

平成16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17年5月

情報通信研究機構

平成16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
2	研究開発の全体計画	3
2-1	研究開発課題の概要	3
2-2	研究開発目標	4
2-2-1	最終目標	4
2-2-2	中間目標	5
2-3	研究開発の年度別計画	6
3	研究開発体制	7
3-1	研究開発実施体制	7
4	研究開発実施状況	8
4-1	角速度センサチップ最適設計理論の研究開発	8
4-1-1	序論	8
4-1-2	実施状況	8
4-1-3	今後の課題	9
4-2	角速度センサチップ作製技術の研究開発	9
4-2-1	序論	9
4-2-2	実施状況	9
4-2-3	今後の課題	10
4-3	角速度センサチップ制御技術の研究開発	10
4-3-1	序論	10
4-3-2	実施状況	10
4-3-3	今後の課題	11
4-4	回転角速度検出技術の研究開発	11
4-4-1	序論	11
4-4-2	実施状況	11
4-4-3	今後の課題	12
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	12
4-5-1	序論	12
4-5-2	実施状況	12
4-5-3	今後の課題	12
4-6	総括	13
5	参考資料・参考文献	14
5-1	研究発表・講演等一覧	14

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。

2 研究開発体の全体計画

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 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 $860\mu\text{m}$ 、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 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 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 $5\text{cm}/\text{秒}$ 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	—	—	—	—	—	—	

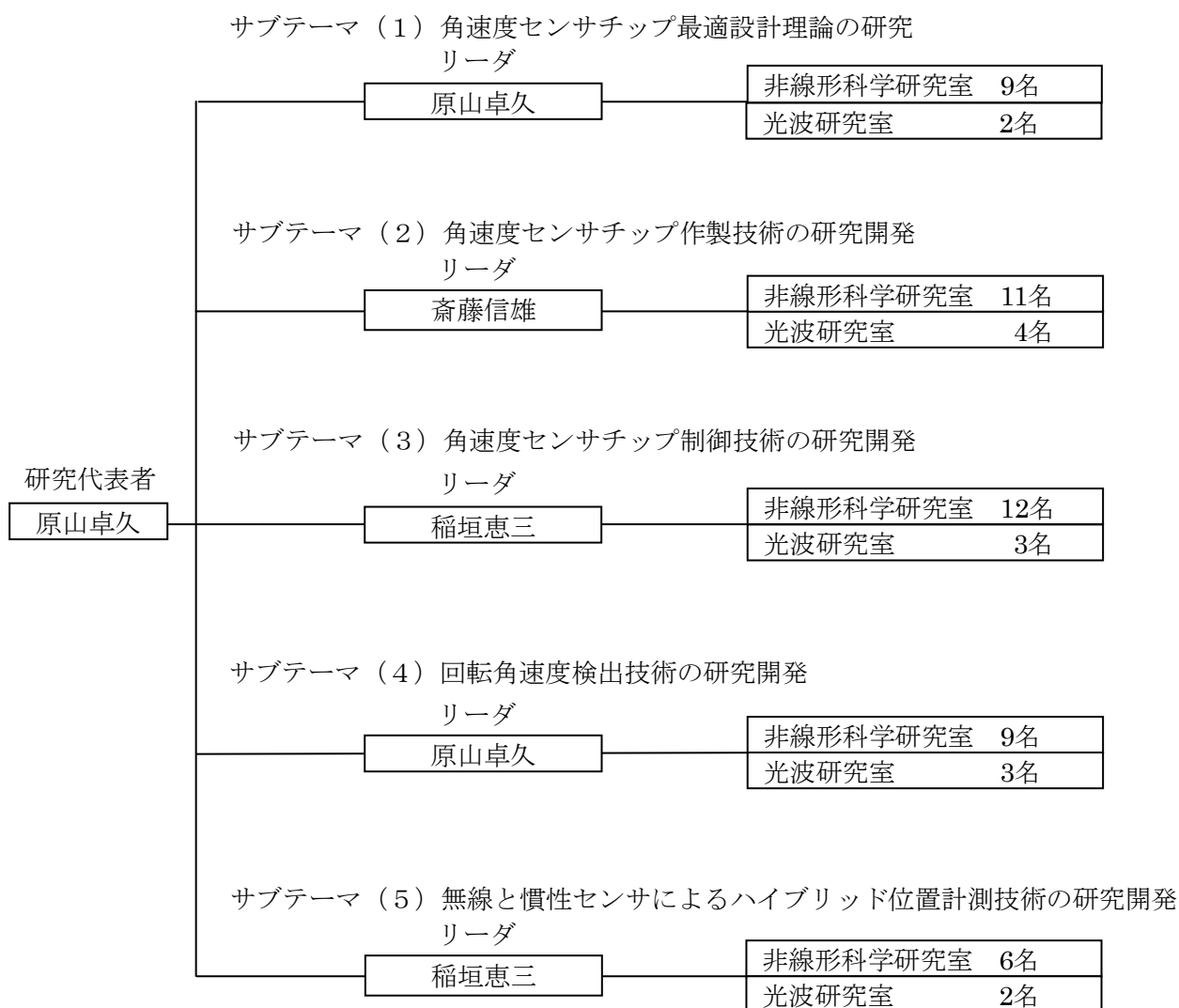
注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

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



員数には研究代表者、リーダーを含む。
員数には兼務先を含まない。

再委託先：
再委託なし

共同研究先：

- ・ 日本航空電子工業株式会社
- ・ 古河電気工業株式会社

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

2次元的なキャビティモードを解析できるように拡張した Fox-Li モード解析法の数値解析プログラムを作成し、キャビティモードを数値的に求め、その結果が観測されたモードとよく一致するか詳細に調べた。これにより、拡張 Fox-Li モード解析法の数値解析プロ

グラムによって数値的に求めたキャビティモードが観測されたモードとよく一致することが確認できたので、この解析プログラムが実用であることと素子が設計通り作製できていることを同時に確認できた。この数値解析プログラムは今後の素子設計の基礎となる。

また、このような2次元的なパターンを有するキャビティモード間の相互作用は、リングレーザジャイロの性能を左右するロックイン現象の原因であり非常に重要である。このため、動的なレーザ媒質の非線形相互作用を取り入れたモードダイナミクス理論を構築した。この理論を用いて数値解析プログラムを作成し、複数のキャビティモード間の引き込みや同期現象を解明した。

4-1-3 今後の課題

回転系のマクスウェル方程式を2次元的なキャビティに適用し、回転するマイクロキャビティにおけるキャビティモードを解析することが必要である。回転系の上で伝播する光を従来のように1次元的な光線として近似することなしに、2次元的に広がったモードとして捉え、新しいマイクロキャビティにおけるサニャック効果を導くことが重要である。

また、そのとき、時計・反時計回りの回転波モードが同時にレーザ発振可能であるような利得媒質の設計を行う必要があると考えられる。モード競合によって一方向のみの回転波となりやすいため、これを抑えるよう利得中心・形状に特別な設計が必要となる。

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認する。

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

角速度センサチップ作製プロセスは次の通りである。まず、MBE装置により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を作製し、その上にSiO₂の絶縁膜を蒸着する。これに電子線描画装置を用いてフォトレジストで2次元キャビティパターンを描き、RIE装置を用いてドライエッチングによりSiO₂の絶縁膜をレーザキャビティパターンで切り出す。続いて、エピウエハに対してICP-RIE装置によりドライエッチングを施し、エピウエハに2次元レーザキャビティパターンを切り出す。さらに、RIE装置によりドライエッチングによりSiO₂の絶縁膜にコンタクト窓パターンを開け、最後に電極メタルを蒸着しリフトオフにより電極パターンニングをする。これらの各プロセス工程を確認した。

また、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を用いてブロードレーザを作製し特性を評価した。Alの組成はドライエッチングに影響を及ぼすことがあり、また信頼性を左右することもあるため、特に重要である。様々な組成のエピウエハとそれを用いたブロードレーザ特性を調べたことで、2次元形状のレ

ーザキャビティを用いる場合の最適な組成が明らかになりつつある。

エピウエハに対してSiO₂の絶縁膜は良好に蒸着可能であり、これをRIEでドライエッチング加工でき、その際、後のプロセス工程で必要とされる垂直性を十分確保できることがわかった。

ICP-RIE装置によるドライエッチングはGaAs基板に関しては垂直かつ円滑な面を作製できることがわかった。エピウエハの場合にも垂直かつ円滑な面は得られたが、Alが含まれていることでやや残渣が付着する場合があります、これを取り除く技術が必要であることがわかった。

またエピウエハに電子線描画装置を用いてフォトレジストで任意形状の2次元キャビティパターンを描くことができた。

電極形成プロセスに関しては電極メタル蒸着とリフトオフが可能であることが確認された。

また、裏面研磨、ボンディングなどのプロセスなど後工程が可能であることを確認した。

4-2-3 今後の課題

2次元レーザ作製のための各プロセス工程が確立しつつあるので、これらの連関をスムーズにし、任意形状の2次元マイクロキャビティレーザを短期間で作製できるように技術を磨くことが必要である。ドライエッチングに関しては残渣を取り除く技術に習熟する必要がある。

また、ジャイロ性能向上を考慮のためには、バックスキッターリングによるモード同期の領域をできる限り少なくする必要がある、内部損失を少なくすることが重要である。しかし、量子井戸レーザでは内部損失を少なくすることは困難であるため、量子ドットレーザエピウエハを用いることも検討する必要がある。

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

2次元レーザは出力光が2次元的な広がりを持ち計測に時間を要するので、専用の特別な特性評価装置を用いて効率的に評価する。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。そこで、2次元マイクロキャビティレーザの基本的な特性を効率的に評価する専用の特性評価装置を設計した。

この専用の特性評価装置を用いて、作製した様々なタイプの2次元マイクロキャビティレーザの発振特性を詳細に調べたことで、レーザ発振特性とキャビティの2次元形状との関係を解明することができた。特に従来のエッジエミッタ型タイプのレーザにサイドミラーが付いているような擬似スタジアム型レーザに関しては、モード解析結果とよく一致する遠視野像が得られ、設計・作製・評価・解析がすべてよく機能していることが明らかになった。

より2次元的なレーザでは、解析と完全に一致しないような観測結果が得られた。このような形状の場合に、数値的に求めたキャビティモードと観測されたモードとをより詳細に比較するために、サイズの非常に小さい素子でも評価可能な光注入素子用特性評価装置も設計・導入し、任意の2次元形状のレーザを正確に設計できることを目指すことが重要であることがわかった。

4-3-3 今後の課題

横マルチモード発振する素子では、遠視野像に細かなリップルが現れ、ジャイロ性能に影響を及ぼす可能性があるため、これを取り除く必要がある。このためには、キャビティにおけるレーザ出力光出射部分に開口などを設け、高次の横モードがレーザ発振しないような構造とする必要がある。このようにして、横単一モード発振を行うことが重要である。

また、電流注入方法などを工夫し、発振モードを自由に制御できる技術を開発することが必要である。特に、ジャイロ機能を実現することも重要である。

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干渉縞の平行移動を検出するために、光学実験を行えるような特別なレートテーブルを設計・導入した。最高回転角速度1000°/秒まで行えるようにした。これにより、光ジャイロの実験を正確に実施できるようになった。

また、これまで半導体レーザを用いたリングレーザジャイロに関する報告はないため、レーザチップよりも扱いやすい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た実験を行った。この実験では、光を外に取り出さなくとも、時計回りと反時計回りのレーザ光における周波数の違いに起因する半導体光増幅器の電圧の変動周波数を測定す

れば、素子の回転角速度を検出することができる。しかし、このような測定では出力信号が非常に弱く、僅かなノイズの中に重要な情報が隠れてしまうため、非常に精密な測定を行う必要があることがわかった。

4-4-3 今後の課題

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の詳しい発振特性を調べる必要がある。また、その発振特性がカプラーによる損失やファイバ長などのパラメータにどのように依存するかも詳しく調べなければならない。

さらに、このリングレーザをレートテーブルを用いて回転し、ジャイロ機能を実現し、そこで得られる知見をジャイロ用の2次元マイクロキャビティの設計に応用することが重要である。

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、モバイル端末等に適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

実際に角速度センサ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ことを計画している。ここで角速度センサとしては、中間目標にファイバオプティックジャイロ、最終目標にHe-Ne リングレーザジャイロを想定していた。しかし、どちらも大変高価である上、最終目標の性能を有するハイブリッドシステムの研究開発を、ファイバオプティックジャイロを用いたシステム完成後から始めたのでは十分な時間がないと判断されたため、初めからHe-Ne リングレーザジャイロを用いることにし、これとRTK-GPSを組み合わせたシステムを作製した。GPSが働かないときにジャイロに切り替えるなどの基本的な機能を持たせることができた。

4-5-3 今後の課題

He-Ne リングレーザジャイロの誤差は完全にランダムなものではないため、統計予測制御が可能である。RTK-GPSの情報とジャイロの情報とを比較することによって、ジャイロ誤差の傾向を把握し、信号処理によって誤差をより小さくすることが重要である。そのためには、カルマンフィルタなどを用いてジャイロの誤差制御を行うことが必要である。これによりジャイロとGPSの単なる切り替え以上の真にハイブリッドな効果が期待できる。

4-6 総括

半導体レーザを用いた光ジャイロを実現するために、理論、作製、評価と多角的に研究を進めるための基礎を固めることができた。このような光ジャイロはこれまで全く実現されていないため、様々なタイプのリングレーザを作製し、設計思想を固めて行くことが大切である。最終的には、2次元マイクロキャビティレーザを用いた角速度センサチップを実現する予定であるが、このレーザの作製技術自体も研究開発対象であるため、これを用いてジャイロ機能の実現を試行錯誤するのは効率的ではないと考えられる。そこで、まず扱いやすく、しかも半導体レーザとしての特性を持つ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、ジャイロ機能の実現を目指すという方法が、最も効率的であるという結論に至った。平行して、2次元マイクロキャビティレーザの作製・評価も行い、これらの技術を高めておき、最終的に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の研究で得られた知見を、2次元マイクロキャビティレーザの設計に活かせるようにすることが重要である。また、さらに角速度センサチップが完成したときに、それを用いて作製した自律的位置計測装置とGPSを組み合わせることにより期待できる性能向上効果を予め評価するために、He-NeリングレーザジャイロとRTK-GPSを組み合わせたシステムを研究することも重要である。このように、それぞれのサブテーマを個々に平行して進め、徐々に融合させて行きたいと考えている。

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
2004 波一発 073	国内研究会	「カオスとその周辺」、 早稲田コンファレンス	原山 卓久	複雑な波動関数のレーザ発振 ～カオティックなビリヤード形状のマ イクロキャビティレーザの理論と実験 ～	2004. 11. 11 ～2004. 11. 12	招待	発表済
2004 波一発 074	国内研究会	京大基研短期研究会、 「量子系およびマクロ系 におけるカオスと非線形 動力学」	Takahisa Harayama	Chaos and Multi-attractors in Fully Chaotic 2D Microcavity Lasers	2004. 12. 8 ～2004. 12. 10	招待	発表済
2004 波一発 075	その他	平成 16 年度 A T R 研究 発表会 技術講演	原山 卓久	2 次元レーザと角速度センサ	2004. 11. 4	招待	発表済
2004 波一発 076	誌上	ATR Journal	原山 卓久	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	2004. 12. 1	無	発表済
2004 波一発 081	国内研究会	電子情報通信学会、ワイ ドバンドシステム研究会	Charles Kremer, Keizo Inagaki	Adaptive Pulse Shaping Filter for UWB Spectral Mask Including ITU-R Protection of Passive Service Bands	2004. 12. 20	有	発表済
2004 波一発 082	国内研究会	京大基研短期研究会、 「量子系およびマクロ系 におけるカオスと非線形 動力学」	Susumu Shinohara, Satoshi Sunada, Takahisa Harayama, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Mode Expansion Description of Stadium-cavity Laser Dynamics	2004. 12. 8 ～2004. 12. 10	有	発表済
2004 波一発 084	国内研究会	京大基研短期研究会、 「量子系およびマクロ系 におけるカオスと非線形 動力学」	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Multi-mode Lasing in 2D Fully Chaotic Cavity Lasers	2004. 12. 8 ～2004. 12. 10	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
2004波一発087	誌上	Physical Review E	Susumu Shinohara, Satoshi Sunada, Takahisa Harayama, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Mode Expansion Description of Stadium-cavity Laser Dynamics	2005. 3. 1	有	発表済
2004波一発118	国際会議	NCRICCO Workshop on Microcavity Lasers	Takahisa Harayama	Chaos and Multi-attractors in Fully Chaotic 2D Microcavity Lasers	2005. 2. 22 ～ 2005. 2. 25	招待	発表済
2004波一発123	誌上	Physical Review E	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Multiple-mode Lasing in 2D Fully Chaotic Cavity Lasers	2005. 4. 18	有	発表済
2004波一発138	国際会議	The 23th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-23)	Norihiko Kamata (Univ. of Saitama), Shanmugam Sarabanan, J. M. Zanardi Ocampo, Pablo Vaccaro, Yasuhiko Arakawa (Tokyo Univ.)	Nonradiative Centers in InAs Quantum Dots Revealed by Two-wavelength Excited Photoluminescence	2005. 7. 24 ～ 2005. 7. 29	有	査読中
2004波一発144	国際会議	2005 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems	Susumu Shinohara	The diagram for shearless torus breakup and separatrix reconnection in the quadratic nontwist map	2005. 5. 22 ～ 2005. 5. 26	有	発表済
2004波一発145	国際会議	2005 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems	Susumu Shinohara, Satoshi Sunada, Takahisa Harayam, Kensuke Ikeda (Ritsumeikan Univ.)	Mode dynamics in 2D microcavity lasers	2005. 5. 22 ～ 2005. 5. 26	有	発表済

