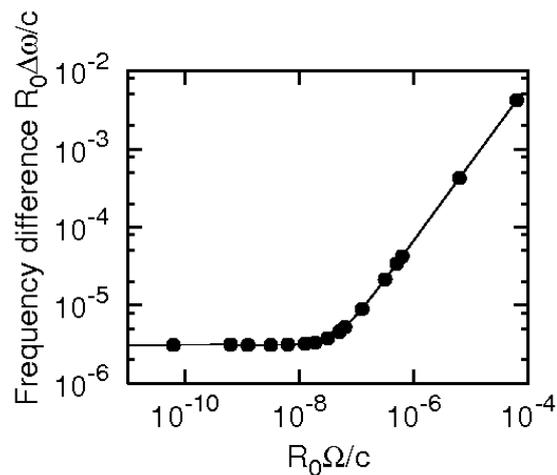


図4-1-2. 2つの共鳴モードの周波数差の回転角速度依存性

図4-1-2からわかるように、ある回転角速度までは周波数差は増大せず、その後、回転角速度に比例して増大することがわかる。つまり、サニャック効果起きない領域が存在することがわかる。さらに、波動関数パターンを調べると、そのような領域では、共鳴モードは図4-1-1の定在波であり、サニャック効果の生じる領域では、図4-1-3のような回転波に変化することがわかった。

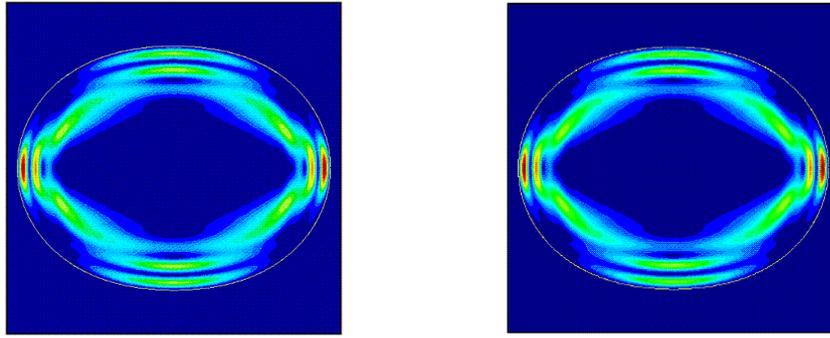


図4-1-3. 十分大きな角速度で回転するキャビティにおける共鳴モード

先述のように、リングレーザを回転してもサニャック効果の起きない低角速度領域が存在することは知られており、この領域とそのような現象はそれぞれデッドバンド、ロックインと呼ばれ、ジャイロ性能を決定する最も重要な要因と考えられている。しかし、従来、ロックインの原因は、レーザ媒質を介した時計・反時計回りのモードの非線形相互作用による周波数ロックであると考えられてきた。この新しい理論的な結果により、レーザ媒質の存在しないような空のキャビティ、つまり線形理論の範囲においても、ロックインが生じることが明らかになった。そして、デッドバンドを低減するためには、近縮退をなるべく縮退に近づけるようにキャビティ形状を工夫する必要があることがわかった。これは、2次元マイクロキャビティを用いたリングレーザジャイロチップの設計の重要な指針となる。

達成度：100%

4-1-4 今後の課題

キャビティが非常に小さくなると、線形理論の範囲でもロックイン現象が起きるため、キャビティ形状がジャイロ性能に影響を及ぼすことが明らかになった。この理論ではレーザ媒質の非線形効果は考慮していないが、さらにそのような利得媒質を介したレーザ発振モード間の非線形相互作用の効果を解析することも大変重要になると考えられる。実際、従来のロックインの原因は後方散乱光による注入同期というレーザ媒質による非線形効果であると考えられてきた。非線形効果なしでもロックインが生じることが解明できたことは大きな成果であるが、さらに非線形効果まで考慮したときにロックインにどのような影響が現れるかなど、理論的に解明する必要がある。

また、後述するように、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせた半導体リングレーザの実験では、時計・反時計回りのレーザ発振光のビートが角速度に比例するというジャイロ機能が得られている。このシステムを小型化することによってリングレーザジャイロチップを実現するという観点からも研究開発を進める必要があり、そのためには、この半導体リングレーザジャイロを理論的に説明できるモデル化と解析を行うことが重要であると考えられる。

4-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発

4-2-1 序論

4-2-1-1 位置付け

2次元形状のレーザキャビティを半導体単一量子井戸構造により微小素子として作製する技術を確立する。

4-2-1-2 研究方針

エピウエハ作製からレーザ作製プロセスまでを行い、評価結果を設計や作製プロセスにフィードバックするということを繰り返し、よりよい光ジャイロとする。安価となるように大量生産を念頭に置いた作製工程を考えることが重要である。また安価な実装技術を開発することも大切である。

4-2-2 実施状況

2次元形状のレーザキャビティを安定に作製する技術を確立する。MBE装置により作製したGaAs/AlGaAsダブルヘテロ接合型単一量子井戸レーザエピウエハに対してRIE装置を用いてドライエッチングすることによって任意の2次元形状のレーザキャビティに加工した。2次元形状パターンの描画は電子線露光装置を用いた。電極やコンタクトのパターン描画も同様である。これらのパターンは、最終的な実用化段階においてはステッパによる描画を用いるべきである。しかし、レーザジャイロとして最適なキャビティ形状が確定していない段階では様々な形状のキャビティを作製して評価するというフィードバックが必要であり、ステッパを用いる場合レチクル作製に時間を要しそのようなフィードバックを加速することができない。つまり、作製された素子の性能を評価し、その結果を設計と作製へ素早くフィードバックするという観点からは電子線描画も重要であると考えられる。平成16年度に立ち上げた技術を発展させ、様々な構造のエピウエハに対して、ドライエッチングした端面の垂直性と滑らかさを両立できるようなガス組成や温度等の条件を構造の異なるウエハ毎に調べた。

また、リングレーザモードを発振させるためには、このモードのみを励起するように電流を注入する必要がある。しかし、電極形状をこのようなモードパターンにすると後のワイヤボンディング等のプロセスが困難になるため、電極はキャビティ形状と同じ形にする方がよい。そこで、まずエピウエハ表面にSiO₂の絶縁膜を形成し、次にドライエッチングによってSiO₂の絶縁膜に所望の2次元モードパターンのコンタクト窓を開け、コンタクト窓の開いたSiO₂の絶縁膜の上に電極パターンを蒸着した。ここで、レーザキャビティの形状をドライエッチングで切り出す際には、SiO₂膜をドライエッチングでキャビティ形状に切り出したものをマスクパターンとする方がよいと考えられる。このように、ドライエッチングはエピウエハだけでなくSiO₂膜にも行う必要があり2つの異なる材料に対するドライエッチング技術の確立を行った。

また安価となるように大量生産を念頭に置いた作製工程を検討することも重要である。特にステッパを用いてパターンをエピウエハ上に転写する場合には、レーザパターン、コンタクトパターン、電極パターンなど、複数のパターンを位置がずれることなく転写できる方法を確立した。

また、ジャイロとしての性能を向上させるためには、レーザ発振閾値の低いことが重要であるので、量子ドットレーザなど、様々なタイプのエピウエハを用いることを検討した。

4-2-3 実施計画に対する達成状況

GaAs/AlGaAs ダブルヘテロ接合型量子井戸レーザエピウエハに対して ICP-RIE 装置を用いてドライエッチングすることによって様々な2次元形状のレーザキャビティを作製した。2次元のレーザ、コンタクト、電極のパターンは電子線描画とステップパによって行った。

ドライエッチングに用いるガス組成を工夫することで、上記2つの方法のどちらの場合にも全作製プロセス終了後で 100nm 以下の滑らかさで垂直なエッチング端面を形成することに成功した。作製した2次元レーザの典型的な例として、擬似スタジアム型レーザに関する端面の電子顕微鏡写真を図4-2-1に示す。P 電極中心付近の窪んでいる部分は絶縁膜を除去した部分に相当し、この部分のみから電流が注入される。長軸方向の両端面は、平坦ではなく、曲面となっている。さらに、短軸方向には平坦な端面が形成されている。これら4つのドライエッチングにより作製された端面をミラーとして利用することで、2次元的な広がりを持つレーザ発振パターンが可能となる。

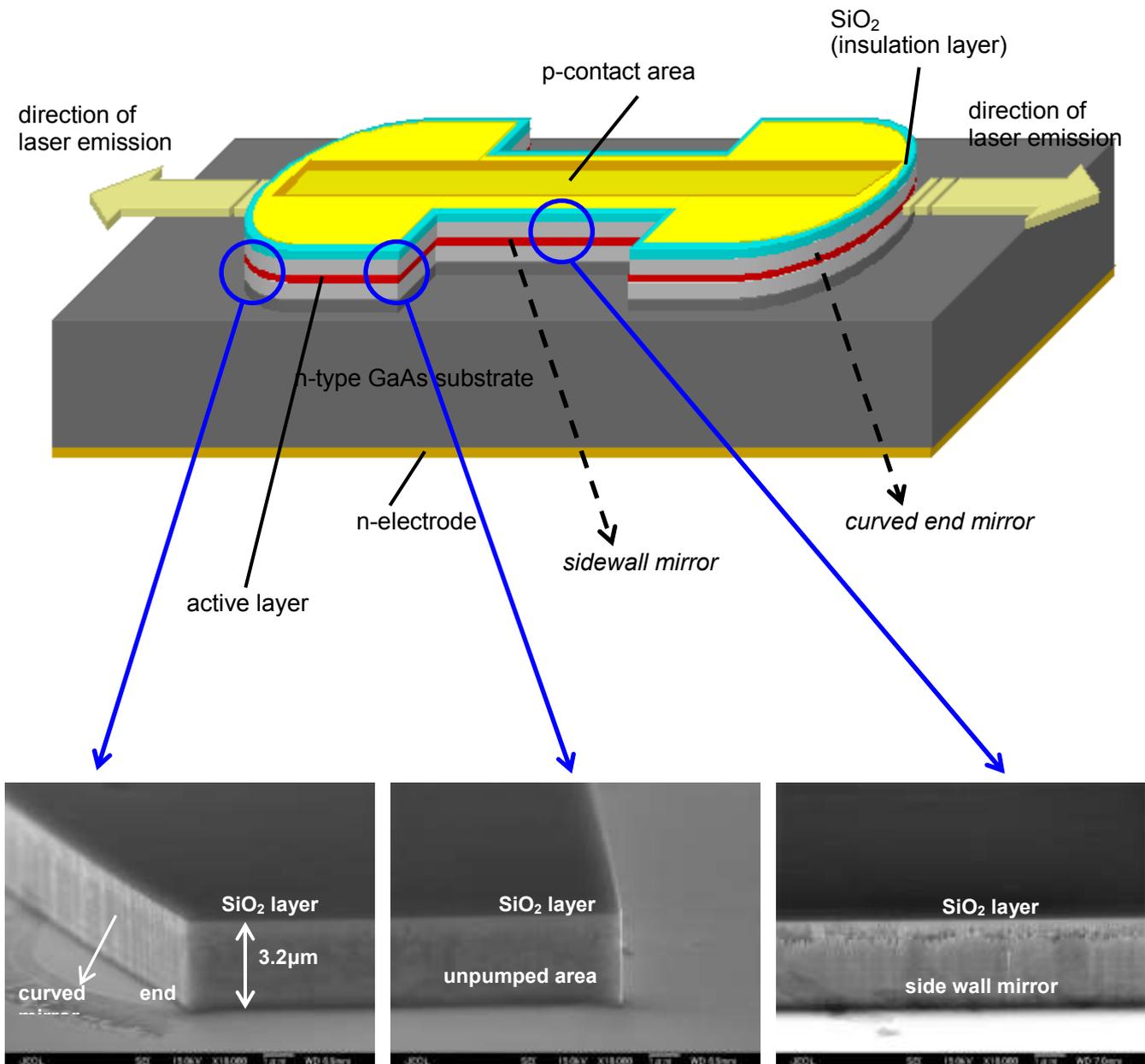


図4-2-1 擬似スタジアムレーザの端面電子顕微鏡写真

また、エッチング端面の評価として、へき開によって形成されるミラーとドライエッチングによって形成されるミラーのレーザ発振閾値を比較した。同じ組成のエピウエハを用いて作製した共振器長 $500\mu\text{m}$ 幅 $5\mu\text{m}$ のストライプレーザでは、へき開とドライエッチングによる素子は共に閾値が 152mA であり、両者に遜色がないことが確認できた。

また、 SiO_2 の絶縁膜にドライエッチングによりコンタクト窓を開けることで、所望のモードパターンだけを励起することに成功した。レーザパターン、コンタクトパターン、電極パターンの位置ずれは、電子線直接描画、ステッパのいずれを用いる場合でも $3\mu\text{m}$ 以下に抑えることができた。

SOA とファイバを用いたリングレーザでの角速度検出が成功したので、これを小型化したものとして、半径 1mm のリッジ型リングレーザを作製し、発振に成功した。

さらに、MBE 装置により量子ドット構造のエピウエハを作製した。12 層までの量子ドット多層化を実現し、低閾値電流密度 ($80\text{A}/\text{cm}^2$) を達成した。

達成度：90%

4-2-4 今後の課題

ジャイロ性能は後方散乱に依存することが指摘されているため、この後方散乱をできる限り低減することが望ましいと考えられる。そこで、2次元マイクロキャビティレーザ作製における最も重要なポイントであるドライエッチング加工による滑らかで垂直な端面ミラー作製技術をさらに高め、後方散乱光をさらに減少させることが重要であると考えられる。

また、所望のモードをレーザ発振させるためにコンタクト窓を設ける方法が有効であることが明らかになったが、電流広がりがあるため、その広がり領域と重なる部分を持つようなキャビティモードも若干励起される場合がある。これを避けるために、コンタクト層そのものをキャビティモードパターンに加工し、コンタクト層においては電流広がりが起きないようにすることが有効であると考えられる。

さらに、理論や実験結果をフィードバックしながら、ジャイロ機能の実現と高精度化のための素子作製プロセスを工夫して行くことが重要である。

4-3 角速度センサチップ制御技術の研究開発

4-3-1 序論

4-3-1-1 位置付け

作製された2次元マイクロキャビティレーザの発振特性を評価し、制御技術を確立する。

4-3-1-2 研究方針

本研究開発の角速度センサチップに用いる半導体レーザは、従来の1次元的なキャビティを用いるものとは異なり、2次元形状を有する新しいタイプのレーザであるので、発振特性を詳しく評価し、制御技術を確立することが重要である。そして、最終的に角速度センサとして機能するために、狭いスペクトルピーク幅でコヒーレンスがよく、時計回りと反時計回りの発振モードが近視野像に正確な干渉縞を形成することを観測できることが重要である。一方、2つの異なる方向の回転波が発生していることは、遠視野像に2つのピークが現れることで確認できる。また、単一量子井戸半導体レーザであるので、発振の閾

値は非常に低くできると期待される。

4-3-2 実施状況

本研究開発の角速度センサチップに用いる半導体レーザは、従来の1次元的なキャビティを用いるものとは異なり、2次元形状を有する新しいタイプのレーザであるため、2次元レーザ特有の発振特性を詳しく評価し、制御技術を確立した。そして、角速度センサとして機能するために、狭いスペクトルピーク幅でコヒーレンスがよく、時計回りと反時計回りの発振モードが近視野像に正確な干渉縞を形成することを観測できることを確認した。また、2つの異なる方向の回転波が発生していることを、遠視野像に2つのピークが現れることで確認した。基本的な特性評価項目は、電流-光出力特性、発振スペクトル、近視野像、遠視野像等である。2次元レーザは出力光が2次元的な広がりを持つため遠視野像やスペクトル等の計測には時間を要する。また、レーザキャビティの2次元形状やエピウエハ構造などもパラメータと考えられ、レーザジャイロとして最適なパラメータをサーチするためにはレーザ発振特性の評価結果を設計・作製へ出来る限り早くフィードバックする必要がある。そこで、レーザ発振特性を効率的に短時間で評価できるように専用の特別な特性評価装置を設計・導入した。

また、拡張された境界要素法により数値的に求めたモードと実際に発振するモードを比較するために、光注入素子を調べた。この場合、素子サイズが $1\ \mu\text{m}$ から $5\ \mu\text{m}$ と非常に小さくなり、励起光を注入するために専用の顕微分光システムを導入した。

最終的に実用化すべき半導体レーザジャイロは2次元マイクロキャビティレーザを用いたものであるが、ジャイロ性能と2次元レーザの持つパラメータとの関係はまだ解明されていない。このようなパラメータ依存性を作製プロセスも研究段階にある2次元マイクロキャビティレーザで調べることは容易ではない。そのため、並行して、より扱い易い半導体リングレーザとして、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせたリングレーザを用いて、ジャイロ性能を向上させる方法を調べた。このタイプのリングレーザもこれまでほとんど研究されていないため、発振特性等を詳しく評価した。

4-3-3 実施計画に対する達成状況

レーザ発振特性を効率的に短時間で評価できるように専用の特別な特性評価装置を設計・導入した。特に、マウントしていない素子の特性をパルス発振により効率的に評価する場合には、レーザが2次元形状を有するため、広い角度の遠視野像を短時間で測定する必要がある。そこで、レーザの駆動電流パルスとレーザからの出力光とを同期させ、遠視野像測定時間を飛躍的に短縮することに成功した。このような工夫により、様々な形状の2次元レーザを効率的に評価し、レーザ発振特性を向上させるためのパラメータの絞り込みを進めた。例として擬似スタジアム型レーザに関する特性評価結果を図4-3-1~3に示す。

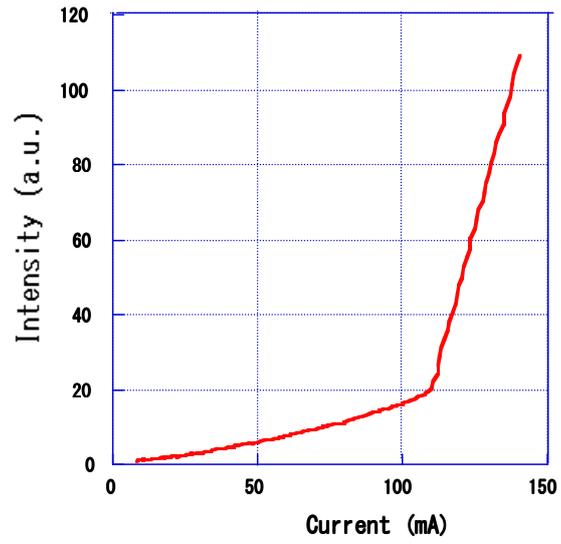


図 4-3-1 擬似スタジアムレーザの電流—光出力特性

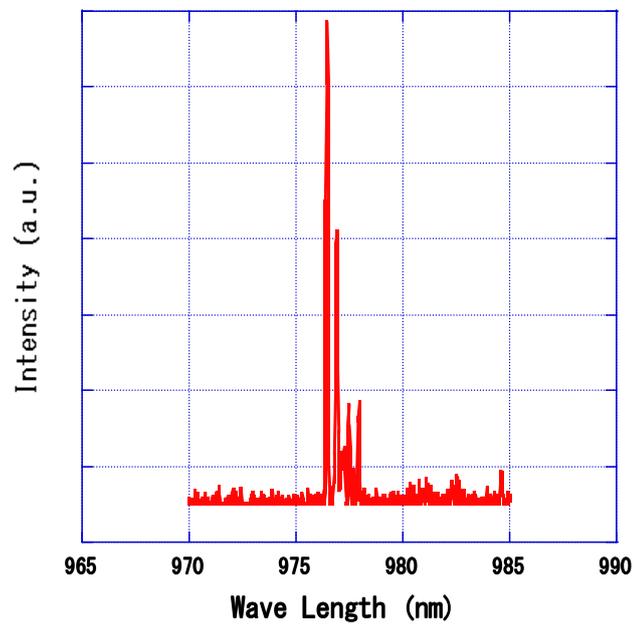


図 4-3-2 擬似スタジアムレーザの光スペクトル特性

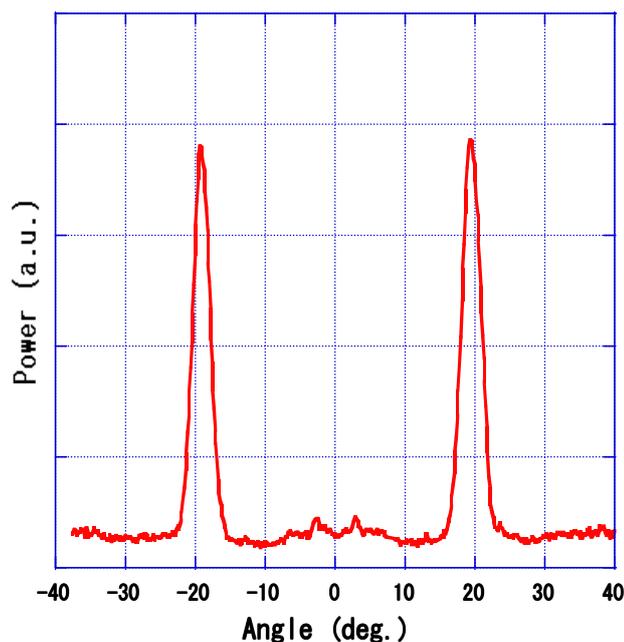


図4-3-3 擬似スタジアムレーザの遠視野像

図4-3-3はリング軌道に関連するモードを励起するように、絶縁膜にリング型のコンタクト窓を開けた素子に関する遠視野像の結果である。このリング軌道モードから出射されるレーザ光は端面におけるスネルの法則に従う出射角度は±約19度となるので、この方向の鋭いピークは正確にこのリング軌道モードがレーザ発振していることを示している。電流注入の工夫により、一方向のみの回転波モードとすることも可能である。

また、素子サイズが $1\ \mu\text{m}$ から $5\ \mu\text{m}$ の極微小光注入型2次元レーザ素子を作製し、顕微分光システムによりレーザ発振させることに成功した。

さらに、理論的な考察からロックイン閾値が最も小さいと期待される形状で半径が 1mm のリングレーザを作製し、パルス発振、連続発振共に成功した。パルス発振では出力が弱く不安定であるが、連続発振のデータを基本データとすることで、素子のレーザ発振特性をパルス発振により選別する方法を確立した。

達成度：100%

4-3-4 今後の課題

2次元マイクロキャビティレーザの基本計測システムはほぼ完成したといえる。今後はこのシステムを用いて、試作素子を効率的に評価し、回転角速度検出実験の前段階のデータを着実に蓄積し、角速度実験、作製、理論にフィードバックすることが重要である。

また、リングレーザ素子に関しては、光検出器は素子内部に組み込まれているため、2次元レーザの場合とはやや異なる測定となる。こちらも効率的な計測ができるよう工夫することが必要である。

4-4 回転角速度検出技術の研究開発

4-4-1 序論

4-4-1-1 位置付け

素子を回転したとき、時計回りと反時計回りの回転波モードの周波数にはレーザの回転角速度に比例した違いが生じ、この周波数差に比例して時計回りと反時計回りのレーザ発振モードによる干渉縞が平行移動する。これを検出することで、回転角速度が特定でき、角速度センサとして機能することを示す。

4-4-1-2 研究方針

回転角速度が遅い場合には2つの回転波モードの周波数差が消失するロックイン現象が起きる場合があるので、これを避けるためにHe-Neリングレーザジャイロで用いられている方法などを参考にして、遅い角速度も正確に計測できるようにする。ここで得られる結果を上記サブテーマにフィードバックし、精度を上げて行くことが大切である。

4-4-2 実施状況

素子を回転したとき、時計回りと反時計回りの回転波モードの周波数にレーザの回転角速度に比例した差を生じるため、この周波数差に比例した速度で時計回りと反時計回りの回転波モードの形成する干渉縞が平行移動する。まず、これを検出することで、回転角速度を特定し角速度センサとして機能することが示される。この実験にはジャイロ開発専用のレートテーブルを用いた。時計回りと反時計回りの回転波モードが存在することが確認できた2次元マイクロキャビティレーザとその評価システムをレートテーブルに搭載し、評価システムも一緒に回転させた。様々な形状やエピウエハの2次元レーザに関してジャイロ機能との関係を調べた。

また、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせたリングレーザに関しても同様にレートテーブルによるジャイロ性能評価を行った。アクティブなレーザ媒質である半導体光増幅器の長さに対するパッシブな光導波路である光ファイバの長さの比率や光ファイバからの光の損失など、様々なパラメータを容易に変化させることができるという点がこのリングレーザの特徴である。このようにして半導体リングレーザを用いたジャイロの性能の典型的なパラメータ依存性を研究することが可能となった。

4-4-3 実施計画に対する達成状況

半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせた半導体リングレーザを用いてサニャック効果を確認した。これは、世界初の半導体を用いたリングレーザジャイロの実現である。ジャイロ性能の、レーザ駆動電流値、リング長、リング面積などの様々なパラメータ依存性を詳しく評価した。その結果、理論値とのズレは1%以下と非常に小さいことが明らかになった。

この実験では、時計・反時計回りのレーザ光を合波した時系列データから周波数領域に変換されたデータを作成し、それをいくつも平均することでサニャックビート信号を得ている。ここで平均化するという統計処理が必要な理由は、時系列データが一見かなりランダムに変化しているためである。この変動は大きな直流成分の変動も含み、これは1/fノイズを生じてしまう。回転角速度が非常に遅くなると、サニャックビート周波数は0に近づくため、ビート信号がこの1/fノイズに埋もれてしまい、ロックイン領域を実験で決定することが大変困難になることが明らかになった。

この半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせた半導体リングレーザジャイロを

S-FOG (SOA Fiber-Optic Gyro) と呼ぶことにする。S-FOG は半導体リングレーザジャイロの性能を決める要因を探る上で大変重要である。

S-FOG 実験系を図 4-4-1 に示す。SOA 両端の光ファイバピグテールを分岐比 99:1 のカプラで接続し、リングレーザを構成する。カプラによりリング外に取り出した時計回り光と反時計回り光を 50:50 カプラで合波した後フォトダイオード (PD) で 2 乗検波し、両光波のビート信号を得る。実験系全体を回転テーブル上に設置し、角速度を変化させてビート信号を測定した。

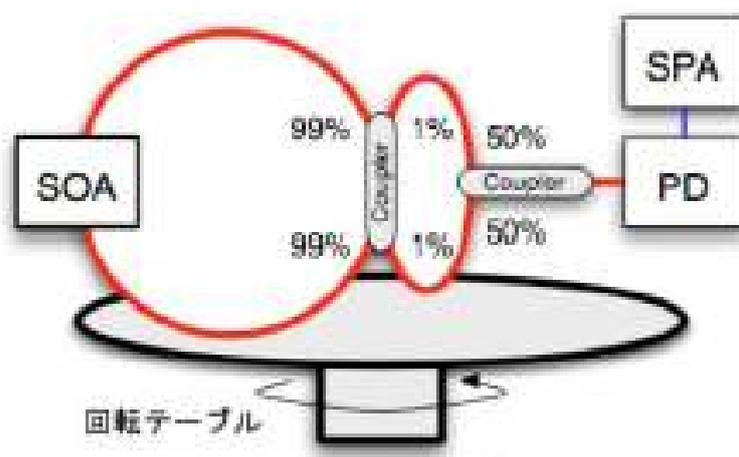


図 4-4-1. S-FOG 実験系の構成

角速度を各々 90, 180, 270, 360°/sec に設定した場合のビート信号スペクトラムを図 4-4-2 に示す。SOA への注入電流を閾値の 1.03 倍 (60mA) に設定しており、明瞭なピークが観測された。

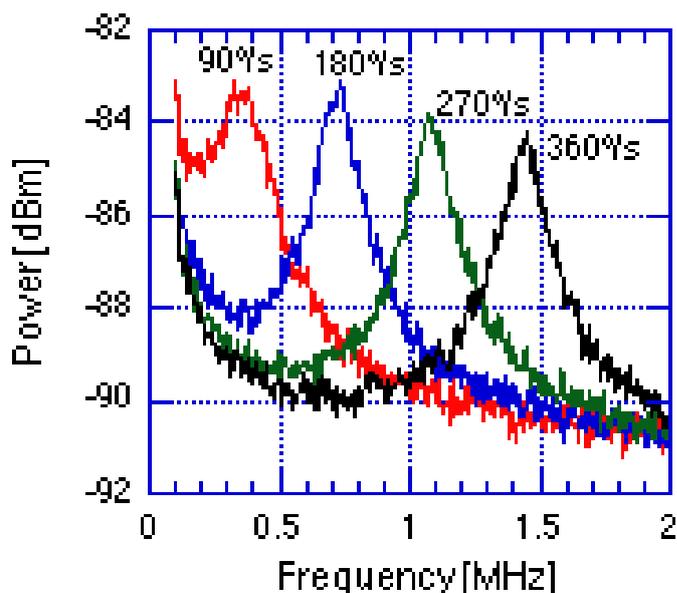


図 4-4-2. サニャックビートスペクトル

図 4-4-3 に角速度に対するビート信号の周波数と強度の変化を示す。周波数は角速度と比例しており、比例係数 (スケールファクタ、SF) は 4.014 [kHz·sec/deg]であった。ま

た強度変動は 3dB 程度で比較的安定であった。回転速度が遅い領域ではビート信号が 1/f 雑音に埋もれて測定できていない。

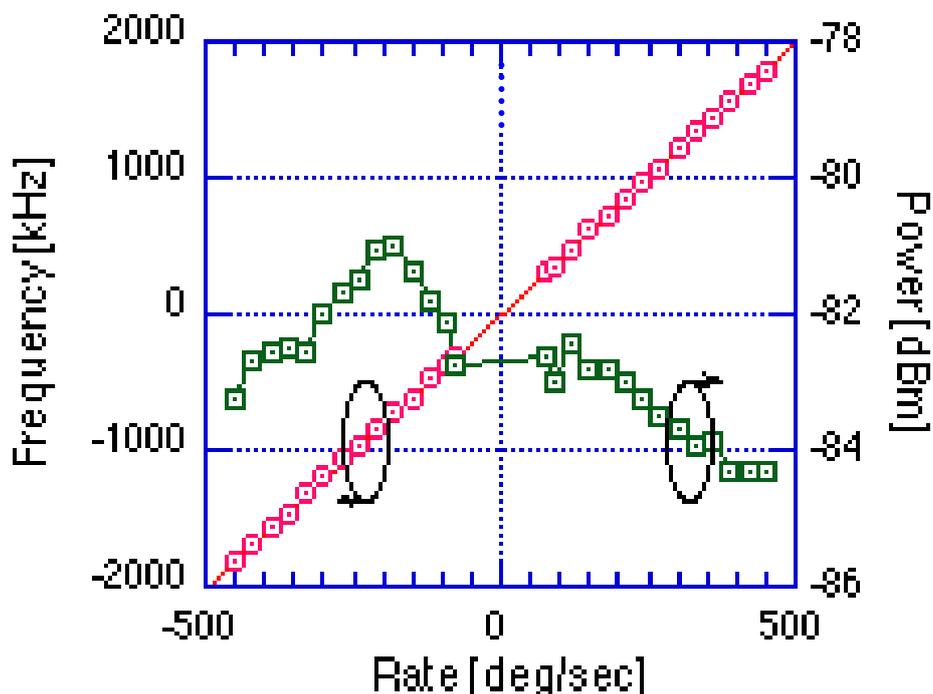


図 4-4-3. スケールファクタ

サニャック効果によるビート信号周波数 Δf の理論値は、

$$\Delta f = \frac{4A}{n\lambda P} \Omega$$

で表される。実験では、面積 $A=0.3998\text{m}^2$ 、屈折率 $n=1.444$ 、波長 $\lambda=1579\text{nm}$ 、パス長 $P=3.03\text{m}$ であり、計算された SF は $4.039 [\text{kHz} \cdot \text{sec}/\text{deg}]$ で、実験値との誤差は僅かに 0.62% である。

達成度：80%

4-4-4 今後の課題

半導体リングレーザを用いて世界で初めてリングレーザジャイロを実現できたことは特筆すべき大きな成果である。一方、これは、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせしており、モノリシックには作製できないデバイスであり、ファイバの曲げ限界があるため超小型化には適していない。このような観点からは、この S-FOG を詳細に調べ、それをヒントにして半導体レーザチップでリングレーザジャイロを実現することが重要であると考えられる。

4-5 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

4-5-1 序論

4-5-1-2 位置付け

無線システムによる位置情報検出と慣性センサによる位置情報検出とを組み合わせた位置計測装置を研究開発し、正確な位置情報をシームレスに獲得する技術を実現する。この技術は、本研究開発による超小型角速度センサが実用化されたとき、モバイル端末等に應用することが可能である。

4-5-1-2 研究方針

装置の大きさを問わなければ、自律的位置情報検出技術は航空機やロケット等に利用されていることからわかるように非常に成熟した技術である。GPSによる位置情報検出技術も同様に成熟している。これらを組み合わせることで高精度な位置情報をシームレスに獲得できることを示す。

4-5-2 実施状況

自律的位置情報検出に用いることが可能な角速度センサとしては、本研究開発で目標としているほど小型で高性能なものは現存しないため、大きさや性能を犠牲にしても様々なものを試用して、無線と慣性センサを相補的に使用することでジャイロ性能を補完する方法を模索しておくことが重要である。このような研究を並行して進めることで、本研究開発による高精度角速度センサチップが実現できたときに、無線による位置検出システムと組み合わせ効果的な使用方法が明らかになる。角速度センサの性能としては、機械振動式ジャイロ、ファイバオプティックジャイロ、リングレーザジャイロの順に精度は高くなるが、同じ順で大きさとコストも高くなる。まず実際にこれらを用いて位置計測装置を作製することで、この自律的位置情報検出の精度と無線システム位置検出の精度との補完関係を明らかにする。無線システムは非常に高精度な RTK-GPS を用いた。慣性センサとしては本研究開発で実現される角速度センサチップを想定するのがよく、それに匹敵する性能を持つものとしては、高精度 He-Ne のリングレーザジャイロを用いた。当初、ファイバオプティックジャイロと無線位置検出システムの組み合わせを中間目標に、He-Ne リングレーザジャイロと無線とのハイブリッドシステムを最終目標に掲げていた。しかし、最終目標の性能を満足するためには、初めから He-Ne リングレーザジャイロを用いた研究開発に着手しなければ間に合わないことが判明したため、ファイバオプティックジャイロを用いるシステムは扱わないこととした。

He-Ne リングレーザジャイロでは、ロックイン現象を避けるため、常にジャイロに激しい振動的回転を与えており、これをディザとよんでいる。ディザによって非常に小さな回転角速度まで安定に測定できるようになっているが、このような人工的な振動的回転は角速度の入力がないときでも出力が生じ、それがランダムオーケ的な誤差を導くことになる。ジャイロのみを用いた位置情報検出ではこのような誤差が蓄積され続ける。このようなジャイロの誤差は、GPS を使用できるような環境のときに得られる位置情報を用いて補正する方法を検討した。また、このような誤差には様々な要因が複雑に絡んではいるが、正確に誤差解析を行うことでジャイロ性能をより向上させることができることが明らかになった。これは、RTK-GPS の与える非常に高精度の位置情報とジャイロによる位置情報とを詳しく比較することで、ジャイロの持つ誤差の特徴を抽出し、それを利用して常にジャイロの誤差を補正し、ジャイロのみを用いて検出する位置情報の誤差をより小さくするという方法である。

4-5-3 実施計画に対する達成状況

GPS とのハイブリッドを行うための方式を検討した。GPS と慣性計測部をハイブリッドする場合、オープンループ方式 (図 4-5-1) とクローズループ方式 (図 4-5-2) が考えられる。

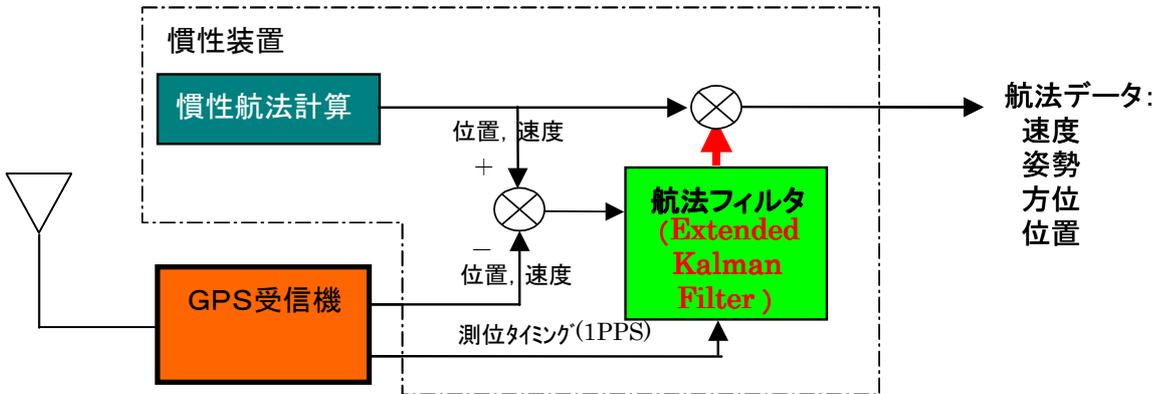


図 4-5-1 オープンループ方式

オープンループ方式はハイブリッドにより推定した慣性計測部の位置、速度、姿勢、方位、センサ等の誤差を慣性演算にフィードバック (補正) しない方式であり、慣性航法演算とは独立して誤差伝播式により誤差を更新し、出力時に加算する。GPS の突発的な誤差により慣性航法演算に影響を与えることがない反面、各誤差が大きくなり、誤差伝播が非線形となるため、拡張カルマンフィルタを使用する等複雑になることが明らかになった。

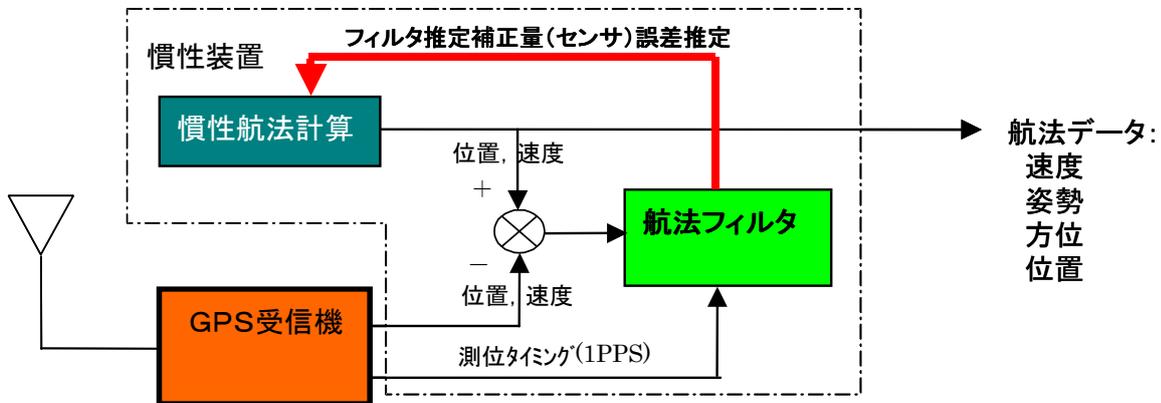


図 4-5-2 クローズドループ方式

クローズループ方式は、推定した各誤差を慣性航法演算にフィードバックして補正する方式である。逐次補正を行うため、各誤差は常に最小に抑えられ、各誤差伝播は線形近似できる。但し、GPS の誤差等により大きな観測誤差が入り誤った推定補正を実行した場合に慣性航法演算部に影響を及ぼさないよう工夫する必要があることが明らかになった。

また、計算処理部 (GPS ハイブリッド演算) に上記方式を実装する方法を検討した。実装方法には、ルーズカップリング (図 4-5-3) とタイトカップリング (図 4-5-4) が考えられる。

ルーズカップリングは GPS の航法計算結果と慣性装置の基本慣性計算結果とを合せて

複合航法演算計算を行う方法であり、必要なデータは位置、速度、時刻のみなので、どのような GPS 受信機でもインタフェースが容易であるというメリットがある。

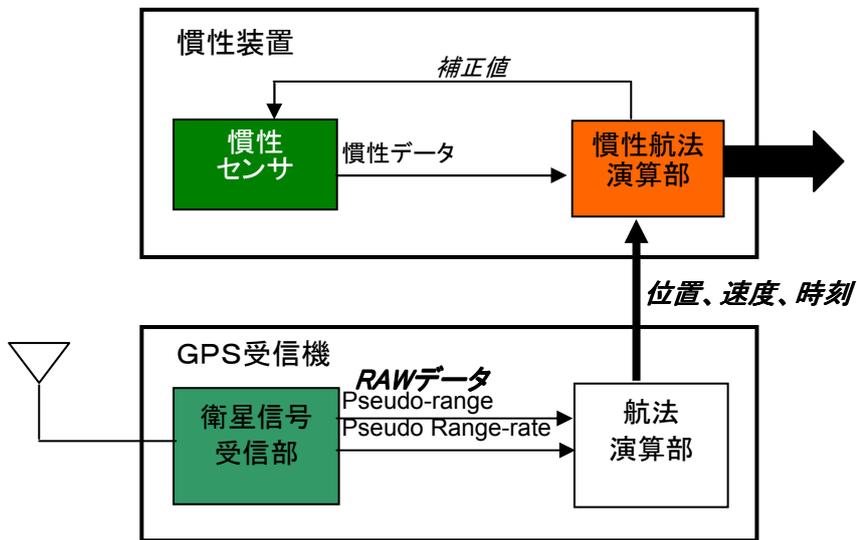


図 4-5-3 ルーズカップリング

一方、タイトカップリングは、GPS の RAW データを使用し、GPS の航法計算部を慣性装置の中に取り込み、センサデータと一体で航法演算（複合航法演算）計算を行う方法であり、より精度よく計算できることが明らかになった。

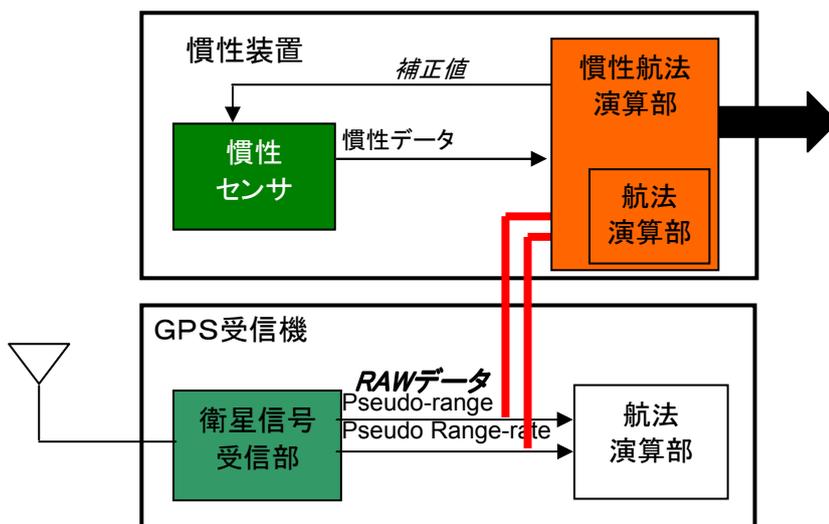


図 4-5-4 タイトカップリング

以上の検討を踏まえ、クローズドループ+タイトカップリングの構成(図 4-5-5)が最適であることが明らかになった。

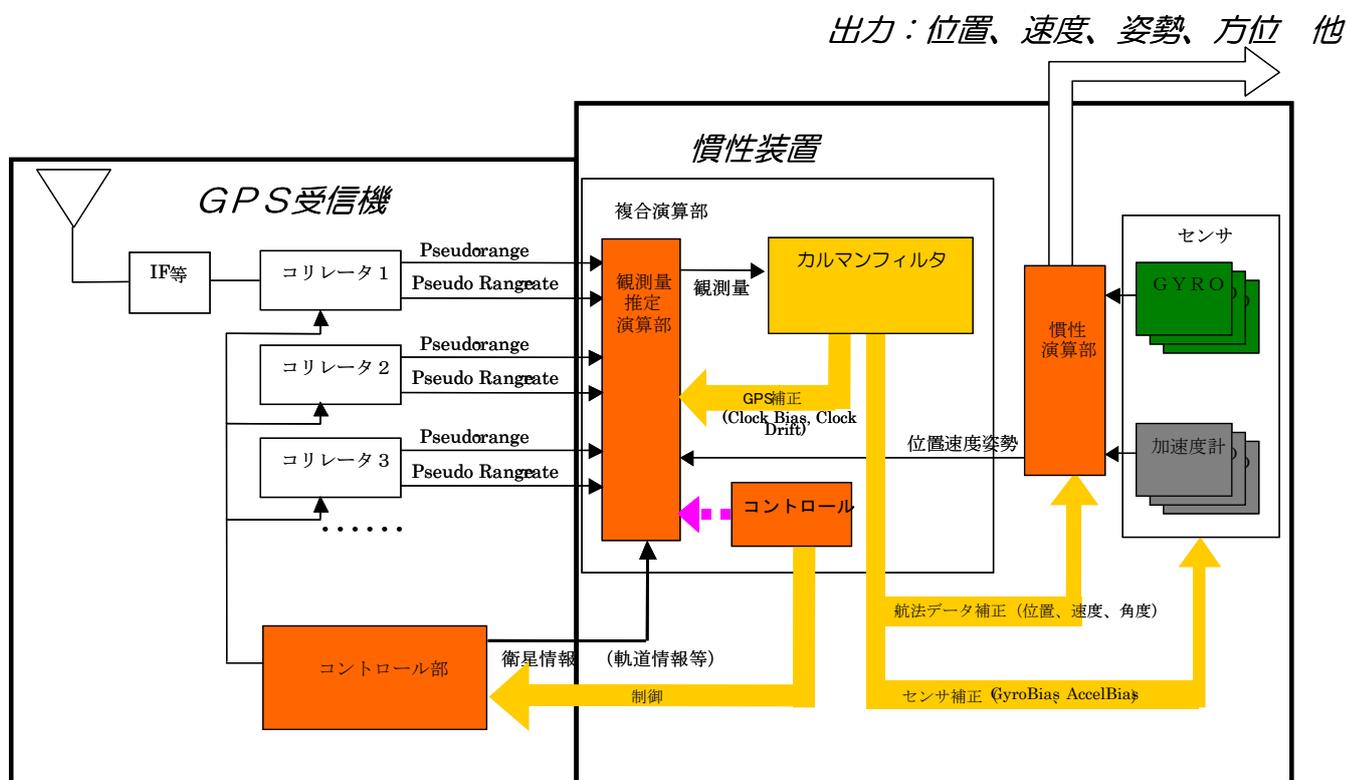


図4-5-5 クローズドループ+タイトカップリング

達成度：80%

4-5-4 今後の課題

リングレーザジャイロとGPSとのハイブリッド位置計測システムを詳しく検討し、構成に関する最適な方式が固まった。しかし、これは未だ理論的な考察段階であり、実際に組み込んだ場合に生じる問題に関して未知の部分が多い。そのためには、早期に実装を行い、その性能を評価することが重要であると考えられる。

4-6 総括

本年度の最大の成果は2つあり、微小な光共振器におけるサニャック効果の理論を構築できたこと、および、半導体光増幅器と光ファイバからなる半導体リングレーザでジャイロ機能を実証できたことである。これらの非常に大きな成果によって、角速度センサチップの研究開発は本年度飛躍的に進歩したといえる。

微小な光共振器におけるサニャック効果の理論的な結果によって、通常の半導体レーザのような微小なチップでリングレーザジャイロを作製する場合にはレーザキャビティの形状を特別に工夫しなければジャイロ性能を向上することは不可能であることが明らかにな

った。これは、光の波長に比べてデバイスサイズがはるかに大きい従来の He-Ne のリングレーザジャイロでは問題とならなかった新しい設計指針であり、リングレーザジャイロをチップで実現する場合に初めて生じる問題である。この新しい理論的な結果から、不適切な形状のキャビティを用いたときには、たとえリングレーザモードをレーザ発振させても、サニャック効果が生じる角速度は非常に大きくなってしまふことが解明された。このサニャック効果が起き始める角速度は、回転していない状態における 2 つの定在波モードの周波数差に依存する。少なくとも、これを近縮退の状況にできないとサニャック効果は生じ得ない。今後は、この理論を元に最適な形状を探ることが重要である。

また、S-FOG による半導体リングレーザを用いたジャイロ機能の実証によって、希ガスではなく半導体をレーザ媒質に用いてもサニャックビート信号を検出できることが明らかになった。このように、時計・反時計回りの光の非線形相互作用効果の大きな半導体でもリングレーザジャイロが可能であることはこれまで示されていなかった。従来の He-Ne リングレーザの場合、希ガスのレーザ媒質における気体分子の運動に起因するドップラー効果により、時計・反時計回りのレーザ発振モード各々に別々の利得を与えることができるため、サニャックビート信号が生じるということがジャイロとして機能するために最も重要である。しかし、半導体がレーザ媒質となる場合には、このような効果は期待できず、そのため、時計・反時計回りのレーザ発振モードはレーザ媒質を介して非線形に相互作用する結果、競合してしまい、どちらか、一方向の回転となり、サニャックビート信号を観測できないという可能性もあった。これは、レーザ理論でよく用いられる Lamb による半古典理論と摂動論的な取り扱いを、時計・反時計回りの回転波モードがそれぞれシングルモード発振すると仮定した場合に適用した結果である。しかし、実際の S-FOG の場合、マルチモード発振していることやキャビティの一部分だけがレーザ媒質になっていることなど、従来のリングレーザとは異なるため、Lamb 理論の近似は正確には成立していない可能性もあった。ところが、ファイバ長は波長よりもかなり長いため、寄与するモードが 1000 以上となるので理論的扱いは非常に困難であり、この理論の適用の妥当性は実験によって判断する必要があった。したがって、S-FOG がジャイロとして機能することを実験的に示せたことは非常に大きな意義がある。しかも、S-FOG では、リング経路の長さや囲む面積、内部反射率などの様々なパラメータを独立な部品として容易に変化することが可能であるため、これらのパラメータ依存性を詳しく調べることができるという利点もある。このようなデータはチップ設計において大変重要となる。

一方、チップの作製プロセスや作製された素子の評価方法も順調に確立されつつあるので、サブテーマ (1) ~ (4) 即ち、理論・設計、素子作製、素子特性評価、回転実験というフィードバックループによって、チップでジャイロ機能を実現することが本研究開発における今後の最大の課題である。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

研究発表、講演、文献の状況

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005波-発003	国際会議	Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (CLEO-PR2005)	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan	InAs Quantum Dot Lasers on GaAs Substrate with 12 Layers	2005/7/11 ~2005/7/15	有	発表済
2005波-発011	国内大会	第66回応用物理学会学術講演会	清水 均, Shanmugam Saravanan, 吉田 順自, 井部 紗代子 (古河電工), 横内 則之 (古河電工)	低しきい値電流密度多層化量子ドットレーザ	2005/9/7 ~2005/9/11	有	発表済
2005波-発012	誌上	Physical Review A	Takahisa Harayama, Satoshi Sunada, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Theory of Two-dimensional Microcavity Lasers	2005/6/6	有	掲載済
2005波-発013	国際会議	SPIE Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology 2005	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu, Pablo Vaccaro	Long Wavelength (1.27 μm) Photoluminescence Emission from InAs Quantum Dots Embedded in GaAs Matrix	2005/12/11 ~2005/12/14	有	発表済
2005波-発014	国際会議	Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics & Laser Conference 2005 (CLEO/QELS2005)	Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Unidirectional Beam Emission from Confocal Quasi-Stadium Laser Diodes	2005/5/22 ~2005/5/27	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005波-発015	国内大会	第52回応用物理学関係連合講演会	福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大), 田中 智子, 原山 卓久	InGaAsP 歪 MWQ 擬似スタジアム型半導体レーザの単一横モード動作	2005/3/29 ~2005/4/1	有	発表済
2005波-発018	誌上	IEEE Transactions on Circuits and Systems Part II	Takashi Ohira	Rigorous Q-Factor Formulation for One- and Two-Port Passive Linear Networks From an Oscillator Noise Spectrum Viewpoint	2005/12/1	有	掲載済
2005波-発019	国際会議	6th International Summer School and Conference "Let's Face Chaos through Nonlinear Dynamics"	Takahisa Harayama	Theory and Application of 2D Microcavity Lasers	2005/6/26 ~2005/7/10	有	発表済
2005波-発020	国内大会	第66回応用物理学学会学術講演会	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu, Pablo Vaccaro	Effect of Growth Interruption during the Growth of InAs Quantum Dots on GaAs (100) Substrate	2005/9/7 ~2005/9/11	有	発表済
2005波-発028	国際会議	28th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI GA 2005)	Takashi Ohira	Signal Processing for Analog Smart Antennas	2005/10/23 ~2005/10/29	有	発表済
2005波-発029	誌上	Japanese Journal of Applied Physics	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu, Pablo Vaccaro	Strain Reduction and Long Wavelength Emission from InAs/GaAs QDs by using Growth Interruption in MBE		有	掲載決定済 (印刷中)
2005波-発035	国内大会	2005年電子情報通信学会ソサイエティ大会	野戸 広之, 稲垣 恵三, 田村 修一, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジャイロ (S-FOG) の回転に依存した光強度の変化	2005/9/20 ~2005/9/23	有	発表済
2005波-発036	国内大会	2005年電子情報通信学会ソサイエティ大会	田村 修一, 稲垣 恵三, 野戸 広之, 原山 卓久	半導体光増幅器と光ファイバを用いたリングレーザの静特性	2005/9/20 ~2005/9/23	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005 波-発 037	誌上	Physical Review Letters	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama	Sagnac Effect in Resonant Microcavities		有	査読中
2005 波-発 038	国内大会	2005 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会	砂田 哲, 原山 卓久	共振器モードに対するサニヤッ ク効果	2005/9/20 ~2005/9/23	有	発表済
2005 波-発 039	国内大会	2005 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会	大平 孝, 荒木 純道 (東京工業大)	多端子発振回路の安定動作条 件: 黒川判別式の拡張	2005/9/20 ~2005/9/23	有	発表済
2005 波-発 040	誌上	Journal of Crystal Growth	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu	Long Wavelength and Narrow Photoluminescence Linewidth from InAs Quantum Dots with GaAs Cap Layer on GaAs (100) Substrate	2005/12/20	有	掲載済
2005 波-発 041	国内大会	日本物理学会 2005 年秋季大会	Muhan Choi, Tomoko Tanaka, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre.. Univ.), Takahisa Harayama	Modal Control by Using Multi-Electrode in Two-dimensional Quasi-Stadium Micro-Cavity Lasers	2005/9/19 ~2005/9/22	有	発表済
2005 波-発 042	国内大会	第 66 回応用物理学会学術 講演会	田中 智子, Muhan Choi, 福 嶋 丈浩 (ATR/岡山県立 大), 原山 卓久	多電極構造による擬似スタジア ム型半導体レーザーの出力方向制 御	2005/9/7 ~2005/9/11	有	発表済
2005 波-発 043	国内大会	日本物理学会 2005 年秋季大会	篠原 晋, Hakan E. Tureci (Yale Univ.), 砂田 哲, 原 山 卓久, A. Douglas Stone (Yale Univ.)	二次元微小共振器レーザーモデ ルのシミュレーション: 発振特 性の共振器形状依存	2005/9/20 ~2005/9/23	有	発表済
2005 波-発 045	国内大会	2005 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会	稲垣 恵三, 田村 修一, 野 戸 広之, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジ ャイロ (S-FOG) による回転角 速度の検出	2005/9/20 ~2005/9/23	有	発表済
2005 波-発 049	誌上	Japanese Journal of Applied Physics	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan,	InAs Quantum Dot Lasers with Extremely Low Threshold	2005/8/19	有	掲載済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
			Junji Yoshida, Sayoko Ibe (Furukawa Elec.), Noriyuki Yokouchi (Furukawa Elec.)	Current Density (7A/cm ² /Layer)			
2005 波一発 058	誌上	Applied Physics Letters	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan	Buffer-Material Dependence of InAs Quantum Dots on GaAs Substrate	2006/1/26	有	掲載済
2005 波一発 059	誌上	Applied Physics Letters	Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Unidirectional Beam Emission from Strained InGaAsP Multiple-quantum-well Quasistadium Laser Diodes	2005/4/19	有	掲載済
2005 波一発 064	誌上	Journal of Crystal Growth	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu	Optical and Morphological Properties of InAs Quantum Dots Covered with InxGal-xAs Strain-reducing Layers		有	査読中
2005 波一発 067	国内研究会	電子情報通信学会、レーザ・量子エレクトロニクス研究会	清水 均, Shanmugam Saravanan, 吉田 順自, 井部 紗代子 (古河電工), 横内 則之 (古河電工)	長波長帯多層化量子ドットの低閾値電流密度発振	2005/12/9	無	発表済
2005 波一発 069	国内大会	第 66 回応用物理学会学術講演会	福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大), 内橋 啓介 (岡山県立大), 田中 智子, 原山 卓久	GaAs 系擬似スタジアム型半導体レーザの室温 CW 動作	2005/9/7 ~2005/9/11	有	発表済
2005 波一発 072	国際会議	2006 IEEE 18 th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM2006)	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan	Comparison of Buffer Material for InAs Quantum Dots on GaAs Substrate	2006/5/7 ~2006/5/11	有	発表予定

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005 波一発 077	誌上	Applied Physics Letters	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan, Junji Yoshida, Sayoko Ibe (Furukawa Elec.), Noriyuki Yokouchi (Furukawa Elec.)	Comparison between Multilayered InAs Quantum Dot Lasers with Different Dot Density		有	査読中
2005 波一発 078	国際会議	Indium Phosphide & Related Materials Conference 2006 (IPRM2006)	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan, Junji Yoshida, Sayoko Ibe (Furukawa Elec.), Noriyuki Yokouchi (Furukawa Elec.)	Multilayered InAs Quantum Dot Lasers with Different Dot Density	2006/5/7 ~2006/5/11	有	発表予定
2005 波一発 082	国内大会	第 53 回応用物理学関係連 合講演会	清水 均, Shanmugam Saravanan, 吉田 順自, 井 部 紗代子 (古河電工), 横 内 則之 (古河電工)	多層化量子ドットレーザのドッ ト密度依存性	2006/3/22 ~2006/3/26	有	発表済
2005 波一発 083	国内大会	第 53 回応用物理学関係連 合講演会	清水 均, Shanmugam Saravanan	InAs 量子ドットのバッファ 層材料依存性	2006/3/22 ~2006/3/26	有	発表済
2005 波一発 084	誌上	Japanese Journal of Applied Physics	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan, Junji Yoshida, Sayoko Ibe (Furukawa Elec.), Noriyuki Yokouchi (Furukawa Elec.)	Long-Wavelength Multilayered InAs Quantum Dot Lasers		有	査読中

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005波-発085	誌上	Proceedings of SPIE	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu	Long Wavelength Photoluminescence Emission from InAs Quantum Dots Embedded in GaAs Matrix	2006/1/1	有	掲載済
2005波-発086	国内研究会	第3回超高速光エレクトロニクス研究会	原山 卓久	二次元マイクロディスクレーザ の光通信・光計測への応用	2005/11/15 ~2005/11/16	無	発表済
2005波-発087	誌上	Applied Physics Letters	Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Ring and Axis Mode Switching in Multielectrode Strained InGaAsP Multiple-Quantum-Well Quasistadium Laser Diodes	2005/10/31	有	発表済
2005波-発089	国際会議	Indium Phosphide & Related Materials (IPRM 2006)	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu	Stacking of InAs/GaAs QDs with Less Strain by using Growth Interruption	2006/5/7 ~2006/5/11	有	発表予定
2005波-発090	国内研究会	電子情報通信学会、レーザ・量子エレクトロニクス研究会	福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大), 原山 卓久	2次元半導体レーザの発振特性	2005/12/9	無	発表済
2005波-発096	国内大会	第53回応用物理学会関係 連合講演会	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu	Influence of Growth Interruption in Stacked InAs/GaAs Quantum Dots	2006/3/22 ~2006/3/26	有	発表済
2005波-発097	誌上	Physical Review A	Takehiro Fukushima, Takahisa Harayama, Jan Wiersig (Univ. of Bremen)	Ray-Wave Correspondence in an Unstable Quasi-Stadium	2006/2/1	有	掲載済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005波-発100	その他	1.Monthly Seminar of the Center for Controlling Optical Chaos 2.Quantum Transport Seminar	Martina Hentschel	Optical Microresonators: Ray-Wave Correspondence Put to Test	2005/11/23 ~2005/11/25	無	発表済
2005波-発110	国内大会	日本物理学会第61回年次大会	篠原 晋, 原山 卓久	スタジアム型共振器レーザーにおける指向的発振	2006/3/27 ~2006/3/30	有	発表済
2005波-発111	誌上	Nonlinear Phenomenon in Complex Systems	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Numerical Simulations of Two-dimensional Microcavity Lasers; Nonlinear Dynamics of Whispering Gallery Modes		有	掲載決定済(印刷中)
2005波-発112	国内大会	日本物理学会第61回年次大会	田中 智子, Martina Hentschel, 福嶋 丈浩, 原山 卓久	オーバルピリアード型共振器半導体レーザーからの放射パターン	2006/3/27 ~2006/3/30	有	発表済
2005波-発117	国内大会	2006年電子情報通信学会総合大会	田村 修一, 野戸 広之, 稲垣 恵三, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジャイロ(S-FOG)のスケールファクタの経路長及び面積依存性に関する実験	2006/3/24 ~2006/3/27	有	発表済
2005波-発130	国内大会	2006年電子情報通信学会総合大会	野戸 広之, 稲垣 恵三, 田村 修一, 原山 卓久	S-FOGを用いた半導体RLGの小型化の検討	2006/3/24 ~2006/3/27	有	発表済
2005波-発131	誌上	Applied Physics Letters	Muhan Choi, Tomoko Tanaka, Takehiro Fukushima, Takahisa Harayama	Control of Directional Emission in Quasi-Stadium Micro-Cavity Laser Diodes with Two-Electrodes		有	査読中
2005波-発132	国際会議	Conference on Laser and Electro-Optics/ Quantum Electronics Laser Conference 2006	Takehiro Fukushima, Takahisa Harayama	Mode Switching by Optical Injection in Tandem Quasi-Stadium Laser Diodes	2006/5/21 ~2006/5/26	有	発表予定

