

# 半導体光増幅器を用いた回転角速度センサーの実験的検討

田口 耕造・福嶋 要・石谷 厚幸・池田 正宏

福山大学工学部電子電気工学科 〒729-0292 広島県福山市学園町1番地

## Experimental Investigation of an Optical Inertial Rotation Sensor Using a Semiconductor Optical Amplifier

Kozo TAGUCHI, Kaname FUKUSHIMA, Atsuyuki ISHITANI and Masahiro IKEDA

Department of Electronics and Electrical Engineering, Fukuyama University, Gakuen-cho, Fukuyama, Hiroshima 729-0292

In this paper, we described the detection characteristics of semiconductor ring lasers (SRL's) as optical inertial rotation sensors. 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, which was detected by the terminal voltage change of an SRL without branching the circulating optical power, depended on the loop radius and the detection sensitivity was proportional to the loop radius. Next we investigated the influence of the turn number of the fiber loop on the detection characteristics and showed that the detection characteristics were independent of the turn number of the fiber loop. These results verify that SRL's can be operated as active ring laser gyros based on the Sagnac effect and indicate the feasibility of small, simple and low cost monolithic semiconductor ring laser gyroscopes.

### 1. ま え が き

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<sup>1)</sup>である。すなわち、光路に互いに逆方向に伝搬している2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  $\Delta L$  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) 可動部分がなく摩擦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  $\Delta L$  を検出する方法により、(i) 光路の外部からレーザー光を導入する受動型光ジャイロと、(ii) 光路内でレーザー発振を生起させ、入力角速度によりレーザー光の発振周波数の差が生じることを利用する能動型ジャイロに分類することができる。受動型光ジャイロはさらに、(i) Sagnac 効果の原理に忠実に光位相差を検出する干渉型と、(ii) 能動型と同様に光路内の光の

共振現象を利用して周波数差として検出する共振型に分類できる。能動型光ジャイロはリングレーザージャイロ (RLG) としてすでに実用化されている。RLG はリング共振器を有する He-Ne レーザー発振器と出力光を検出する受光器から構成されている<sup>2)</sup>。レーザーの発振周波数は 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。すでに 0.001 deg/h にも及ぶ感度が達成されており、ボーイング 747 等の航空機で利用されている。受動型光ジャイロとしては、干渉方式光ファイバージャイロ (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ージャイロ (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<sup>2-5)</sup>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。

筆者らはすでに、半導体リングレーザー (SRL) を用いた半導体リングレーザージャイロスコープ (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

E-mail: taguchi@fuee.fukuyama-u.ac.jp

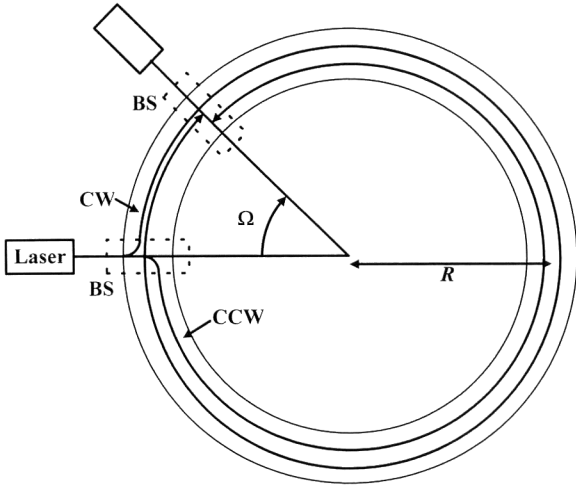


Fig. 1. A simplified Sagnac configuration.

ている<sup>6)</sup>。さらに、左右両回り光の発振周波数差  $\Delta f$  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、半導体光増幅器と単一モード光ファイバーによりリング構成した回転角速度検出器の検出特性に関して検討を行い、提案している S-RLG は Sagnac 効果に基づく光ジャイロスコープ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。また、検出特性は光路軌道の巻数  $N$  には依存しないことを実験により確認し、S-RLG は Sagnac 効果に基づく能動型光ジャイロとして動作していることを示す。さらに、8 字型擬似回転システムを用いて低回転領域での周波数引き込み現象に関して検討を行い、S-RLG も RLG と同様に低回転領域でロックイン現象が発生することを明らかにする。

以下、2 章では、光ジャイロの基本原則である Sagnac 効果について述べており、3 章では S-RLG の回転角速度検出器としての検出特性の実験結果を示し検討を行う。4 章ではまとめを述べる。

## 2. Sagnac 効果

光による角速度検出の原理は 1913 年に Sagnac により提案され、Sagnac 効果<sup>7)</sup>と呼ばれている。閉じた光路を伝搬する光波が光路を一周するのに要する時間は、この光波が慣性空間に対して回転すると変化する。この相対性理論に基づく効果により、光路を左右逆回りに伝搬する 2 光

波間の伝搬時間差  $\Delta t$  は回転角速度に比例するため、時間差  $\Delta t$  を計測することでジャイロ機能が実現できる。

一般に、速度  $V$  で移動する屈折率  $n$  の媒質中を走る速度  $v$  は、静止座標からみる場合、特殊相対性理論により

$$v = \frac{c}{n} + V \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $c$  は真空中の光速である。

ここで、簡単のため Fig. 1 に示す半径  $R$  の円形の光軌道 (屈折率  $n$ ) を考え、円形の光路にビームスプリッター (BS) を用いて右回り光および左回り光を伝搬させる。この光学系が Fig. 1 中に示す方向に光路を含む面内で慣性空間に対して一方向に回転角速度  $\Omega$  で回転するとき、BS によりこの光路に導かれてから再び BS に到達するまでに右回り光が要する時間  $t_{cw}$  および左回り光が要する時間  $t_{ccw}$  はそれぞれ

$$t_{cw} = \frac{2\pi R + R\Omega t_{cw}}{c/n + R\Omega(1 - 1/n^2)} \quad (2)$$

$$t_{ccw} = \frac{2\pi R - R\Omega t_{ccw}}{c/n - R\Omega(1 - 1/n^2)} \quad (3)$$

で与えられる。

したがって、左右両回り光の間には

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

で与えられる伝搬時間差  $\Delta t$  が生じる。ここで、 $c^2 \gg R^2 \Omega^2 / n^2$  を考慮すると

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c^2} \Omega = \frac{4A}{c^2} \Omega \quad (5)$$

が得られる。ただし、 $A$  は円形軌道が囲む面積。

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

$$\Delta L = c\Delta t = \frac{4A}{c} \Omega \quad (6)$$

で与えられる光路差  $\Delta L$  が生じる。そのため、能動型光ジャイロにおいては、この光路差により両回り光の間に次式で与えられる発振周波数差  $\Delta f$  が生じる。ただし、 $\lambda$  は静止時の発振波長、 $L$  はリング長 ( $2\pi R$ ) である。

$$\Delta f = -\frac{4A}{\lambda L} \Omega \quad (7)$$

それゆえ、式(7)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。この方法は、Sagnac 位相差を周波数として抽出するため、精度が高い。式(5)(6)は Sagnac 効果の基本式であり、これら基本式は光路の形状・回転中心・光路の屈折率によらず成立し、一般相対性理論を駆使したより厳密な解析でも検証されている。

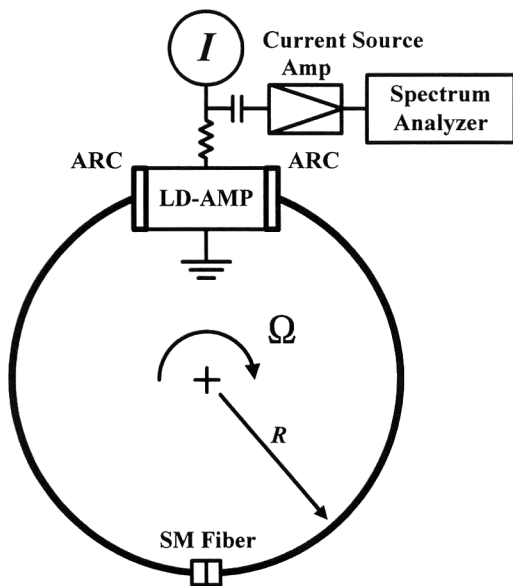


Fig. 2. Simplified schematic diagram of an S-RLG.

Table 1. Parameters of the S-RLGs used for experiments.

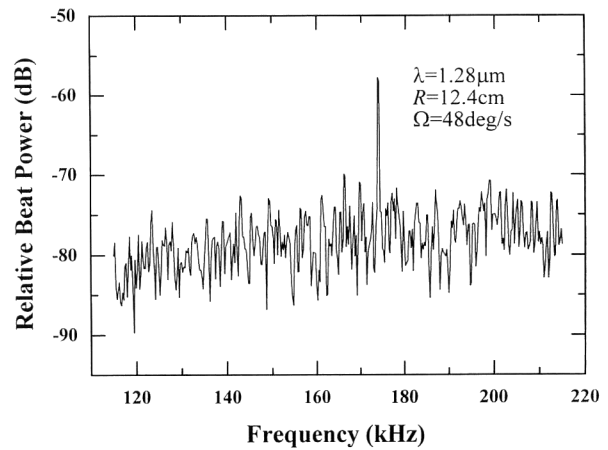
	loop length $L$	loop radius $R$
type A ( $N=1$ )	0.778 m	0.124 m
type B ( $N=1$ )	0.854 m	0.136 m
type C ( $N=1$ )	0.678 m	0.108 m
type D ( $N=8$ )	6.229 m	0.124 m

### 3. 半導体リングレーザージャイロ

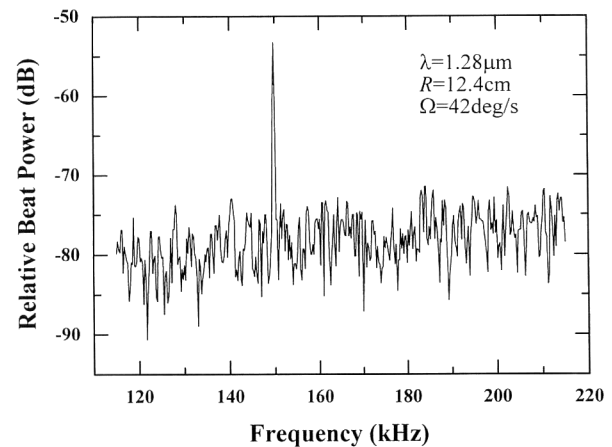
#### 3.1 実験系

Fig. 2 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<sup>6)</sup>。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  $16^\circ\text{C}$  一定に制御している。なお、注入電流値  $I$  は  $1.01 I_{\text{th}}$  ( $I_{\text{th}}=75 \text{ mA}$ ) に設定している。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  $1 \text{ deg/s}$  から  $100 \text{ deg/s}$  の範囲で任意に制御可能である。

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<sup>7)</sup>。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



(a)



(b)

Fig. 3. Detected beat spectrum between counter propagating lasers in a mechanically rotated S-RLG (type A).

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、Sagnac 効果により生ずる左右両回り光の発振周波数差  $\Delta f$  は式 (7) から

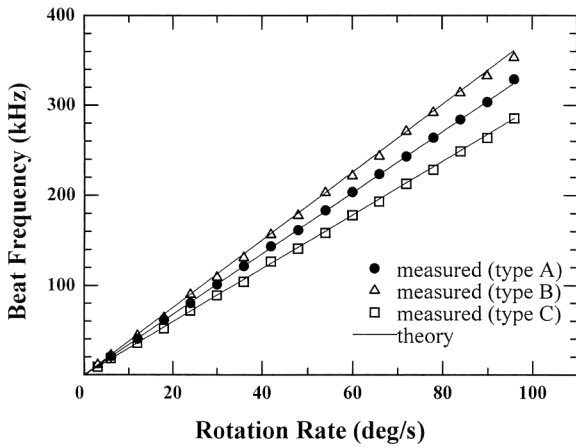
$$\Delta f = -\frac{2R}{\lambda} \Omega \quad (8)$$

で与えられる。

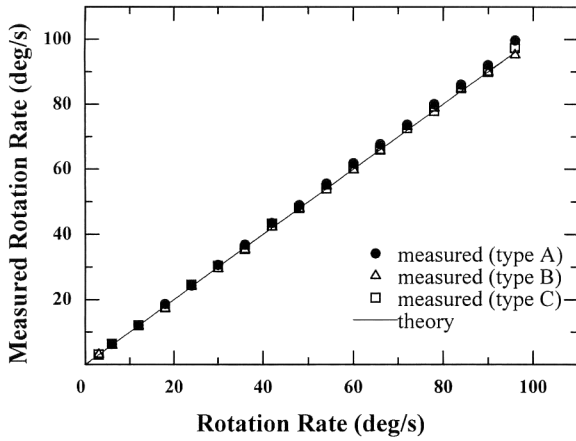
実験では、S-RLG の回転角速度検出特性に関して検討を行うため Table 1 に示す 4 種類の S-RLG (type A, B, C, D) を用いた。

#### 3.2 実験結果

Fig. 3(a) は、モーター軸の回転角速度  $\Omega$  が  $48 \text{ deg/s}$  のときに S-RLG (type A) 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。結果から周波数  $174 \text{ kHz}$ 、幅約  $800 \text{ Hz}$  のビートスペクトルが確認できる。さらにモーター軸



(a)



(b)

Fig. 4. Experimental results. (a) Measured beat frequency as a function of the applied motor axis rotation rate. (b) Measured rotation rate.

の回転角速度を 42 deg/s に減速させたとき、検出されるビート周波数が 149.8 kHz に変化することを確認した (Fig. 3(b)). 本実験系 (type A) においては、 $\lambda = 1.28 \mu\text{m}$ ,  $R = 0.124 \text{ m}$  であり、実験から得られた発振周波数差  $\Delta f_m$  と式 (8) から算出される理論結果  $\Delta f$  がよく一致している。提案している S-RLG においては、発振しているリングモード (縦モード) に対する左右両回り光の周波数シフトによるビートスペクトルを検出対象とするため、レーザーに加わる注入電流変動や温度変化等の外乱の影響による発振スペクトルの変動の影響はキャンセルアウトされるため、発振スペクトル幅に比べて狭い幅のビートスペクトルを端子電圧変化から検出可能であることを確認した。さらに、注入電流を増加させた場合においても Fig. 3 と同様なビートスペクトルを観測することができた。また、このとき SRL の端子電圧の変化からリングキャビティのリングモード間のビートスペクトルが観測されており、

SRL がマルチモードで発振していることを確認することができた。それゆえ、今後の実験において、SRL への注入電流が、(i) ビート検出の安定性、(ii) ビートスペクトルの幅、(iii) 左右両回り光間のモード競合、および (iv) SRL 端子からの検出感度特性<sup>7)</sup> に与える影響に関して検討を行う必要がある。

Fig. 4(a) 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  $\Delta f_m$  とモーター軸の回転角速度  $\Omega$  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  $\Delta f_m$  により式 (8) 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  $\Omega$  の関係を Fig. 4(b) に示す。Fig. 4(a) の結果から入力回転角速度  $\Omega$  と S-RLG で検出されるビート周波数  $\Delta f_m$  は直線関係にあり、また Fig. 4(b) の結果から S-RLG によって計測した回転角速度  $\Omega_m$  とターンテーブルの回転角速度  $\Omega$  はよく一致している。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 Fig. 4(a) 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) に変化したとき、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式 (8) で与えられる理論特性と一致している。

Fig. 5 は、S-RLG (type D) の端子電圧変化から計測したビート周波数  $\Delta f_m$  とモーター軸の回転角速度  $\Omega$  の関係を示している。S-RLG (type D) は、長尺の単一モード光ファイバーと半導体光アンプにより構成されており、光路のリング半径は  $R_a = R_b = 0.124 \text{ m}$ , 光路巻数  $N = 8$ , 全光路長は  $NL = 6.229 \text{ m}$  である。実験結果から、S-RLG (type D) のビート検出特性がリング半径の等しい S-RLG (type A) の検出特性と一致しており、S-RLG の検出感度特性は光路の巻数  $N$  に依存しないことが示されている。

一般にレーザーの発振周波数  $f$  はレーザー共振器の長さで変化し、 $f = c/\lambda$  で与えられる関係式の両辺を  $\lambda$  で微分することで  $df/d\lambda = -c/\lambda^2$  の関係式が得られる。すな

わち、能動型光ジャイロにおいては、式(6)で与えられる光路差  $\Delta L$  により光路内を左右それぞれ逆回りに伝搬する2つの発振光の発振周波数が異なり、左右両回り光間には

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda = -\frac{c}{\lambda} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = -\frac{c}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} \quad (9)$$

で与えられる発振周波数差  $\Delta f$  が発生する。ただし、 $\lambda$  は静止時の発振波長、 $L$  はリング長 ( $2\pi R$ ) である。

ここで、光路巻数  $N$ 、リング半径  $R$  の能動型光ジャイロ内で Sagnac 効果により生じる左右両回り光間の伝搬時間差は  $N\Delta t$  で与えられることを考慮すると、式(9)から Sagnac 効果により発生する両回り光間の発振周波数差は

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda} \frac{cN\Delta t}{NL} = -\frac{c}{\lambda} \frac{c\Delta t}{L} = -\frac{c}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} = -\frac{4A}{\lambda L} \Omega \quad (10)$$

となり、光路巻数によらず式(7)で与えられる。

これらのことは、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示している。

### 3.3 ロックイン現象の検討

すでに提案されている能動型光ジャイロである RLG は低回転領域で両周波数が引き込み合って同一になる現象、すなわちロックイン現象の存在が報告されている<sup>2)</sup>。現在の回転実験システムで用いているモーター軸の下限回転速度は 1 deg/s であり、この範囲では S-RLG のロックイン現象は観察されていない。しかし、本論文で提案している光ジャイロ (S-RLG) も RLG 同様、光源とセンシングループが一体化した能動型ジャイロであるため、低回転時にロックイン現象が発生する可能性がある。そこで、8字型擬似回転システムを用いて、S-RLG の低回転領域でのロックイン現象について検討を行った。実験で用いた 8字型擬似回転システムは、半導体光アンプモジュール、スペクトラムアナライザ、光アイソレータ、光位相変調器および 3-dB カップラーにより構成されている。擬似回転システムでは、S-RLG (上部リング) 内の左右両回り光は 3-dB カップラーにより二分され下部リングに注入され、光位相変調器により変調周波数  $f_m$  で変調される。これらの変調された光の一方はアイソレータにより遮断されるが、他方は 3-dB カップラーを通して上部リング (S-RLG) に注入される。この結果、S-RLG 内の両回り光の間には周波数差  $\Delta f = f_m$  が発生する。このことは、実際に S-RLG を回転させることなく等価的な回転を S-RLG に与えることが可能であることを意味する。そこで、光位相変調器に加える変調周波数  $f_m$  を変化させることで、S-RLG の低回転領域での基本特性の測定を行った。その結果、S-RLG 内の両回り光の周波数差  $\Delta f$  が 90 Hz 以下で

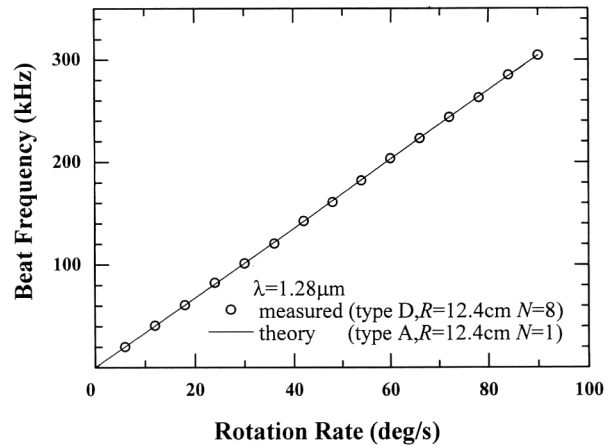


Fig. 5. Experimental results of the beat frequency measured by the terminal voltage change of the S-RLG (type D). The SRL is made of an optical amplifier and a continuous loop of a single-mode fiber wrapped around a cylindrical drum 12.4 cm in radius. The resonator has a perimeter of 6.229 m corresponding to  $N=8$ th turn.

はビートの検出が不可能であることを確認した。すなわち、本論文で提案している S-RLG も能動型ジャイロである RLG と同様にごく低回転領域で両周波数が引き込み合って同一になる現象 (ロックイン) が存在することを確認した。しかし、一般にその引き込み幅は注入されるレーザーパワーに比例し<sup>9)</sup>、今回の実験で用いた擬似回転システムでは、3-dB カップラーにより二分された一方の光を位相変調し S-RLG (上部リング) に注入することで擬似的に Sagnac 効果を生じさせている。しかし、実際には S-RLG 内の光そのものによって Sagnac 効果が発生するため、両周波数の引き込み幅は広くなると考えられる。それゆえ、今後の実験において、(i) 現在用いている回転測定システムを改良し、S-RLG の低回転領域でのロックイン現象を実際に計測すること、(ii) 低回転領域でのロックイン解除法の検討、等が必要である。

## 4. ま と め

本論文では半導体リングレーザージャイロスコープ (S-RLG) の回転角速度検出特性に関して検討を行った。光路半径が異なる S-RLG を用いて検出感度の検討を行い、検出感度特性はリング半径に比例することを実験においても確認することができた。また、長尺の単一モード光ファイバーと半導体光アンプにより構成した S-RLG を用いた実験により、検出感度特性は光路巻数には依存しないことを明らかにし、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。さらに、8字型擬似回転システムを用いて、S-RLG の低回転領域でのロック

イン現象について検討を行い、S-RLGも能動型ジャイロであるRLGと同様に低回転領域でロックイン現象が存在することを確認し、高性能化実現のためにはロックイン解除法の検討が重要であることを示した。

今後、提案しているS-RLGをモノリシック化することで、超小型・低コストな光ジャイロが実現できる可能性があるものと思われる。

## 文 献

- 1) E. J. Post: "Sagnac effect," Rev. Mod. Phys., **39** (1967) 475-493.
- 2) G. J. Martin: "Gyroscopes may cease spinning," IEEE Spectrum, **23** (1986) 48-53.
- 3) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: "An overview of fiber-optic gyroscopes," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-2** (1984) 91-107.
- 4) F. Zarinetchi, S. P. Smith and S. Ezekiel: "Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope," Opt. Lett., **16** (1991) 229-231.
- 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," Photonics Technol. Lett., **4** (1992) 810-812.
- 6) M. Ikeda, K. Taguchi, K. Fukushima and A. Ishitani: "Semiconductor Ring Laser Gyroscopes," CLEO/Europe '98 (1998) pp. CTuE7.
- 7) M. Ikeda: "Signal-monitoring characteristics for laser-diode optical switches," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-3** (1985) 909-913.
- 8) S. Kobayashi and T. Kimura: "Injection locking characteristics of an AlGaAs semiconductor laser," IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 915-917.