# 平成19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: ㈱国際電気通信基礎技術研究所

# 平成20年4月

# 情報通信研究機構

# 平成19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」

目 次

1	研究開発課題の背景
2	研究開発の全体計画 2-1 研究開発課題の概要
3	研究開発体制
4 4	研究開発実施状況 -1 角速度センサチップ最適設計理論の研究の研究開発11
	4-1-1    予備    11      4-1-1-1    位置付け    11      4-1-1-2    研究方針    11
	4-1-2    実施状況    12      4-1-3    達成状況    13      4-1-4    今後の課題    15
4	-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発15 4-2-1 序論
	4-2-1-1    位置付け    15      4-2-1-2    研究方針    15      4-2-2    実施状況    15
4	4-2-3 達成状況
	4-3-1    序論    20      4-3-1-1    位置付け    20      4-3-1-2    研究方針    20
	4-3-2実施状況214-3-3達成状況214-3-4今後の課題25
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	
4-4-1-2 研究方針	
4-4-2 実施状況	
4-4-3 達成状況	
4-4-4 今後の課題	
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	30
4-5-1 序論	
4-5-1-1 位置付け	
4-5-1-2 研究方針	
4-5-2 実施状況	
4-5-3 達成状況	
4-5-4 今後の課題	
4-6 総括	
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、コンテキストア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で、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 ロケットや深海探索艇「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。

また、携帯電話による緊急通報では位置情報検出が特に重要視されるようになりつつあ る。本研究開発成果は位置情報取得を可能にするほど高精度であるため、携帯電話による 緊急通報に役立つことが期待される。実際、総務省は事業用電気通信設備規則を2006年1 月に改正・公布し2007年4月に施行した。改正の大きな柱の一つが、携帯電話からの緊急 通報機能を充実させることである。施行後に発売される3G端末は、原則としてGPSモジュ ールの内蔵が義務付けられている。対応端末から110番/118番/119番へ緊急通報した際 に、通報者の位置情報をGPSで測位し、警察・消防・海上保安本部に自動通知する仕組み が構築される予定である。しかし、通報者が十分な数の衛星を獲得できない場合 GPS での 測位は不可能となるため、基地局位置程度の精度しか得られなくなる。このことは、上記 規則の改正を検討した総務省の情報通信審議会情報通信技術分科会緊急通報機能等高度化 委員会の「携帯電話からの緊急通報における発信者位置情報通知機能に係る技術的条件」 についての報告書第5章「今後の課題」として大きく取り上げられている。したがって、 GPS を補完する位置情報検出システムには大きな社会的ニーズがあり、高精度角速度セン サチップがこのような役割を担うことが期待される。

#### 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付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次元的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ニング技術等により 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 て広がりの幅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 μm、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3µmよりも深い4µm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 140A/cm<sup>2</sup>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 µ 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、レーザプリンタ用の半導体レーザ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1mm/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、半導体レーザの長さを 600 µ 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を確認 でき、しかもレーザ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 µm、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 µ mの垂直端 面を有する単一量子井戸レーザを実現する。

#### 2-2-2-3 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発振の閾値電流密度 200A/cm<sup>2</sup>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1~2 µm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、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 5cm/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							
(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	-	-	-	-	-	-	
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)



- 注) サブテーマ(1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究
  - サブテーマ(2)角速度センサチップ作製技術の研究開発
  - サブテーマ(3)角速度センサチップ制御技術の研究開発
  - サブテーマ(4)回転角速度検出技術の研究開発
  - サブテーマ(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 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

#### 4-1-1 序論

#### 4-1-1-1 位置付け

本研究開発の対象である角速度センサチップは、従来のように1次元共振器を用いてリ ングレーザを構成するのではなく、2次元形状のキャビティの中にリング状のビームパタ ーンを形成することによって実現する。理論的に取り組まなければならない第一の課題は、 共振器から出射されるビームの高品質性を実現するための最適モード設計理論の構築であ る。出射ビームの高品質化によって、時計回り回転波と反時計回り回転波の重ね合せによ る干渉縞を鮮明にすることを可能にする。第二の課題は、複数のモードが引き込むことに よってもたらされる角速度センサの不応答領域の発生、いわゆるロックイン現象を回避す るために、光と物質の相互作用を考慮した2次元レーザの非線形動力学理論を構築するこ とである。この非線形動力学理論は、有効なロックイン回避策を系統的に解明する有力な 手段となる。

#### 4-1-1-2 研究方針

角速度センサチップの目標性能の達成には、角速度センサに有効なリング形レーザ発振 パターンと、自由空間でも広がらない高いビームクオリティが必要である。それを実現す るには、適切なキャビティの形状と、電流注入を行うコンタクトパターンの設計が必要で ある。そのための最適なキャビティ形状を幾何光学や波動光学の理論によって解明する。 そして、最適なコンタクトパターンを求めるために、キャビティ内のモードパターンの計 算を現実のチップサイズに対しても可能にする、新たな高速・高精度モード計算手法の構 築も進める。また、半導体リングレーザジャイロの振る舞いを適切に記述する非線形動力 学理論の数理モデルを構築し、その理論解析および数値シミュレーションを進めることで、 ロックイン現象の定性的および定量的理解を進める。

#### 4-1-2 実施状況

2次元共振器によるレーザ発振の研究は最近の微細加工技術の発展によって可能になっ た、極めて新しい分野である。それゆえ本研究開発を開始した時点では、その基礎理論と 数値計算手法はまだ確立されていなかった。とくに、2次元共振器を回転させる際の物理 的効果に至っては、全く手付かずの状態であった。平成16年度と17年度の研究開発に おいて、2次元共振器モード設計理論の構築、2次元レーザの非線形動力学理論の構築、 その回転系への拡張に取り組んできた。これらによって、2次元共振器レーザ角速度セン サチップ設計と、そこで起こる物理現象の理論解析・制御のために必要な基盤を築いてき た。これらの成果を引き継ぎ、平成19年度は以下の研究を実施した。

まず、モード設計理論に関しては、現実の共振器サイズに対しても高速かつ高精度でモ ード計算可能なガウシアン光学法を発展させたことは大きな成果であった。最終目的実現 のためには、リング軌道モードのビーム品質の向上が重要となるが、その際には、共振器 内部のモードパターンや遠視野像のできるだけ正確な理論値を得ることが必要となる。従 来の Fox-Li 法では、現実の共振器サイズでの計算が可能であるが、大胆な近似が導入され ているために、高い精度は期待できない。一方、境界要素法では、高い精度が実現できる ものの、現実の共振器サイズに対しては、膨大な計算資源が必要となり、事実上計算不可 能である。そこで、現実の共振器サイズに適用可能で、高速かつ高精度でモード計算を行 う潜在性をもった、ガウシアン光学法という比較的新しい計算手法(2002 年に米国エール 大学 Stone 教授の研究グループにより提案)に着目した。この方法が本研究開発で設計す る共振器形状のモード計算に実際に適用可能であることを実証した。

次に、2次元共振器モード理論の回転系への拡張については、一般相対性理論に基づく 回転の効果を考慮したマクスウェル方程式を導出し、さらに、量子力学における近縮退状 態への摂動理論を援用することによって、共振器を極小にした際に発生する新たな物理現 象を明らかにした。それは、ある意味で従来のサニャック効果に補正を加えるものであり、 サニャック効果が発生するためには、回転速度をある閾値以上にしなければならないこと を解明した(2次元微小共振器サニャック理論)。その閾値は、時計回りおよび反時計回り それぞれの回転波モードの縮退の程度に依存し、静止しているときの両モードの固有周波 数差が大きいほど角速度を検出できない不応答領域が大きくなってしまうことが判明した。 この理論結果を検証するための数値シミュレーションを行い、その正しさを実証するとと もに、最適共振器形状を採用したときの課題として予想される全反射モードからの光の取 り出し手法として、リング軌道上にエアギャップを配置する共振器構造を提案した。

最後に、2次元共振器の非線形動力学理論に関しては、光と物質が相互作用する回転リ ングレーザ系の記述の精度を高めるため、シミュレーション結果と実験結果の対応の解析 を進めた。従来のリングレーザジャイロ理論では、アクティブなレーザ媒質は、共振器全 体に分布していると仮定する。このような設定の下では、モード競合によって、時計回り あるいは反時計回りどちらか一方の回転波しか存在できないことを、理論的に示すことが できる。一方、S-FOG実験においてジャイロ機能が実現していることは、実験的には、時 計回りと反時計回り両方の回転波が共存できていることを意味している。そこで、S-FOG においては、レーザ媒質が局所的に存在することが時計・反時計回り回転波の共存を可能 にする要因であることと、レーザ媒質の反転分布の空間分布が、時計・反時計回りのどち らか一方向周波数の発振のダイナミクスに揺らぎを与え、共存が実現しているのではない かということが予想される。これらの効果や、S-FOG実験の知見を取り入れた理論モデル を構成し、数値シミュレーションを進めた。

#### 4-1-3 達成状況

ガウシアン光学法を用いた研究の進展により、現実の共振器パラメータ(実効屈折率 3.3、 光の波長 850nm、共振器幅 600 μm)に対してリング軌道モードを高速かつ高精度で計算 することに成功した。その計算結果(モードパターン)を図4-1と図4-2に示す。さ らに、対応する遠視野像が、共振器端でのモードデータと自由空間グリーン関数を用いて 高精度で計算可能であることも実証することができた。



図4-2.リング軌道モードの共振器端でのモードパターン。光の波長に対して共振器サ イズが非常に大きいため、節と腹のパターンは極め細やかになるが、その細部がうまく計 算できていることが分かる。

次に、回転リングレーザ系での共振器最適設計の達成状況について報告する。上で述べ たように、2次元微小共振器のサニャック理論から、ロックイン領域が無くなるような最 適形状の存在が判明した。そのような共振器におけるリング軌道モードは、共振器素材に 半導体(GaAs)を用いた場合、不可避的に全反射モードになることが導かれる。つまり、 共振器壁でのビームの反射が全ての反射箇所で全反射となる。このようなモードは低損失 になるため、レーザ発振閾値が小さくできるという利点がある一方、共振器外への光の取 り出しが困難になり(第ゼロ近似では、微弱なエヴァネッセント放射のみとなる)、その ままジャイロとして利用した場合、共振器外部へ信号がうまく取り出せるかどうかが問題 となる。そこで、全反射モードから光を取り出す手法として、図4-3に示すようなリン グ軌道上にエアギャップを配置した共振器構造を設計した。この共振器では、リング軌道 の途中(図中の青い矢印)に空気の薄い層があり、そこで屈折率の変化があるために、リ ング軌道上のビームの一部は反射され、共振器外部へ取り出すことが可能となる。エアギ ャップ構造共振器の試作については4-2節で、試作したチップの評価実験の結果につい ては4-3節にて報告する。

最後に、非線形動力学理論に基づいた、モードのロックインを回避する研究の達成状況 について報告する。従来の一般的なレーザモデル方程式をベースにしながら、屈折率変化 による反射効果や熱浴から受ける熱揺らぎなどを考慮に入れた、リングレーザジャイロの 新しいモデル方程式を構成し詳細に調査した。



Symbol	Description	Value
L	Cavity width	600 µm
ΔL	Translation of ray trajectory	0.405 µm
R	Radius of curved mirror	600 µm
W	Width of cap layer area	40 µm
d	Width of air gap	1.35 µm.
W <sub>m</sub>	Width of curved mirror	30 µm
W <sub>c</sub>	Width of contact area	5 µm
α	Incident angle	5*
φ	Angle of sidewall mirror	132°
n <sub>eff</sub>	Effective refractive index	3.3

図4-3. エアギャップ構造2次元共振器とその形状パラメータ。Rと記されている4つ の部分に端面ミラーがあり、その端面ミラーで全反射することによって正方形のリング軌 道モードが構成される。このリング軌道モードは全反射で閉じ込められているために理論 的には低閾値発振することが期待される。正方形リングモードを成す時計回り回転波と反 時計回り回転波(赤線)は、青色の矢印が指す4つのエアギャップによって、光の一部が 反射され、共振器外部に出射される。

S-FOG のような実際のリング共振器ではレーザ媒質の挿入やカプラなどによる屈折率変化 が反射源となるため、回転していないときにも周波数スプリットを生じることになる。そ のため、反射源の効果は対称性による周波数スプリットと同等の効果を持つと推測される。 実際、反射源の効果を含むリング共振器にこの節で述べた線形理論を適用すると、図4-4のような回転角速度依存性が示される。高回転角速度領域では、従来理論のように回転 角速度に比例して周波数差は変化するが、低回転角速度領域では比例関係とならず感度が 低下していることがわかる。いくつかの回転角速度に対して数値計算した結果を図4-5



図4-4. サニャックビート周波数の回転角速度依存性。実線は線形理論により得られた理論であり、黒点は非線形効果を含めたシミュレーションの結果。



図4-5.時計回りモードのみの時間発展から得られたパワースペクトルとその回転 角速度に対する変化。それぞれのスペクトルは回転角速度が小さい順に実線、破線、 点線で示している。片方回転波の振幅の変化にサニャックビートが現れている。

に示す。線形理論による予測がよく再現されていることがわかる。上記議論の実験による 検証、そしてその制御については4-3節で詳述する。以上の結果から、サニャック効果 の非線形理論が実際の実験を再現する適切なモデルであるといえる。

#### 4-1-4 今後の課題

これまでの理論による成果から、2次元共振器レーザ角速度センサチップ設計、および そこで生じる物理現象の解析・制御のための基礎理論と数値計算手法はおおよそ確立する ことができた。これまでもその成果を実際の素子設計に応用してきたが、最終年度にあた る平成20年度には、設計理論の実験による検証結果を受けた解析を進め、角速度センサ のさらなる性能向上に応用する。具体的には、引き続きよりビーム品質の良いモード設計 を進めること、非線形動力学モデルの数値シミュレーションによるロックイン閾値制御パ ラメータ依存の解明とロックイン制御への応用である。

#### 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ことを繰り返すことで、光ジャイロ機能を持った半導体素子を実現す る。実用化を踏まえて、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

本サブテーマの研究目標を達成するためには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ことが重要である。レーザキャビティは MBE 等の結晶成長法で 作製した GaAs/AlGaAs 系半導体レーザ用のエピウエハに対し、RIE 装置を用いたドライ エッチングによって形成される。そのエッチングマスクには任意のレーザキャビティ形状 にパターニングされた SiO<sub>2</sub> 膜を使用する。開発段階におけるレーザキャビティのパターニ ングは様々な形状のキャビティを試作して評価するというフィードバックを早めるため、 直接描画方式である電子線露光装置を主に用いている。電流を注入するための電極やコン タクトのパターンについても同様である。しかし、最終的な実用化段階でのパターニング 工程を考慮してステッパ等の生産性の高い露光技術を用いたレーザ作製プロセスの開発も 進めている。

平成16年度から18年度で様々な構造の GaAs/AlGaAs 系エピウエハに対し、任意の 形状のキャビティでも垂直で滑らかな端面を実現できるエッチング条件を見出した。19 年度は、エッチング条件以外の技術にも着目し、高い再現性で且つ更に滑らかで垂直な端 面を得るため、性能の維持が難しいドライエッチング装置の管理、整備技術とドライエッ チング前のエッチングマスク洗浄技術の向上を図った。

また、2次元レーザにおいてリング軌道モードを発振させるためには、レーザキャビティ上からこのモードのみを励起できるように電流を注入する必要がある。レーザキャビティ上に形成した絶縁膜にコンタクトパターン形状の窓(コンタクト窓)を開け、そこから電流を注入する。このコンタクト窓も含んだ絶縁膜の上に金属薄膜の電極を形成する。コンタクト窓をリング軌道モードの励起に適したパターンに設計することで、ターゲットモードのみをレーザ発振させることができる。絶縁膜にはレーザキャビティの形成時にエッチングマスクとして用いた SiO2 膜をそのまま利用する。ターゲットモードのみ励起できるコンタクト窓のパターン設計には理論によるアプローチが必要である。しかも実際に形成するには高さが数μmのキャビティ上にコンタクト窓のパターニングを行ってからSiO2 膜のドライエッチングを行うため、レーザキャビティ形成時とは異なるエッチング技術の確立も必要である。17年度と18年度で正確にターゲットモードのみをレーザ発振できる最適なコンタクトパターンの形成が可能となった。19年度はコンタクトパターンの最適形状の形成だけでなく、キャビティ形状の形成にも工夫を加えることで、リング軌道モード発振の更なる安定化を試みた。

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。 16年度から18年度でステッパによる描画方式でも2次元形状のレーザキャビティパタ ーン、コンタクト電極パターンなどの複数のパターンが位置ずれを起こすことなく転写で きる技術を確立し、実用化段階においても2次元レーザの生産性に問題が無いことを示し た。これらの技術も含め、19年度からはジャイロ機能を有するチップの開発を開始した。

更に、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。17年度にはリッジ型の量子ドットレーザで両端面 HR コートを施した素子では 非常に低い発振閾値が得られた。19年度はこのエピウエハを用いた2次元レーザの作製 を開始し、そのレーザ作製に必要なプロセス技術の事前検討を行った。

#### 4-2-3 達成状況

これまでより更に滑らかで垂直な端面を有するレーザキャビティを高い再現性で得るため、ドライエッチング前のエッチングマスク洗浄技術の開発に着手した。形成直後(未洗 浄)のエッチングマスクの端面付近を撮影した電子顕微鏡写真を図4-6(a)に示す。 SiO2膜のエッチングによって生じたと思われる残渣が付着しているのがわかる。この残渣 は不規則に生じるため、その後のレーザキャビティ形成において、ドライエッチングの仕 上がりの再現性を悪くする要因となっていた。ドライエッチングの条件が適切であっても、 安定に且つ滑らかなエッチングマスク端面を形成できないと、良好な端面を高い再現性で 得るのは難しい。そのため、エッチングマスクの洗浄処理技術を確立して端面の仕上がり の再現性向上を試みた。一般に半導体の洗浄処理技術には液体薬品によるウェット洗浄、 液体を使用せず乾式で行うドライ洗浄など様々な手法が存在する。その中から試料に損傷 を与えずに残渣だけが除去できる手法を探索する必要があった。試行錯誤の結果、有機ア ルカリ系液体薬品と超音波洗浄の併用による手法を確立することができた。試料の損傷を 与えずに残渣の完全な除去が成されていること、マスク端面の滑らかさが向上している様 子を図4-6(b)に示す。これにより、レーザキャビティ形成におけるドライエッチン グの仕上がりの再現性を格段に高くすることに成功した。更に、ドライエッチング装置エ ッチング室内のワイピングクリーニング技術や、レーザキャビティ形成におけるプレエッ チング技術を確立したことで、室内汚染の進行とエッチング時の異常放電を防ぐことがで き、エッチング速度の安定化にも成功した。



図4-6. エッチングマスクの電子顕微鏡写真(a)洗浄前(b)洗浄後



図4-7. 擬似スタジアム型2次元半導体レーザ

設計理論から要求されるリング軌道モードのみを発振する半導体レーザチップの作製は、 コンタクト窓を設計通りに形成することである程度は可能になった。しかし、電流注入量 に依存する半導体レーザウェハのコンタクト層の電流拡がりなどの問題もあり、完全に所 望のモードだけを励起することは容易ではない。例えば図4-7に示した擬似スタジアム 型と呼ばれる2次元レーザにおいては、図4-8(a)に示したようにコンタクトの窓が 広いと実験による遠視野像が高次モードや長軸方向に局在する軸モード等が励起される。 しかし、ビームクオリティの良いリング軌道モードのレーザ発振特性を活かすためには、 最低次以外のリング軌道モードや軸モードをレーザ発振させることなく、最低次のモード のみをレーザ発振させる必要がある。これまでの研究により、適切なコンタクト窓形状の 場合は図4-8(b)のように理論と実験による遠視野像が非常によく一致する結果が得 られ、実際に高いビームクオリティを実現することができた。



図4-8. 遠視野像の理論(赤)と実験(黒)の比較 (a) コンタクトの窓が広い場合 (b) 最適なコンタクト窓パターンの場合

しかし、注入電流を増加させると電流の拡がりが大きくなり、適切なコンタクト窓形状 であっても長軸方向に局在する軸モードや高次モードが励起されてしまう。最低次のリン グ軌道モードのみが安定して励起されるように、p電極より下のコンタクト層やクラッド 層での電流拡がりを抑制する工夫の必要があると考えられる。そこで、従来の擬似スタジ アム型2次元半導体レーザのキャビティ中心部に孔を開けることで電流の拡がりを抑える ことを試みた。図4-9(a)は中心部に孔を開けた場合のレーザキャビティとコンタク ト窓の形状、図4-9(b)は実際に試作したチップの電子顕微鏡写真である。図4-1 1は試作したレーザのビームクオリティを評価するために、レーザ光の遠視野像を測定し たもので、従来の孔を開けていないキャビティの測定結果を図4-10(a)に、孔の開 いたキャビティでの測定結果を図4-10(b)に示す。図4-10(a)に比べて、図



図4-9.(a) 孔を開けたキャビティとコンタクト窓の形状(b) 電子顕微鏡写真



図4-10. 遠視野像の実験結果 (a) 孔無し (b) 孔有り

4-10(b)では軸モードや高次のリング軌道モードの励起が抑えられていることが確認できる。このことから、適切なコンタクト窓形状の設計にキャビティの形成工程での工夫を加えることで、高いビームクオリティを持つレーザチップの更なる安定化が可能となった。

次に、4-1節で述べたエアギャップ構造を導入した新しい2次元レーザチップの試作 について報告する。図4-11に示すように、このチップはキャビティ形状の対称性を考 慮して4つの曲面ミラーで構成されていて、その4つのミラーの反射によってリングレー ザが形成される。そのリング軌道上には干渉光を取り出すためのエアギャップがキャビテ ィと同じ工程で形成される。その作製工程を図4-12に示す。エアギャップはキャビテ ィ内部の全反射モードを外部に抽出できるように形成されている。詳細は4-3節で報告 するが、エアギャップ構造を導入することで2つの出射光による干渉縞を確認することに 成功した。

量子ドットレーザのエピウエハを用いた2次元レーザ作製については、そのレーザ作製 に必要なプロセス技術の事前検討を行い、GaAs/AlGaAsの材料系であれば2次元形状のレ ーザキャビティを垂直で滑らかな端面を実現できるエッチング条件を見出すことに成功し た。



図4-11. エアギャップ構造2次元半導体レーザ



図4-12. エアギャップ構造2次元半導体レーザの作製工程 (a) コンタクト層をリン グ軌道に沿ってエッチング (b)SiO<sub>2</sub> 膜のエッチングマスクによるキャビティとエアギ ャップの形成 (c) コンタクト窓と p 電極の形成 (d) 基板の研磨と n 電極の形成

#### 4-2-4 今後の課題

2次元マイクロキャビティレーザの作製については、平滑で垂直な端面ミラーを高い再 現性で形成する技術を確立できた。今後はSiO2のエッチングマスクの厚膜化を図ることで エッチング耐性を高め、滑らかさと垂直性を損なわずにこれまでよりも深いエッチング端 面の形成を目指す。これにより、最終目標に設定した85nmの精度で滑らかな深さ4µm の垂直端面を有する2次元形状のレーザキャビティの作製を実現し、端面の荒れによる損 失を限りなく低減させた2次元レーザによる低閾値発振が期待できる。そして、設計理論 のさらなる成果を取り入れ、サニャック効果が生じるようなリング軌道モードのみをレー ザ発振させることも目指す。その際にはダイボンディング、ワイヤボンディングなどの後 工程、チップの実装なども考慮しながらチップの設計と作製を進めることも重要である。

#### 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。この新しいレーザの利用を可能にするためには、発振特性を詳しく評価し、これを制御する技術を確立することが重要である。最終的に角速度センサとして機能するためには、狭いスペクトル線幅を持ち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による正確な干

渉縞を近視野像に形成し、観測できることが重要である。そして、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を用いたレーザであるので、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

本研究開発で用いる2次元マイクロキャビティ半導体レーザは特にエピウエハを限定し ないが、なるべく発振の閾値は低い方がよい。このため、エピウエハの性能をブロードレ ーザによって評価しておくことが重要である。17年度には様々なパラメータのブロードレ ーザを作製し、閾値電流密度特性を調べた。18年度には150~170A/cm<sup>2</sup>という低閾値電 流密度が得られ室温連続発振が可能となった。

また、2つの異なる方向に回転する発振モード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ている。18年度はこの2つの発振モードにより形成される 端面での近視野像を1~2μm間隔の規則正しい干渉縞として観測する事ができた。

2次元マイクロキャビティレーザの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、遠視野像である。特に2次元マイクロキャビティレーザは出力光 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・ 作製へできる限り早くフィードバックする必要がある。そこで、17 年度はレーザ発振特 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。1 8年度はこれらを用いて、サブテーマ(2)で作製される素子の評価をし、その結果を回 転実験・素子設計・作製に効率的に反映させることで、対称性の良い形状で共振器損失の 低いデバイス設計を進めてきた。19年度はこの成果を元に、エアギャップ構造2次元レ ーザ素子、Active/Passive 構造リング共振器レーザ素子の試作をし、評価を進めてきた。

最終的に実用化する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次元マイクロキャビティレーザの持つパラメータとの関 係はまだ完全には解明されていない。このようなパラメータ依存性を定性的・定量的に調 べるために、より扱い易い半導体リングレーザとして S-FOG を用いた実験を平行して行 ってきた。19年度はこの実験系を用いてジャイロ性能のパラメータ依存性を系統的に調 べるための実験系の構築・評価を行った。そして、その結果は順次デバイス設計にフィー ドバックし、試作作製・評価を行った。

#### 4-3-3 達成状況

エアギャップ構造2次元レーザ素子について、4-1節で理論設計、4-2節にて作製 工程の報告を行った。これは2次元微小共振器のサニャック理論から導出した、低回転角 速度領域でのロックインがなくなるような対称性を持たせながら、発振させるリング軌道 上にエアギャップを配置することで干渉光の取り出しが容易になるように考案したもので ある。このエアギャップ構造2次元レーザ素子の特性についての評価実験を行った。

この素子の I-L 特性の測定結果を図4-13に示す。この素子は共振器全体が利得媒質 となっており、サイズも大きく半導体内部損失が大きくなるため閾値電流値が 349mA と 高い値を示したが、室温での連続発振が確認された。発振光の光スペクトルを図4-14 に示す。時計回り・反時計回りの2つのモードのレーザ発振光は一部をエアギャップで反 射させることで外部での観測を可能にしている。連続発振時には、取り出されたレーザ光 からは設計通りに干渉パターンを観測することができた。観測された遠方界パターンを図 4-15に示す。遠方界パターンの間隔から、この干渉パターンが時計回り・半時計回り



図4-13. エアギャップ構造2次元レーザ素子のI-L 特性。赤線は実際の 測定データ。点線は発振閾値を推定するための補外直線で横軸との交点が推 定される発振閾値電流量となる。

の発振モード間の干渉により生じたものである事を確認した。

半導体レーザジャイロチップを実現するもう一つのアプローチとして、これまで詳しく 調べてきた S-FOG をそのまま小型化するという方法が考えられる。これを実現するため



図4-15.エアギャップ構造2Dマイクロキャビティレーザ素子からの放射パターン (a) 広領域 (b) 狭領域



図4-16. Active/Passive 集積型リングレーザの概念図

に Active/Passive 集積型チップを考案し、設計と試作を行った。図4-16に示すように、 このデバイスは S-FOG と同様なリング形状の光導波路によって構成される。リング型光 導波路の一部には光を励起するための Active 領域を設け、それ以外は光を導波するのみの Passive 領域で構成する。このリング形光導波路は RIE 装置を用いたドライエッチングに よってリッジ形に形成することで作製を行う。また Passive 導波路部分には発振波長の光 に対しては透明な半導体を用いる。

本試作では装荷型と呼ばれる構造を採用した。図4-17に示すように、Passive 層の上のActive 層を部分的に残すことでActive 領域を形成する。それゆえ Active 部と Passive 部の導波路コアの位置合わせがしやすく、作製が容易となる。



図4-17.装荷型構造

図4-18に試作した素子構造を示す。このデバイスは2つの半円と直線で構成される レーストラック型リング形状を有している。半円部分の直径 D が 5mm、6.4mm、9.3mm の3種類のものを作製した。Active 部である SOA の長さは 1.5mm であり、長さ 2.1mm の Passive 導波路の直線部分に設置している。また、2つの半円部分にはそれぞれ直線導 波路が近接している。リング型共振器内で発振したレーザ光の一部はこれらの直線導波路 に結合し、両端の PD で検出することができる。



図 4 - 1 8. 試作した Active Passive 構造リングレーザの構造



図4-19. 試作した Active/Passive 構造リングレーザの写真

図4-19(a)は実際に作製した素子の写真である。この素子の直径 D は 5mm であ る。図4-19(b)に示すように試作した素子はヒートシンクに設置し、ペルチェを用 いて温度制御できるようになっている。また、外部に光を取り出せるよう、光ファイバを 結合導波路の一端に結合させている。

このようにサイズの大きい導波路全体にわたって均一なリッジ型の導波路を作製し、結 晶再成長を行い、電極を形成することは難しい。特に共振器全体のエッチング端面の垂直 性・平滑性が得られない場合には、散乱損失が大きくなりレーザ発振が起こらない。この ように作製プロセスは非常に困難であるが、ジャイロチップとして角速度検出の感度を大 きくするにはサイズが大きいほうが望ましいため、上記のような大きなサイズでのチップ の試作・評価を行った。

これらの素子に電流を注入し、試作した素子が実際にレーザ発振することを確認した。 例として直径 5mm の Active/Passive リングレーザの I-L 曲線を図4-20に示す。この ような共振器長が 20mm 程度、もしくはそれ以上という大きなサイズの半導体リングレー ザでのレーザ発振が確認されたのは世界初のことである。発振スペクトルを図4-21に 示す。モード間隔は 25pm になっており、共振器長から計算される縦モード間隔に一致し ている。このことから、試作した素子が設計どおりに周回モードで発振していることがわ かる。

しかし、この試作チップを用いてレートテーブルを使用した回転実験を行うも、回転角 速度に対応するビート信号を検出するには至っていない。S-FOGの実験との比較から、装 荷型構造での Active 領域と Passive 媒質の境界の導波損失が大きい事が、このチップでの ジャイロ信号が得られなかった原因であると推定している。







図4-22. Butt-Joint 型構造

上記の問題を解決するために、19年度下半期は図4-22に示すようなButt-Joint構造の検討を行った。ビーム伝搬法による数値計算を用いた事前評価では、Active/Passive 境界領域での損失の値が装荷型の場合は約4dB、Butt-Joint構造の場合には約0.12dBとなり、Butt-Joint構造の方が装荷構造よりも圧倒的に損失が小さくなることが推定された。 この結果をもとに、リング型共振器を直線導波路や曲がり導波路、結合導波路及び Active/Passive 境界領域の各部分に分けて試作し、それぞれの損失についての評価、そし て新たに採用したプロセスの最適化の評価を行った。その結果、Active/Passive 接続部で の損失が0.85dBと見積もることができ、シミュレーションで予測された値よりも大きい ものの、前回のActive/Passive素子試作と比較しても十分に低損失な接続が可能であるこ とがわかった。この試作による評価結果をもとに、次の試作ではButt-Joint構造による Active/Passiveリング型共振器半導体レーザの試作を行う予定である。

チップによる半導体レーザジャイロの実現は現在進めており、チップの設計理論・作製 技術・制御技術に関しては先述のように順調に確立している。最終年度は、これまでの成 果に S-FOG から得られる知見を合わせることで半導体レーザジャイロのチップ化を達成 する。

#### 4-3-4 今後の課題

19年度までの研究によって2次元マイクロキャビティレーザの基本的な特性の評価方法を確立することができた。研究開発開始当初は、従来の1次元的なレーザ共振器に側壁を設けた、細長い形状の2次元共振器を重点において検討してきた。これは、特性の評価方法の確立の観点からは従来レーザと大きく異ならない発振特性を持つような2次元レーザが適切であるという判断と、この時点ではレーザジャイロに最適なキャビティ形状が明らかではなかったことによる。18年度は理論的な考察を進めた結果から、より高い対称性を持つ2次元キャビティを設計し試作したが、この素子でもジャイロ信号を検出するに至っていない。19年度は共振器内部損失の低減化に向けてActive/Passive構造の素子の検討、評価を行ってきたが、まだ十分な損失低減化には達していない。しかし、19年度下半期に試作したButt-Joint型Active/Passive素子では、結合部分での損失が大きく低減される事が分かった。今後はこの構造を採用し、サイズなどのパラメータを最適化したリングレーザの設計・試作及び評価を進めていく。これに先行して、損失の低減を含めた、ジャイロチップ設計に必要な各種パラメータを決定するための作業をS-FOGの実験系を用いて詳細に検討し、より対称性の高い共振器形状、内部損失を低減した共振器構造の半導体リングレーザ素子の制御技術を確立し設計・試作にフィードバックしていく。

#### 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

本研究開発は、2次元マイクロキャビティレーザを用いた半導体レーザジャイロの実用 化を目指している。そのためには、2次元マイクロキャビティレーザの製作技術の研究開 発及び作製を進める上で必要な、2次元レーザの各種パラメータとジャイロ性能の関係を 解明することが重要である。そこで、さまざまな構成の半導体レーザジャイロを構築し、 詳細に調査することでジャイロ性能を向上させる方法を探る。それには、これまでの研究 で実現してきた S-FOG を用いるのが有用である。得られた知見はジャイロ用2次元レー ザの理論や設計に反映させることで、ジャイロ性能向上に活用する。

#### 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。最終的には、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させることになる。18年度までに、S-FOG を 用いた単知な調査を行い、実験が従来の理論と多くの点で一致することを示し、半導体を 用いたリングレーザジャイロが実際に機能することを明らかにした。19年度は、S-FOG に関する回転実験を数多く行い、ジャイロ性能に影響を及ぼす各種要因についての検討を 行った。特に、低回転角速度領域におけるビート信号の振る舞いや、回転角速度の検出精 度を決める重要な要因の一つである、ビートスペクトルの線幅とリングキャビティのQ値 の関係については重点的に調査を行った。これらの知見を元にした、これまでの10分の 1サイズの S-FOG を実現することで、2次元レーザの小型化への検討を行った。また、 2次元レーザの特性評価に必須となる、4-3節で作製したレーザを回転実験ができるよ うな実験系を構築した。ここで得られた知見はジャイロ用2次元レーザの設計に活用する。

#### 4-4-3 達成状況

S-FOG 実験系を図4-23に示す。SOA 両端の光ファイバピグテールを分岐比 99:1 或 いは 95:5 といったわずかの光を取り出すカプラに接続することで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、両光波によるビート信号を得る。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する。

18年度までは、従来非常に難しいと考えられていた半導体をレーザ媒質に用いたリン グレーザジャイロが実現できることを、世界で初めて示し、S-FOGを用いて基本的なパラ メータ依存性を詳しく調べた。これまでの実験結果の蓄積を元に、19年度はジャイロ性 能を制御するパラメータの調査を S-FOG を用いて行った。

まず、S-FOGの低回転角速度領域におけるビート信号の角速度依存性と、ビートスペクトルの線幅とリングキャビティのQ値依存性について詳細に調べた。従来から議論されているサニャック効果によるビート信号周波数Δfと回転角速度Ωの関係は、リングキャビティの囲む面積A、リングキャビティの光路長P、リングキャビティの屈折率n、リングレーザの発振波長λを用いて、



図4-23. S-FOG 実験系の構成

$$\Delta f = \frac{4A}{n\lambda P}\Omega\tag{4-1}$$

で表される。比例係数に対応する部分がジャイロの検出感度に関係するスケールファクタ である。18年度までの研究では式(4-1)中の各パラメータ依存性を詳しく調べ、全 ての実験結果が式(4-1)を満足することを示した。一方本年度は、2次元レーザを用 いたジャイロの実現により重要である低回転角速度領域をより詳細に調査し、その結果、 S-FOG のリングキャビティ内部に反射源があることがスケールファクタを小さくさせ回 転角速度検出感度を低下させる原因になることを明らかにした。

低回転角速度領域におけるビート信号の回転角速度依存性の典型例を図4-24に示す。 低回転角速度になるほど、ビート信号は式(4-1)から外れ、スケールファクタも低下 することがわかる。この図に示すように、従来のHe-Neリングレーザジャイロで生じるロ ックイン現象と異なる新たな角速度検出感度を低下させる現象を発見した。

この現象は4-1節で示した理論を S-FOG に適用できるよう拡張することで説明できる。その理論によれば、光路中に反射源を含むリングキャビティではビート信号 *Δ* f の回転



図4-24. ビート信号の回転角速度依存性

角速度依存性が次のように修正される:

$$\Delta f = \sqrt{SF^2 \Omega^2 + \Delta f_0^2} \tag{4-2}$$

ここで SF はスケールファクタ、 $\Omega$ は回転角速度、そして  $\Delta f_0$ は回転角速度  $\Omega$  が 0 の時のビート信号であり、次のように見積もることができる:

$$\Delta f_0 = \frac{c}{n\pi P} \sqrt{\gamma} \tag{4-3}$$

ここで、nは屈折率、cは光速度、Pはリングキャビティの周長、そしてγはリングキャビ ティ内部にある反射源の反射率である。S-FOGの場合、その反射源はSOAと光ファイバ 間の結合部等に対応する。図4-24で示したビート信号の回転角速度依存性はS-FOG のパラメータを代入した式(4-2)とよく一致する。式(4-3)によれば反射率を小 さくすることにより $\Delta f_0$ も小さくすることができるはずである。しかし、SOA モジュール 内部の反射率を変化させることは容易でない。そこで、リング導波路を長くすることによ り実効的に反射率を変化させて $\Delta f_0$ を小さくできることをS-FOGによって確認した。その 結果を図4-25に示す。



 $図 4 - 25. \Delta f_0$ のパス長依存性

図4-26. Q值 vs. 線幅

次に、回転角速度の検出精度を決める重要な要素の一つであるビートスペクトルの線幅 とリングキャビティのQ値との関係について報告する。図4-26にはリングキャビティ の周長によってQ値を変化させた場合のビートスペクトルの線幅の変化について示す。こ の結果が示すように、Q値の2乗に反比例して線幅が狭くなることがわかる。Q値を決定 する要因の一つは、SOAと光ファイバの間の結合効率である。結合効率が悪くなるほどキ ャビティ内の光の閉じこめが悪くなるため、Q値は低下する。さらにQ値の低下はレーザ 発振閾値を増加させる要因となる。表4-1にはSOA-光ファイバ間の結合効率が異なる、 2つの SOA モジュールにおける線幅と結合効率との関係を比較した。SOA モジュール1 を用いたリングレーザでは、その発振閾値がモジュール2に比べて約 18mA も高い。この 閾値から見積もられる SOA モジュール1と2の結合効率は、それぞれ 23.4%と 34.0%で

	閾値電流 [mA]	結合効率[%]	半値全幅 [kHz]
SOA1	67.9	23.4	13.4
SOA2	50.0	34.0	7.92

表4-1. SOA とファイバ間の結合効率と線幅との関係

ある。よって、この S-FOG では結合効率が 10.6%高くなると、線幅が約 4.8kHz 狭くなることがわかった。

以上の結果から、SOA と光ファイバの結合部による反射および結合効率、キャビティ内の損失がジャイロ性能を決定する重要な要因であることが明らかになった。ここで得られた知見は、特に Active/Passive 集積型センサチップ設計の重要な指針となる。

次にバイアス安定性について報告する。バイアス安定性とはビートスペクトルのピークの時間的な安定性である。一定の角速度で回転している場合にこのピーク位置が変動すると、その変動分だけ角速度誤差が生じてしまう。そのため、この変動を小さく抑えることが重要となる。18年度は、約5分間の回転実験において、ビートスペクトルピーク位置の変動は、±0.1°/秒以内に留めることができた。19年度は、Q値を向上させるように改良を加えたS-FOGのバイアス安定性を評価した。このS-FOGにおける、バイアス安定性の評価実験の典型的な例を図4-27に示す。

このときの約20分間の経過から、ビートスペクトルピーク位置の変動は、±0.1°/秒以内に留まっていることが見て取れる。この図より、ある程度長期にわたってもバイアス安定性0.1°/秒が実現していることが確認された。18年度に報告した評価結果と同様の5分間までに限れば、ほぼ±0.02°/秒以内に留まっており、改善による効果が現れていることがわかる。改善を完成させて、安定した実験系及び安定したS-FOGを用いることにより、今後更なるバイアス安定性を実現することが可能である。



図4-27. バイアス安定性



次に、S-FOG の小型化への検討について報告する。これまでの実験で用いていた S-FOG のサイズは直径が約 1.2mの大きな円盤に配置した、かなり大きなものである。 2次元マイクロキャビティ半導体レーザチップを用いたジャイロセンサの実現には、実 験で用いていた S-FOG の実験装置に比べて格段の小型化が必須である。その足がかりと して、Q 値を改善した S-FOG を用いた、現状では可能な限りの小型化を実施した。図4 -28に検討した小型 S-FOG の外観写真を示す。長辺の長さは 28cm であり、中に収め たリングの直径はおよそ 15cm である。図4-29はこの小型 S-FOG を回転させたとき の回転角速度とビート信号ピーク周波数との関係であり、両者が比例関係にあることが 判る。これにより Q 値を改善することがジャイロセンサの小型化に有効であることが判 った。現状ではキャビティ長を長くすることで Q 値を改善したが、今後はキャビティ内 の損失の低減等、他の制御パラメータを利用して Q 値を改善することによって更なる小 型化が可能となる。そして、これらの知見の適用によって、2次元マイクロキャビティ半 導体レーザチップでのジャイロセンサ実現を目指す。

#### 4-4-4 今後の課題

今年度の研究開発によって、半導体によるリングレーザジャイロセンサの性能を制御す るパラメータとその性能との関係が明らかになった。また、この知見を基にした改良を行 うことによって、バイアス安定性をさらに向上させることが可能となった。最終年度は、 さらにパラメータと性能の関係を詳しく調べ、小型半導体レーザジャイロ実現のための設 計指針を明らかにする。

#### 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

#### 4-5-1-1 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、モバイル端末等に応 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も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でも様々 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 と組み合わせた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 を用いるのがよいと考え られる。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、高精度のファイバオプティックジャイロ と He-Ne のリングレーザジャイロがある。そこで、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、それがランダムォーク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 る必要がある。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 差解析を行えばジャイロ性能をより向上させることができる。つまり、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ことが可能となると期待される。

17年度、GPS と慣性計測部をハイブリッドする方式として、推定した各誤差を慣性航 法演算にフィードバックし、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クローズドループ方式を用いるのが最適であることが明らかになっ た。18年度はこれらを実装したハイブリッドシステムを試作した。19年度は位置推定 計算の残存誤差を生じさせている要因を分析し、システムに内在した主な誤差要因を特定 することで位置精度を向上させた。

#### 4-5-3 達成状況

19年度は、ハイブリッド位置計測システムの残存誤差要因を解明するために、RTK-GPS による計測を基にしたデータ分析を行なった。対象としているハイブリッド位置計測シス テムの概要を図4-30に示す。例として4つの地点間の直線移動を基本とした実験(図4 -34(a)矩形の走行パターンに相当)の場合の東西南北方向の計測誤差の分布を図4-31(a)に示す。カルマンフィルタが理論通りに機能して GPS 計測と慣性計測を統合化 していれば、図の誤差分布は測定時の運動方向に依存せず、東西南北方向に正規分布を示



図4-30 ハイブリッド位置計測システム



図4-31 走行パターン「矩形」の計測データに対する計測誤差分布の改善

すはずである。しかし実測値を精査すると、計測誤差分布が大きく4つの集団に分かれて おり、明らかに移動方向の影響を示している。

図4-32(a)に GPS 計測と慣性計測の位置の差の時間的変化の一例をグラフで示す。 走行パターンは図4-34(b)に相当している。横軸は計測時刻であり、縦軸は経度、 緯度の差を示している。GPS 計測の時間間隔が1秒であるため、この GPS 計測のブランク となる1秒間は慣性計測で位置推定することになる。1秒間隔で受信した GPS 計測の位置 と慣性計測の差に注目すると、必ずしも慣性計測の延長上の位置と GPS 計測の位置が一致 して誤差が0付近となってはいない。さらに、その位置誤差には運動方向に依存した特定



図 4-32 GPS 計測と慣性計測の緯度の差、経度の差の時系列変化



図4-33 緯度方向と経度方向の GPS 計測と慣性計測の差の変化

のバイアスがかかっている。

この誤差を緯度経度方向に視覚化してプロットすると、図4-33のように放射状の誤 差を示す。カルマンフィルタを用いている限り、少なくとも GPS 計測と慣性計測がほぼー 致する1秒間に1回は、同時に計測した計測点は原点を中心とした正規分布となるはずで ある。しかし、図4-33によれば円形走行パターンの移動方向に依存したドーナツ状の プロットを示し、原点付近に空白が生じていることがわかる。いいかえると、前述した運 動方向に依存した特定の誤差バイアスが生じていることがわかる。

この原因は GPS 計測の時刻と慣性計測の時刻の間に時間差があることによる。つまり、 GPS 計測の時刻と慣性センサの計測時刻に一定の時間差があり、この時間差の間の移動方 向に移動速度に比例した距離だけ、一定の誤差が生じていることによる。

図4-32(b)に、この計測時刻の時間差を補正した場合の GPS 計測と慣性計測の 位置の差の時間的変化の一例をグラフで示す。計測時刻の時間差を考慮することにより、1 秒間隔の互いの計測値がよく一致することがわかる。こうして、GPS と慣性センサの時間 差を補正するような計測値間の補正処理を考案して実行した結果、図4-31(b)に示 すような運動方向に依存しない誤差分布となり、位置精度の向上を確認することができた。

この補正処理の有効性を確認するために、さまざまな計測条件で得た実験データに対し てこの時間差の補正処理を行い、処理の前後の誤差の評価を行った。データ収集実験の条 件として図4-34に示すような4種類の走行パターンで実験を行った。図4-35(a), (b),(c)には、それぞれ南北方向、東西方向、ラジアル方向の誤差について、4つの 各走行パターンに対して補正処理前後の精度を比較したグラフを示す。ほとんどのグラフ で補正処理後のほうが誤差が減少しており、考案した補正処理が有効であることが確認さ れた。

#### 4-5-4 今後の課題

ハイブリッド位置計測での慣性センサと RTK-GPS 位置計測時刻のわずかなずれを補正す ることで、位置計測精度を向上させることができた。この位置計測精度は既に最終目標レ ベルに達している。一方、データ更新時間は中間報告の水準にとどまっており、20年度 はデータ更新時間の短縮に注力する。現在のハイブリッド計測装置の観測時間や内部処理 を高速化することは大幅なコストの増大を招くため、現実的ではない。したがって、現在 のハイブリッド計測装置のデータの分析をさらに進め、システム特性をより精査し、計測 データからの位置推定精度をより向上させることによって、データ更新時間の短縮を実現 する。



図4-34 データ収集実験における4種類の走行パターン





0.05 (WSWW) 0.05 (WSWW) 0.05 (WSWW) 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.05 0.02 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.03

図4-35 位置測定実験での各方向の誤差と補正処理後の誤差の改善

#### 4-6 総括

本年度の研究開発の最も重要な成果は、S-FOG の性能を左右する重要なパラメータを特定することができたことである。それらは、半導体光増幅器と光ファイバとの結合部分における反射と損失であり、前者は最小入力角速度に、後者は分解能とバイアス安定性に大きな影響を与えることが実験により明らかになった。また、リングレーザ全体の損失としては、光ファイバの長さによって上記結合部分の損失をカバーすることができることがわかった。これらの知見に基付き設計することで、昨年度まで1メートルであったリングの直径を15cmまで小型化してジャイロ性能を観測することに成功したことは大きな進歩である。このようなアプローチを発展させることで、超小型リングレーザジャイロが可能となるものと期待できる。

また、S-FOG の実験により得られた知見を理論的に解明する研究も進み、従来のサニャック効果に対して、半導体光増幅器と光ファイバとの結合部分における反射と損失がどのようなずれを生じさせるかが理論的に明らかになった。この理論は S-FOG に限らずリング

レーザジャイロー般に適用でき、超小型リングレーザジャイロの設計で重要となる。また、 ガウシアン光学法を用いた2次元レーザのリングモード設計法も確立することができた。 以上のように超小型リングレーザジャイロの設計が明らかになりつつあるが、それらの

以上のように超小型リングレーサンヤイロの設計が明らかになりうつあるか、それらの 設計要求を満足する作製技術も本年度順調に確立することができた。たとえば、上述のよ うにジャイロ性能にはレーザキャビティのQ値が重要であり、端面の荒れは散乱損失を生 じさせるため、出来る限り平滑化することが必要であることがわかった。これに対して、 エッチングマスクの洗浄方法を工夫するなど、細かなプロセス精度を向上させることによ って、ドライエッチングによる滑らかな端面形成が可能となった。他にも、確実にリング モードを発振できるよう新たに2次元レーザ中心部を空洞化する方法の確立や、アクティ ブなレーザ媒質部分とパッシブな光導波路部分をモノリシックに作製する技術の確立など、 超小型リングレーザジャイロを作製するための技術開発が進展した。

今後は、S-FOG 実験により得られた知見とこれまで確立した理論的な方法を最大限活用 することで超小型リングレーザジャイロを設計し、本年度までに確立した技術によって作 製し、ジャイロ性能の向上を目指すことが重要である。

#### 5 参考資料・参考文献

### 5-1 研究発表・講演等一覧

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
0213070105001	国際会議	Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference	Shanmugam Saravanan and Takashisa Harayama	Effect of growth interruption during the growth of InAs/GaAs QDs	$2007/6/17 \sim$ 2007/6/22	有	発表済
0213070319001	国際会議	Conference on Laser and Electro-Optics/Quantu m Electronics Laser Conference 2007 (CLEO/QELS'07)	Takehiro Fukushima(ATR/Okayama Pref. Univ.) and Takahisa Harayama	Axis and Ring Mode Switching in Multi-Electrode GaAs Quasi-Stadium Laser Diodes	$2007/5/6 \sim$ 2007/5/11	有	発表済
0213070328001	国際会議	The 7th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics	Muhan Choi, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ.) and Takahisa Harayama	Alternate oscillations with $\pi$ phase difference in Quasi-Stadium Laser Diode	$2007/8/26 \sim$ 2007/8/31	有	発表済
0213070328002	国際会議	The 7th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics	Takahisa Harayama and Satoshi Sunada	Rotating optical microcavities	$2007/8/26 \sim 2007/8/31$	有	発表済
0213070328003	誌上	Progress of Theoretical Physics Supplement	Takahisa Harayama, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ.), Satoshi Sunada and Kensuke S. Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Chaos and multi-attractors in fully chaotic 2D microcavity lasers	2007/4/1 ~	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
0213070328005	国際会議	SPIE Optics East	Shuichi Tamura, Keizo Inagaki, Hiroyuki Noto and Takahisa Harayama	Experimental Investigation of Sagnac Beat Signals using Semiconductor Fiber-Optic Ring Laser Gyroscope (S-FOG) based on Semiconductor Optical Amplifier (SOA)	$2007/9/9 \sim$ 2007/9/12	有	発表済
0213070330003	誌上	Optics Letters	Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	High quality lowest loss mode lasing in GaAs unstable resonator quasi-stadium laser diodes	2007/11/20 ~	有	発表済
0213070424007	国際会議	9th International Conference on Transparent Optical Networks	Muhan Choi, Takehiro Fukushima(ATR/Okayama Pref. Univ.) and Takahisa Harayama	Two Mode Interactions in Quasi-Stadium Laser Diodes	$2007/7/1 \sim 2007/7/5$	有	発表済
0213070514001	国際会議	9th International Conference on Transparent Optical Networks	Susumu Shinohara and Takahisa Harayama	Ray-Wave Correspondence in Stadium-Shaped Optical Cavities	$2007/7/1 \sim 2007/7/5$	有	発表済
0213070525001	国内大会	日本物理学会 第62回年 次大会	篠原 晋, 福嶋 丈浩 (ATR/ 岡山県立大学), 原山 卓久	スタジアム型共振器によるレー ザー発振:理論と実験の対応	$2007/9/21 \sim 2007/9/24$	有	発表済
0213070530001	国内研究会	電子情報通信学会 非 線形問題研究会(NLP)	篠原 晋, 福嶋 丈浩 (ATR/ 岡山県立大学), 原山 卓久	カオス共振器レーザー	$2007/8/6 \sim 2007/8/7$	有	発表済
0213070530002	国際会議	Optical microcavities: From rays to waves. From passive to active.	Susumu Shinohara and Takahisa Harayama	Ray-wave correspondence in stadium-shaped optical cavities	$2007/7/6 \sim 2007/7/13$	招待	発表済
0213070530003	国際会議	Optical microcavities: From rays to waves. From passice to active.	Muhan Choi, Takehiro Fukushima and Takahisa Harayama	Alternate oscillations in Quasi-Stadium Laser Diodes	$2007/7/6 \sim 2007/7/13$	招待	発表済
0213070601001	国際会議	8th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science	Takahisa Harayama	Theory and Application of 2D Microcavitiy Lasers	$2007/7/2 \sim 2007/7/6$	招待	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
0213070607001	国際会議	Optical microcavities: From rays to waves. From passive to active.	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama, Syuichi Tamura and Keizo Inagaki	The effect of rotation in optical cavities: application to optical gyros	$2007/7/6 \sim 2007/7/13$	なし	発表済
0213070619001	国内大会	2007年秋季 第68回応用 物理学会学術講演会	S.Hiratsuka (Doshisya University), S.Saravanan, T.Harayama and N.Ohtani (Doshisya University)	Photoluminescence property of annealed InAs quantum dots capped by InGaAs layers	$2007/9/4 \sim$ 2007/9/8	有	発表済
0213070629001	国内大会	2007 年電子情報通信学 会ソサイエティ大会	砂田 哲,田村 修一,石田 智己,齋藤 茂 (立命館大 学),稲垣 恵三,原山 卓久	S-FOG による新しいサニャック 効果理論の検証	$2007/9/10 \sim 2007/9/14$	有	発表済
0213070703004	国内大会	2007 年電子情報通信学 会ソサエティ大会	石田 智己(立命館大学),田 村 修一,砂田 哲,稲垣 惠 三,原山 卓久,齊藤 茂(立 命館大学)	半導体ファイバオプティックジ ャイロ(S-FOG)における Sagnac ビートスペクトル線幅と共振器 長との関係	$2007/9/10 \sim 2007/9/14$	有	発表済
0213070703005	国内大会	2007年秋季 第68回応用 物理学会学術講演会	S.Saravanan and T.Harayama	Long wavelength emission from InAs/GaAs quantum dots	$2007/9/4 \sim 2007/9/8$	有	発表済
0213070711001	国内大会	2007 年電子情報通信学 会ソサイエティ大会	稲垣 惠三, 山本 貴之 (同 志社大学), 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジ ャイロ (S-FOG) による回転方向 の検出方法に関する検討	$2007/9/10 \sim 2007/9/14$	有	発表済
0213070713001	国内大会	電子情報通信学会 非線 形問題研究会	田 中 智 子 , Martina Hentshel (ドレスデン大学), 福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大 学),原山 卓久	オーバルビリアード型共振器半 導体レーザからの放射パターン	$2007/8/6 \sim$ 2007/8/7	有	発表済
0213070713002	国内大会	電子情報通信学会 非線 形問題研究会	佐々木 敬彦, 中榮 穣, 福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大), 原 山 卓久	電流と光注入によって発振させ た擬似スタジアム型半導体レー ザのビーム方向制御	$^{2007/8/6}_{2007/8/7}$ $\sim$	有	発表済
0213070717001	国内研究会	電子情報通信学会 非線 形問題研究会	中榮 穰, 竹花 広輝 (甲南大 学), 佐々木 敬彦, 福嶋 丈 浩 (ATR/岡山県立大学), 原 山 卓久	擬似スタジアム型半導体レーザ 共振器内部の発振モード観察	$2007/8/6 \sim$ 2007/8/7	有	発表済
0213070823001	国内研究会	電子情報通信学会 非線 形問題研究会	Muhan Choi, Takehiro Fukushima and Takahisa Harayama	Two Mode Interactions in Quasi-Stadium Laser Diodes oscillations	$2007/8/6 \sim 2007/8/7$	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
0213070927001	国内研究会	第 11 回レーザカオス福 井セミナー(The 11th Fukui Seminar on Laser Chaos; 11th FSLC)	篠原 晋, 原山 卓久	二次元微小共振器レーザーにお けるカオスの問題	$2007/9/25 \sim$ 2007/9/26	なし	発表済
0213071017001	誌上	Optics Express	Takehiro Fukushima (Okayama Pref. Univ.), Susumu Shinohara and Takahisa Harayama	Light beam output from diamond-shaped total-internal reflection modes by using intracavity air gaps	2007/12/10 ~	有	掲載済
0213071017002	誌上	Physical Review A	Susumu Shinohara, Takehiro Fukushima and Takahisa Harayama	Light emission patterns from stadium-shaped semiconductor microcavity lasers	2008/3/5 $\sim$	有	掲載済
0213071017003	国際会議	9th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science	Susumu Shinohara, Takehiro Fukushima and Takahisa Harayama	Ray-wave correspondence in chaotic optical cavities	$2007/11/12 \sim 2007/11/14$	有	発表済
0213071023001	国際会議	9th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science	Takahisa Harayama	2D Microcavity Lasers	$2007/11/12 \sim 2007/11/14$	招待	発表済
0213071031001	その他	ATR 研究発表会 2007	原山 卓久, 稲垣 恵三, 田村 修一, 砂田 哲, 田中 智子, 野戸 広之, 宮坂 朋宏	半導体ファイバオプティックジ ャイロ(S-FOG)	$2007/11/1 \sim 2007/11/2$	なし	発表済
0213071031002	その他	ATR 研究発表会 2007	原山 卓久, 稲垣 恵三, 砂田 哲, 宮森 良昌, 篠原 晋, サ ラバナン シャンムカム, 佐々木 敬彦, 中榮 穣	半導体レーザジャイロの研究開 発	$2007/11/1 \sim 2007/11/2$	なし	発表済
0213071031003	その他	技術情報協会セミナー 「ジャイロセンサの小 型・高精度化および車載 への応用」	原山 卓久	半導体レーザジャイロの研究開 発	2007/11/28 $\sim$	招待	発表済
0213071031006	誌上	光学	砂田 哲, 篠原 晋, 池田 研介	波動カオスのレーザー発振	2008/3/10 ~	有	掲載済
0213071101001	誌上	Optics Express	Satoshi Sunada and Takahisa Harayama	Design of resonant microcavities: application to optical gyroscopes	2007/11/21 ~	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
0213071101002	誌上	光学	原山 卓久	波動カオスと2次元共振器レー ザー	2008/3/10 $\sim$	有	掲載済
0213071121001	国際会議	19th International Conference on Optical Fibre Sensors	Keizo Inagaki, Shuichi Tamura, Tomoko Tanaka, Hiroyuki Noto and Takahisa Harayama	Earth's rotation rate detection using an extremely-large semiconductor fiber optic gyroscope extending over 10,000 m2	$2008/4/14 \sim$ 2008/4/18	有	採択
0213071122001	誌上	IEICE Electronics Express	Shanmugam Saravanan and Takashisa Harayama	Investigation of InxGal-xAs strain reducing layers effects on InAs/GaAs Quantum dots	2008/1/25 $\sim$	有	掲載済
0213071126001	国際会議	19th International Conference on Optical Fibre Sensors	Tomoki Ishida, Shuichi Tamura, Satoshi Sunada, Keizo Inagaki, Takahisa Harayama and Shigeru Saito (Ritsumeikan University)	Improvement of accuracy of angular velocity detection in semiconductor fiberoptic ring laser gyroscope	$2008/4/14 \sim$ 2008/4/18	有	採択
0213071129001	国内大会	日本物理学会 第63回年 次大会	篠原 晋, 福嶋 丈浩, 原山 卓久	近可積分光線ダイナミクスを呈 する二次元光共振器からの光放 射パターン	$2008/3/22 \sim 2008/3/26$	有	発表済
0213071210001	誌上	Thin Solid Films	Shanmugam Saravanan and Takashisa Harayama	Tunable intersubband energy spacing due to rapid thermal annealing of InAs/GaAs Quantum Dots covered with GaAs and InGaAs cap layers	未定	有	(査読中)
0213071220001	国際会議	The 5th International conference on semiconductor Quantum dots	Shanmugam Saravanan and Takashisa Harayama	Improvement in size distribution and optical properties of InAs/GaAs QDs by post growth thermal treatment	$2008/5/11 \sim$ 2008/5/16	有	採択
0213080109004	国内大会	2008 年電子情報通信学 会総合大会	稲垣 惠三, 田村 修一, 田中 智子, 野戸 広之, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジ ャイロによる地球自転角速度の 検出	$2008/3/18 \sim$ 2008/3/21	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
0213080229001	誌上	Optics letters	Muhan Choi, Susumu Shinohara, Takehiro Fukushima and Takahisa Harayama	Dependence of far-field characteristics on the number of lasing modes in stadium-shaped InGaAsP microlasers	未定	有	(査読中)
0213080314001	国際会議	The 8th International conference on Excitonic Process in Condensed Matter	S. Hiratsuka (Doshisha Univ.), S. Saravanan, T. Harayama and N. Ohtani (Doshisha Univ.)	Photoluminescence properties of annealed InAs quantum dots capped by InGaAs layers	$2008/6/22 \sim 2008/6/27$	有	(査読中)
0213080317001	国際会議	First Mediterranean Photonics Conference 2008	Satoshi Sunada and Takahisa Harayama	Rotating resonant microcavities: application to optical gyroscopes	$2008/6/25 \sim$ 2008/6/28	有	(査読中)
0213080317001	国際会議	First Mediterranean Photonics Conference 2008	Satoshi Sunada and Takahisa Harayama	Rotating resonant microcavities: application to optical gyroscopes	$2008/6/25 \sim$ 2008/6/28	なし	発表予定