半導体リングレーザジャイロのサニャックビート検出特性の検討

正 員 田 口 耕 造 (福山大学)

非会員 石 谷 厚 幸 (福山大学)

非会員 池 田 正 宏 (福山大学)

A Study of Sagnac Beat Detection Characteristics Using Semiconductor Ring Laser Gyro

Kozo Taguchi, Member, Atsuyuki Ishitani, Non-member, Masahiro Ikeda, Non-member (Fukuyama University)

In this paper, we described the detection characteristics of a semiconductor ring laser(SRL) as an optical inertial rotation sensor. First, we tried to measure the beat frequency characteristics as a function of the rotation rate, changing the loop radius for investigating the loop radius dependence on the detection sensitivity. Experimental results showed that the beat frequency caused by Sagnac effect was proportional to the loop radius and the detection sensitivity was proportional to the loop radius. For example, the sensitivity was increased ~ 1.1 times by changing the radius from 12.4cm to 13.6cm. This result coincided well with expected value of 1.10. Furthermore, the beat detection characteristics depended on the oscillation condition of the SRL. From these experimental results, we could verify the possibility of a mode-locked SRL as a gyroscope for detecting stable beat note.

キーワード：半導体リングレーザ，サニャックビート，検出特性，多モード発振，モード同期

1. はじめに

近年、相対性理論に基づき、光の属性を活用して絶対回転を計測する光ジャイロ技術が進展している。光ジャイロの構成原理はサニャック (Sagnac) 効果 [1] である。すなわち、光路に互いに逆方向に伝搬している二つの光の系に入力角速度が加わると、左回りと右回りの光の間に伝搬光路差 ΔL が生じることによって、光を用いて回転角速度を検出する光ジャイロは機械式ジャイロに比べ原理的に次の特徴を有している。(i) 可動部分がなく摩耗する部分がないため、寿命・保守の問題が少なく加速度に強い。(ii) 起動時間が短い。(iii) 構造が簡単で信頼性が高い。光ジャイロは光路差 ΔL を検出する方法により、(i) 光路の外部からレーザ光を導入する受動形光ジャイロと、(ii) 光路内でレーザ発振を生起させ、入力角速度によりレーザ光の発振周波数の差が生じることを利用する能動形光ジャイロに分類することができる。能動形光ジャイロはリングレーザジャイロ (RLG) として既に実用化されている。RLG はリング共振器を有する He-Ne レーザ発振器と出力光を検出する受光器から構成されている [2]。レーザの発振周波数は ~ 300 THz と高いため、相対的には小さな周波数変化も十分に測定可能な大きさとなり、地球の自転速度に対して数 Hz 程度の周波数差が生じる。既に 0.001 deg/h にも及ぶ感度が達成されて

おり、Boeing747 等の航空機で利用されている。受動形光ジャイロとしては、干渉方式光ファイバジャイロ (I-FOG)、共振方式光ジャイロ (OPRG) および光ファイバリングレーザジャイロ (F-RLG) などが提案されている。しかし、これらいずれの光ジャイロ [2]-[5] も回転角速度を検出するためには光路内の光を外部に取り出す必要があるため、システム構成が複雑となる。

著者らは既に、半導体リングレーザ (SRL) を用いた半導体リングレーザジャイロスコープ (Semiconductor Ring Laser Gyroscope: S-RLG) を提案しており、S-RLG が回転角速度検出器として動作することを確認している [6][7]。さらに、左右両回り光の発振周波数差 Δf はリング内の光を外部に取り出すことなく S-RLG の端子電圧変化からビート信号として検出可能であることを実験により確認しており、従来の光ジャイロに比べて、非常に簡単な構成で光ジャイロが実現可能であることを明らかにしている。本論文では、提案している S-RLG は Sagnac 効果に基づく能動形光ジャイロとして動作しており、回転角速度の検出感度は光路が取り囲む面積に比例することを実験により確認する。さらに、SRL が単一モード発振、多モード発振およびモード同期発振それぞれの状態でのビート検出特性に関して検討を行い、SRL をシングル発振状態で回転させたときに観測されるサニャックビートの不安定性は左右両周り光間の

モード競合が原因であり、多モード発振している SRL を ロッキング状態で動作させることは安定なジャイロ機能を実現するために有効な手段になりうることを明らかにする。以下、2 章では、提案している半導体リングレーザジャイロスコープを用いた回転角速度検出結果を述べる。3 章ではモード同期レーザのビート検出特性に関して検討を行う。4 章ではまとめる。

2. 半導体リングレーザジャイロ

〈2・1〉 実験系 図 1 は実験で用いた S-RLG であり、シングルモードファイバー付き半導体光アンプ (BH-type InGaAsP/InP LD) により半導体リングレーザ (半径 R の円形光路) を構成している [6]。ただし、半導体光アンプ ($\lambda = 1.28\mu\text{m}$) の活性層両端面には反射防止膜 (Anti Reflection Coating: ARC) を取り付けている。半導体光アンプはヒートシンク上に設置されており、ペルチェ冷却素子によりレーザの温度を 16 度一定に制御している。本研究では、モーター軸に取り付けられたターンテーブル上に上記の S-RLG を固定し実験を行った。ただし、モーター軸の回転速度は 1deg/sec から 100deg/sec の範囲で任意に制御可能である。

図 1 実験に用いた半導体リングレーザジャイロスコープ
Fig.1 The simplified schematic diagram of a semiconductor ring laser gyroscope(S-RLG).

一般に半導体光増幅器では、入力光強度に応じて増幅器内のキャリア密度が変化する。すなわち、入力光強度に応じて擬フェルミレベルが変動するため pn 接合の端子電圧が変化する [8][9]。それゆえ、本実験では発振周波数が Sagnac 効果によって異なった左右両回り光の干渉により生じる光波のうねり成分を擬フェルミレベルの変動による端子電圧変化からビート信号として検出することで回転角速度の検出を試みた。このとき、光路が半径 R の円形軌道であることを考慮すると、左右両回り光の間には

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c^2 - R^2 \Omega^2 / n^2} \quad (1)$$

で与えられる伝搬時間差 Δt が生じる。ただし、 c は真空中の光速、 n は屈折率、 Ω は回転角速度である。

ここで、 $c^2 \gg R^2 \Omega^2 / n^2$ を考慮すると、屈折率によらず伝搬時間差は次式で与えられる。

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c^2} \Omega \quad (2)$$

したがって、図 1 に示す光学系が回転角速度 Ω で回転する場合、光路内の左右両回り光波間には

$$\Delta L = c_n \Delta t = \frac{c}{n} \Delta t = \frac{4\pi R^2}{nc} \Omega \quad (3)$$

で与えられる光路差 ΔL が生じる。ただし、 c_n は媒質中の光速である。

すなわち、能動形光ジャイロにおいては、(3) 式で与えられる光路差 ΔL により光路内を左右それぞれ逆回りに伝搬する二つの発振光の発振周波数が異なり、左右両回り光間には

$$\Delta f = -\frac{c_n}{\lambda_n^2} \Delta \lambda_n = -\frac{c_n}{\lambda_n} \frac{\Delta \lambda_n}{\lambda/n} = -\frac{nc_n}{\lambda_n} \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

で与えられる発振周波数差 Δf が発生する。ただし、 λ_n は媒質中での静止時の発振波長、 λ は真空中での静止時の発振波長、 L はリング長 ($2\pi R$) である。

(4) 式に (3) 式を代入することで、

$$\Delta f = -\frac{nc_n}{\lambda_n} \frac{2R}{nc} \Omega = -\frac{2R}{n\lambda_n} \Omega = -\frac{2R}{\lambda} \Omega \quad (5)$$

で与えられる発振周波数差 Δf が発生し、(5) 式で与えられる両者のビート周波数を計測することでジャイロ機能が実現できる。

また、この基本式は光路の形状、回転の中心、光路の屈折率に依存せず成立する [10]。実験では、S-RLG の回転角速度検出特性に関して検討を行うため 3 種類の S-RLG (type A, B, C) を用いた。ただし、光路の半径はそれぞれ 0.124m (type A)、0.136m (type B) および 0.108m (type C) である。

〈2・2〉 実験結果 図 2 は、モーター軸の回転角速度が 48deg/sec のときに S-RLG (type B) の端子電圧の変化から検出されたビートスペクトルである。横軸は周波数であり、縦軸はビートパワーである。なお、注入電流値 I は 75mA に設定しており、このときリングレーザはシングルモード発振している。結果から周波数 174kHz、幅約 800Hz のビートスペクトルが確認できる。さらにモーター軸の回転角速度 Ω を 42deg/sec に減速させたとき、検出されるビート周波数が 149.8kHz に変化することを確認した。本実験系 (type B) においては、 $\lambda = 1.28\mu\text{m}$, $R = 0.136\text{m}$ であり、このとき (5) 式から算出されるそれぞれの回転角速度に対する理論値 Δf は 177.94kHz および 155.6kHz である。図 3 は、リング半径が異なる 3 種の S-RLG (type A, B, C) の端子電圧変化から計測したビート周波数 Δf_m とモーター軸の

回転角速度 Ω の関係を示しており、計測したリング内の左右両回り光の発振周波数差 Δf_m により(5)式から算出した回転角速度 $\Omega_m(=\lambda \Delta f_m / 2R)$ とターンテーブルの回転角速度 Ω の関係を図4に示す。

図2 検出されたビートスペクトル

Fig.2 Detected beat spectrum of between counter propagating lasers in a mechanically rotated S-RLG.

図3 実験結果

Fig.3 Experimental results of measured beat frequency.

図3の結果から入力回転角速度 Ω とS-RLGで検出されるビート周波数 Δf_m は直線関係にあり、また図4の結果からS-RLGによって計測した回転角速度 Ω_m とターンテーブルの回転角速度 Ω は良く一致している。すなわち、S-RLGはSagnac効果に基づく回転角速度検出器として動作しており、リング内の左右両回り光の発振周波数差はSRLの端子電圧からビート信号として検出可能であることが示されている。さらに図3に示すS-RLGの検出感度特性の測定結果から、S-RLGの検出感度は光路が囲むリング面積に依存することを実験においても確認することができた。実験に用いたS-RLG(type A,B,C)それぞれのリング半径 R_a, R_b および R_c は $R_c < R_a < R_b$ の関係にあり、使用するS-RLGのリング半径を $R_a=12.4\text{cm}$ (type A)から $R_b=13.6\text{cm}$ (type B)および $R_a=12.4\text{cm}$ (type A)から $R_c=10.8\text{cm}$ (type C)

に変化させたとき、S-RLGの検出感度向上率がそれぞれのリング半径比 $R_b/R_a=1.1$ および $R_c/R_a=0.87$ と一致することを実験において確認することができた。この検出感度のリング半径依存性は(5)式で与えられる理論特性と一致している。また、これらの検出特性はリング巻数に依存しておらず、提案するS-RLGが能動型ジャイロスコープとして動作していることを確認することができた[11]。さらに、注入電流を増加させた場合においても同様にビートスペクトルを観測することができた。このときSRLの端子電圧の変化からリングキャパティの縦モード(リングモード)間のビートスペクトルが観測されており、これはSRLがマルチモードで発振していることを示している。すなわち、それぞれのリングモードに対応する左右両回り光波間に回転により光路長差が生じ、(5)式で与えられる発振周波数差が発生していることを確認することができた[12]。また、半導体リングレーザへの注入電流を増加させることで、シングル発振時に比べて、検出されるビートの安定性が向上するが、同時にノイズ成分が上昇するためビートスペクトルが雑音成分に埋もれる傾向にあることを確認した。

図4 計測された回転角速度の実験結果

Fig.4 Experimental results of measured rotation rate.

3. サニャックビート検出特性

本章では、サニャックビートの検出特性に関して検討を行う。まず、SRL内の左右両回り光が単一モード発振時に実験で観測されたサニャックビートの不安定性に関して検討を行うため、図5に示すシミュレーションシステムを用いて実験を行った。シミュレーション実験で用いたシステムは、半導体光アンプモジュール、スペクトラムアナライザ、光位相変調器および3-dBカプラにより構成されており、LDの両端から光ファイバを伸ばし、3dB-Couplerを含んだリングで構成している。リング長は13mである。実験では、静止しているSRLの互いに逆回転する発振モードを3dB-Couplerより外部に取り出し互いに干渉させることで観測されるビートの検討を行った。本実験で用いたシミュレーションシステムでは、SRLが静止しているため逆回転するモードの発振周波数が等しい状態でのビートであ

るため、実際のサニャックビート (逆回転するモードが異なる周波数で発振している場合のビート) とは異なるが、SRL 内の左右両回り光の発振特性を評価するためには有用である。SRL の発振状態が、シングル状態の時にオシロスコープで観測された時間波形の一例を図 6 に示す。変調周波数 f_M は 500kHz であり、変調周波数に対応した周期で正弦波形が観測されている。ただし、本実験で光位相変調器に変調信号を印加するために用いている信号発生器が高調波成分を有しているため、図 6 に示す結果においては、やや三角波状の時間波形となっている。

図 5 実験に用いたシミュレーションシステム
Fig.5 Experimental setup.

図 6 実験結果
Fig.6 Experimental result.

図 7 はそれぞれ異なる時刻 (測定時間差 20ms) にスペクトラムアナライザで検出されたビートスペクトルであり、結果から検出されるビートスペクトルは時間的に不安定であることが示されている。なお時間波形に関しても、ビートスペクトルと同様に時間的に不安定であり、リング内の左右両回り光間のモード競合の発生を確認することができた。これらの結果より、実際に図 1 に示す SRL をシングル発振状態で回転させたときに観測されるサニャックビートの不安定性は左右両回り光間のモード競合が原因であると考

えられる。

図 7 シングルモード発振時のビートスペクトル
Fig.7 Detected beat spectrum.

一方、これまでの実験から SRL への注入電流を増加させることで、シングル発振時に比べて、検出されるビートの安定性が向上するが、同時にノイズ成分が上昇するためビートスペクトルが雑音成分に埋もれる傾向にあることを確認している。このことは、レーザ媒質の非直線性 (不均一性) によるものと思われる。一般にレーザが多モード発振しているとき、発振モード間の周波数の差は等しくない。縦モードの共振周波数は等間隔であるが、各モードの発振周波数はレーザ媒質の非線形分散効果などのために、共振器の共振周波数とは異なる。すなわち、レーザがマルチモードで発振している場合、レーザ媒質の非直線性によりモード相互間で影響しあう。このため、各モード間の結合波ができ雑音として発生する。これに対して各モード間の相対的な位相関係が固定されたレーザの場合は雑音となる成分が減少する。レーザ共振器内に非線形光学素子を入れたり、変調素子を入れてそれにビート周波数に近い高調波を加えて損失や屈折率を変調することで、多モード発振の周波数間隔が等しくなる。これはモード同期 (mode locking) であり、外部から高周波を加えて同期させる強制モード同期と外部から信号を加えないでモード同期させる受動モード同期の二つに大別される。

そこでこれらのことに関して検討するため、SRL 内の左右両回り光が多モード発振時のビート検出特性に関して検

討を行った。実験では、SRLが多モード発振およびモード同期発振それぞれの状態で検討を行った。ただし、モード同期発振時の実験においては図1に示すリング内に挿入した自作のPC (Polarization Controller) を調整することにより自己モードロックを起こしている。一般にレーザ共振器の中に非線形光学素子を挿入しなくても、レーザ媒質には非線形光学効果があるため、励起条件や共振器の特性を調整することで自己モード同期を起こすことが可能である。結果から SRL においても、モード同期発振させることで雑音成分の低減が可能であり、ロッキング状態で SRL を動作させることはジャイロ機能を実現するために有効な手法であることを確認することができた。しかし、現時点では回転台に自作の偏波コントローラを挿入した SRL を設置することは困難であるため、図5に示すシミュレーションシステムを用いてビート検出特性の検討を行った。

図8は SRL がマルチモード発振 ($1.03I_{th}$ ($I_{th}=75\text{mA}$), $f_M=500\text{kHz}$) している時に観測されたビートスペクトルであり、図5に示すシミュレーションシステムにおいても SRL への注入電流を増加させることで、検出されるビートの安定性が向上することを確認した。しかし、 $<2.2>$ で示した結果と同様に注入電流を増加させることでノイズ成分が上昇するためビートスペクトルが雑音成分に埋もれる傾向にあることを確認した。

図8 マルチモード発振時に検出されたビートスペクトル
Fig.8 Detected beat spectrum.

図9は、マルチモード発振 ($I=1.4I_{th}$) しているリングレーザを自己モードロックさせたときに観測したモード同期出力波形であり、そのとき、計測したリングモード間のビートスペクトルおよび変調周波数 f_M が 500kHz のときに観測されたビートスペクトルをそれぞれ図10と図11示す。図9よりパルスの繰返し周期は約 63nsec 、図10よりリングモードのビート間隔は約 15.8MHz である。本シミュレーション実験系においては、リング長 L は 13m であり、理論的に求められるリングモード間隔 $\Delta f_{fsr} = c/nL = 15.8\text{MHz}$ とよく一致している。ただし、 n はリングの屈折率であり本計算においては $n=1.46$ としている。また、パルスの繰返し周期とリングモードのビート間隔の測定結果から、SRL

が基本波モード同期発振していることが示されている。

図9 モード同期出力波形
Fig.9 Mode-locked pulse train.

図10 観測されたリングモード間のビートスペクトル
Fig.10 Example of the detected RF spectrum in the 0-1GHz range.

図11 検出されたビートスペクトル
Fig.11 Detected beat spectrum.

実験結果からモード同期発振している SRL ではスペクトルアナライザの出力および光スペクトル共に安定しており、図11に示すように検出されるビートが安定し、雑音成分も減少することを確認した。ただし、単一モード発振時の

シミュレーション実験と同様に、本実験は逆回転するモードの発振周波数が等しい状態でのビート検出である。それゆえ、今後、実際の回転系においてサニャックビート安定検出の可能性を明らかにするため、SRLを自己モード同期状態またはレーザ共振器内に可飽和吸収体を挿入したSRLでの受動同期状態での検討が必要である。

4. ま と め

本論文では半導体リングレーザジャイロスコープ (S-RLG) のサニャックビート検出特性に関して検討を行った。本論文を要約すると次となる。

- S-RLGの検出感度特性はリング半径に比例し、リング巻数には依存しないことを実験において明らかにし、提案しているS-RLGが能動型光ジャイロとして動作していることを確認した。
- サニャックビートの検出特性は、リングレーザの発振状態に依存することを明らかにした。
- シミュレーションシステムを用いて、SRLが単一モード発振、多モード発振およびモード同期発振それぞれの状態でビート検出特性に関して検討を行った。その結果、SRLをシングル発振状態で回転させたときに観測されるサニャックビートの不安定性は左右両周り光間のモード競合が原因であり、SRLをロッキング状態で動作させることは安定なジャイロ機能を実現するために有効な手段になりうる可能性を確認した。

今後の課題としては、実際の回転系において本提案手法の有効性の確認および、低回転領域で発生する左右両回り光間の注入同期 [13] によるロックイン現象の検討が必要であり、また、一般にレーザの端子電圧からのビート検出特性はレーザへの注入電流値にも依存しているため、注入電流が検出特性に与える影響に関しても理論的・実験的に検討する必要がある。

(平成12年5月16日受付, 同13年2月9日再受付)

文 献

- (1) E.J. Post, "Sagnac effect," Rev. Modern Phys., vol.39, no.2, pp.475-493, Feb. 1967.
- (2) G.J. Martin, "Gyroscopes may cease spinning," IEEE Spectrum, vol.23, no. 2, pp. 48-53, Feb. 1986.
- (3) R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An overview of fiber-optic gyroscopes," J. Lightwave Technol., vol.LT-2, no.2, pp. 91-107, April.1984.
- (4) F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, "Stimulated brillouin fiber-optic laser gyroscope," Opt. Lett., vol.16,no.4, pp. 229-231, Feb.1991.
- (5) K. Takiguchi, and K. Hotate, "Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyros by using optical kerr effect in fiber resonator," Photon. Technol. Lett., vol.4, no.7, pp. 810-812, July.1992.
- (6) K. Taguchi, K. Fukushima, A. Ishitani, and M. Ikeda, "Optical inertial rotation sensor using semiconductor ring laser," Electron Lett., Vol.34, No.18, pp1775-1776, Sep. 1998.
- (7) K. Taguchi, K. Fukushima, A. Ishitani, and M. Ikeda, "Pro-

posal of a semiconductor ring laser gyroscope," Optical and Quantum Electronics, vol.31, pp. 1219-1226, Dec.1999.

- (8) M. Ikeda, "Signal-monitoring characteristics for laser-diode optical switches," IEEE J. Lightwave Tech., vol.LT-3, no.4, pp. 909-913, Aug.1985.
- (9) M. Ikeda, Y. Maeda, and K. Murakami, "Self-detection of lasing characteristics for semiconductor ring laser diodes," Optical and Quantum Electronics, vol.28, pp. 17-23, Jan.1996.
- (10) H. C. Lefevre, and H. J. Arditty, "Electromagnetisme des milieux dielectriques lineaires en rotation et application a la propagation d ondes guidees," Appl. Opt., vol.15, pp. 1400-1409, April. 1982.
- (11) K. Taguchi, K. Fukushima, A. Ishitani, and M. Ikeda, "Experimental Investigation of a Semiconductor Ring Laser as an Optical Gyroscope," IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, vol.48, pp. 1314-1318, Dec.1999.
- (12) K. Taguchi, K. Fukushima, A. Ishitani, and M. Ikeda, "Self-Detection Characteristics of the Sagnac Frequency Shift in a Mechanically Rotated Semiconductor Ring Laser Gyro," Measurement, vol.27, pp. 251-256, Jan.2000.
- (13) S. Kobayashi, and T. Kimura, "Injection locking characteristics of an AlGaAs semiconductor laser," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-16, pp.915-917, Sep.1980.

田 口 耕 造 (正員) 1968年12月18日生まれ。1996年3月立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程電気工学専攻修了。博士(工学)。1995年4月立命館大学理工学部電気電子工学科一号助手。1996年4月福山大学工学部電子電気工学科助手。1999年4月同大学講師。光トラッピング, 光集積回路, 光応用計測に関する研究に従事。電気学会, 応用物理学会などの会員。

石 谷 厚 幸 (非会員) 1975年11月18日生まれ。1998年福山大学工学部電子電気工学科卒業。現在同大学大学院工学研究科修士課程在学中。半導体リングレーザ, 光ジャイロに関する研究に従事。電子情報通信学会の会員。

池 田 正 宏 (非会員) 1944年5月15日生まれ。1969年3月京都大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月日本電信電話公社(現NTT入社)。1993年4月福山大学工学部電子電気工学科教授。工学博士。光エレクトロニクス, 集積回路などの研究に従事。電子情報通信学会, 応用物理学会, IEEEなどの会員。