

## 端子間電圧変化を用いた自己結合型センサの精度向上に関する研究

Study on accuracy improvement of self-coupling sensor using terminal voltage change

吉松 剛<sup>†</sup>, 五島 敬史郎<sup>††</sup>, 津田 紀生<sup>††</sup>, 山田 諄<sup>††</sup>  
Takeshi Yoshimatsu, Keishiro Goshima, Norio Tsuda, Jun Yamada

**Abstract** Using semiconductor laser, a development of compact sensor which can be measured distance, shape, displacement and speed has been done. Self-coupling sensor is a compact and inexpensive sensor using interference between output light and the scattered light from the target. A measurement method which can detect self-coupling effect from change in terminal voltage of semiconductor laser without photodiode is proposed. The sensor can be more compact by detecting self-coupling effect with this method. The optimum condition of self-coupling sensor using terminal voltage change is studied.

## 1. はじめに

半導体レーザ(以下、LD)を用いた、距離、形状、移動速度などが測定できる小型で安価なセンサの開発を目的とした応用研究がされている。レーザ光を用いた距離測定には、三角測量法による距離測定や、マイケルソン干渉計を用いて LD の周波数変調により生じるビートを測定し距離を測定する方法などが実用化されている。しかし、三角測量法は測定対象となる距離が制限され、マイケルソン干渉計は光学系が複雑になる欠点がある。また、1m 程度の距離において小型で精度のよい距離計がない。

LD はターゲットからの散乱光の一部が活性層に入るとレーザ光出力が揺らぐ。ここで、ターゲットまでの距離がレーザ発振波長の 1/2 の整数倍と等しいという条件を満たすとき、最も光出力を強めようとする。この現象は戻り光ノイズと呼ばれるが、本研究ではこれを自己結合効果として利用する。自己結合型距離センサは、ターゲットからの散乱光との干渉を利用するため、粗面に対する測定が可能である。自己結合効果は距離計測<sup>(1)(2)</sup>のほか、微小振動計測<sup>(3)(4)(5)</sup>、速度計測<sup>(6)(7)</sup>など様々な物理量計測への応用が検討され、研究の報告がされている。

自己結合効果を応用した研究では、ファブリ・ペロー

(以下、FP)型 LD でレーザ光を照射し、LD の後方に搭載されたフォトダイオード(以下、PD)から得られる光電流より、自己結合信号を検出してきた。しかし、FP 型 LD は共振器長が長いことモードホップが発生しやすく、自己結合信号が多数発生し、測定精度を大きく下げてしまう欠点がある。そこで、垂直共振器面発光レーザ(以下、VCSEL)を用いた自己結合効果の研究が行われた<sup>(6)</sup>。FP 型 LD の共振器長が数百  $\mu\text{m}$  であるのに対し、VCSEL の共振器長は数百  $\text{\AA}$  程度と短いため、モードホップの発生を抑え、単一モードで発振できる。しかし、VCSEL は LD 内における光損失を抑え、低い閾値電流で駆動できるよう、反射率 99% 以上の多層膜反射鏡を使用しているため、VCSEL の全反射側に PD を搭載しても、信号を観測できない。

自己結合効果が発生すると VCSEL の発振波長が変化する事<sup>(8)</sup>や、端子間電圧が変化する事<sup>(9)</sup>が報告されている。この端子間電圧の変化分を自己結合信号として測定すれば距離測定ができる。これにより、PD を搭載していない VCSEL でも自己結合効果を利用した距離測定ができる。また、PD を使用しないので、より小型で安価な距離センサとして利用できる。将来的にはセンサを 2 次元アレイ状に、より密に配置することで、高精度な変位、速度、形状測定センサとして用いることができる。

LD は注入電流を変調することで発振波長を変調できる。また、注入電流と発振波長は同じ縦モードにおいて、ほぼ比例関係にある。この性質を利用して VCSEL の注入電流を一定割合で変化させると、先述した条件を一定

<sup>†</sup> 愛知工業大学 大学院 工学研究科(豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学 工学部 電気学科(豊田市)

周期で満たし、自己結合信号が発生する。このとき、自己結合信号 1 つ分の時間で光が往復する長さが距離分解能となる。変調電流の振幅値を大きくすると、条件を満たす回数が多くなる為、距離分解能が良くなる。しかし、注入電流に対する発振波長変化の線形性が悪くなるので、誤差が大きくなる。振幅値を小さくすると注入電流に対する発振波長変化の線形性は良くなるが、条件を満たす回数が少なくなるため分解能が悪くなり、誤差が大きくなる。これは、最適な電流振幅値で LD を駆動することが精度の良い測定に必要なことを示す。また、自己結合信号を検出する受信回路の周波数特性に最適な変調周波数にすることも必要である。

本論文では自己結合型センサの精度向上を目的として、最適な電流振幅値と変調周波数を求める研究を行ったので、その結果を報告する。

2. 測定原理

自己結合効果によって VCSEL の端子間電圧が変化する原理について説明する。Fig.1 に VCSEL 複合共振器モデルを示す。図中の振動波形は入射波と反射波が干渉して発生した定在波である。散乱光の一部が戻り光として VCSEL の活性層に入ると、共振器内のレーザ光と結合し、光出力強度が揺らぐ。このとき、VCSEL の発振波長を  $\lambda$ 、VCSEL の出力ミラーからターゲットまでの距離を  $L$  として、

$$L = \frac{\lambda}{2} n \quad (n: \text{整数}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

の共振条件を満たすと、レーザの光出力は最大まで増加する。VCSEL の共振器内での増幅作用により、実際の戻り光以上の光出力の変動が生じるため、極めて僅かな戻り光量であってもこの現象は生じる。これを自己結合効果と呼び、利用する。

VCSEL は印加電圧を変調すると注入電流が変調されるため、外部変調器を用いることなく VCSEL の発振波長を変調できる。また、印加電圧と発振波長は同じ縦モ

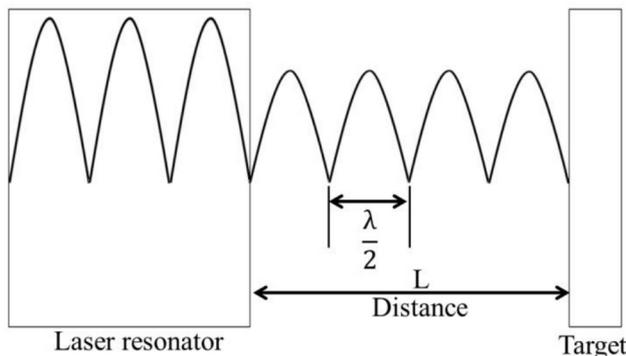


Fig.1 Complex resonator model.

ードにおいて、ほぼ比例関係にある。よって、ある距離  $L$  において、VCSEL の印加電圧を一定の割合で変化させた場合、一定周期で共振条件を満たし光出力が増減する。Fig.2 は VCSEL に三角波変調をかけたときの端子間電圧波形である。VCSEL に三角波変調かけた場合、VCSEL の端子間電圧波形は図中の点線のようにになる。自己結合効果が発生すると VCSEL の端子間電圧は僅かに変動し、一定周期の階段状になる。それが図中の実線部分となる。この波形をモードホップパルス(以下、MHP)と呼ぶ。

印加電圧の変化に対する発振波長の変化が比例的であるとした場合、共振条件を満たす隣り合った端子間電圧の発振波長の差  $\Delta \lambda$  は式(2)となる。

$$\Delta \lambda = \lambda_n - \lambda_{n+1} = \frac{2L}{n(n+1)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $n$  は定在波の数である。 $L$  は  $\lambda$  に比べて十分大きいことから、 $n$  は 1 より十分大きいので式(2)を

$$\Delta \lambda = \frac{2L}{n^2} \dots\dots\dots(3)$$

と近似できる。VCSEL は印加電圧を変調すると注入電流が変調される。また、印加電圧と発振波長は同じ縦モードにおいて、ほぼ比例関係にある。よって、変調効率

$$\frac{d\lambda}{dV} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta V} \dots\dots\dots(4)$$

とすることができる。式(3)を式(4)に代入して

$$\frac{d\lambda}{dV} = \frac{2L}{n^2} \frac{1}{\Delta V} \dots\dots\dots(5)$$

となる。共振回数  $N$  は、MHP 周波数を  $F$ 、印加電圧振幅値を  $V_m$ 、変調周期を  $t_m$  とすると

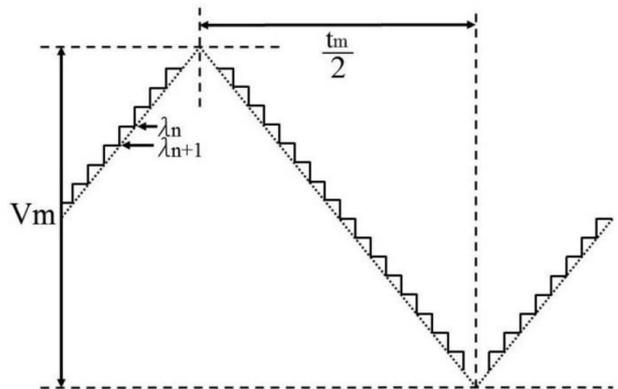


Fig.2 Voltage waveform modulated with triangular wave.

$$N = \frac{V_m}{\Delta V} = \frac{t_m}{2} F \dots \dots \dots (6)$$

が得られる。従って、式(5)から  $\Delta V$  を式(6)に代入すると、共振回数  $N$  は

$$N = \frac{n^2 d\lambda}{2L dV} V_m \dots \dots \dots (7)$$

式(6)を  $F$  についてまとめると

$$F = \frac{V_m}{\Delta V} \frac{2}{t_m} \dots \dots \dots (8)$$

ここで変調周波数  $f_m$  は  $f_m = \frac{1}{t_m}$  より

$$F = \frac{V_m}{\Delta V} \frac{2}{t_m} = f_m V_m \frac{n^2 d\lambda}{L dV} \dots \dots \dots (9)$$

電圧振値  $V_m$  に対する電流振幅値  $I_m$  および電流に対する変調効率  $d\lambda/dI$  を用いると、 $n = \frac{2L}{\lambda}$  より、MHP 周波数  $F$  は以下ようになる。

$$F = 4f_m I_m \frac{L}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dI} \dots \dots \dots (10)$$

よって、MHP 周波数は距離に対して比例的に変化する。これを利用して距離測定を行うことができる。このとき、MHP の 1 つ分の時間で光が往復する長さが距離分解能となる。最大測定可能距離は使用する VCSEL のコヒーレント長によって制限される。

### 3. VCSEL の発振波長特性

本研究で使用した VCSEL は ULM850 である。円偏光で、単一モード発振している。先述したように、注入電流の振幅値は自己結合型センサの測定精度に影響する。そのため、使用する VCSEL の発振波長特性をもとに注入電流値を設計しなければならない。Fig.3 は周囲温度 25°C における ULM850 の波長特性である。850nm 帯で最高分解能 3pm の ADVANTEST 社製光スペクトラムアナライザである Q8347 を使用して測定した。Fig.3 より、ULM850 はサイドモードがピーク波長に対して約 1/8 以下の大きさとなっており、単色性が良いことがわかる。Fig.4 は注入電流に対する発振波長の変化を示す。Fig.4 より、発振波長は注入電流に対してほぼ比例的に変化し

ていることがわかる。注入電流の振幅値が大きいと定在波の数が増え、共振条件を満たす回数が多くなるため、分解能は良くなる。しかし、注入電流に対する波長変化の線形性が悪くなるため、誤差が大きくなる。注入電流の振幅値を小さくすれば注入電流に対する波長変化の線形性は良くなるが、共振条件を満たす回数が少なくなるため分解能が悪くなり、誤差が大きくなる。つまり、電流振幅値の大きさによっては誤差が大きくなるので、精度のよい測定をするためには最適な電流振幅値で駆動させなければならない。また、LD の周囲温度が変化しても注入電流に対する発振波長の傾きの変化が小さくなければならない。ULM850 では、中心電流を約 5.35mA としして三角波変調すれば、周囲温度が変化しても MHP 周波数の変化を抑えることができる。5.35mA を基準としたときの変調効率  $0.418\text{nm}/\text{mA}$  である。精度の良い測定に適した注入電流振幅値を決定するためには、いくつかの電流振幅値で実際に距離測定を行う。振幅値を徐々に大きくすると誤差が小さくなっていき、ある程度の大きくすると誤差が増加するような V 字の曲線を描くので、最も平均誤差の低かったものを最適な電流値とする。

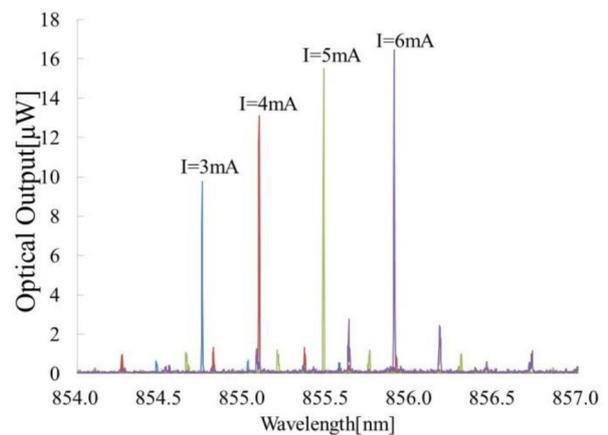


Fig.3 Wavelength characteristic of ULM850.

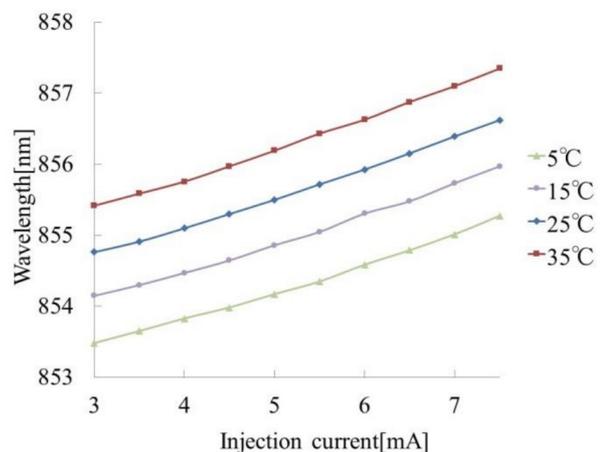


Fig.4 Wavelength vs. injection current of ULM850.

#### 4. 距離測定システムおよび方法

本研究で製作した距離測定システムを Fig.5 に示す。センサ部はシグマ光機社製の直径 20.0 mm、焦点距離 21.2 mm の集光レンズと ULM850、これらを収めるシリンダーからなる。レーザー光はシリンダーの長さを調節することで、平行ビームだけでなくターゲットへレーザー光を集光できるようにしている。この調整は測定内容に応じて行う。ターゲットには反射シートを使用した。

VCSEL 駆動回路はファンクションジェネレータ(図中、FG)で三角波電圧を印加すると、5.35mA を基準値とした三角波電流を出力する。また、受信回路によって端子間電圧の変化分を取り出し、その信号周波数を MHP 周波数として距離測定を行う。MHP 周波数はオシロスコープの FFT 解析によって測定する。端子間電圧の変化分は約 0.1 mV 程度と小さい。また、VCSEL の端子間電圧は変調信号成分、直流成分、MHP 信号成分からなるので、機器ノイズとともに MHP 信号以外の信号成分を除去して、MHP 信号のみを大きく増幅しなければならない。よって受信回路は、増幅作用を有したハイパスフィルタおよびローパスフィルタによって構成している。ハイパスフィルタおよびローパスフィルタのカットオフ周波数は、それぞれ 200 kHz と 6.5 MHz としている。

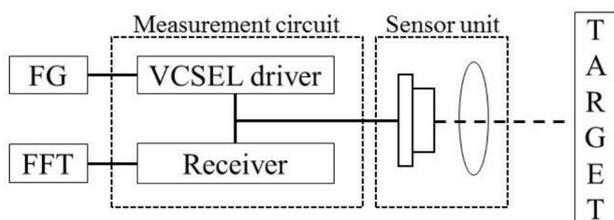


Fig.5 Measurement system.

#### 5. 測定結果

##### 5・1 電流振幅値に対する平均誤差の変化

電流振幅値の大きさを変化させ、各振幅値に対する平均誤差の変化を検証した。レーザー光は平行ビームにして、距離 5cm から 80cm まで測定した。電流振幅値は 0.6mApp から 4.2mApp まで変化させた。変調周波数は 1.5kHz である。Fig.6 は電流振幅値を 1.8mApp にして測定した結果である。5 回測定を行い、各距離において平均値を計算し、平均値と理論値を用いて距離に対する平均誤差を求めた。MHP 周波数理論直線は変調周波数  $f_m$  を 1.5kHz、三角波電流振幅値  $I_m$  を 1.8mApp、中心波長  $\lambda$  を 855nm、変調効率  $d\lambda/dI$  を 0.418nm/mA として、式(10)の理論式を用いて計算したものである。このことは他の測定においても同様に行っている。Fig.6 より、端子間電圧の変化

を利用して検出した MHP 周波数は距離に対して比例的に変化していることが確認できる。このことから、端子間電圧の変化を利用した距離測定は可能であるとわかる。レーザー光を平行ビームにして変調周波数を 1.5kHz、振幅値を 1.8mApp とした測定の平均誤差は 0.29% となった。

Fig.7 は各振幅値に対する平均誤差の大きさを表したグラフである。このグラフから、1.8mApp で駆動させると精度のよい測定ができるとわかる。

##### 5・2 平行ビームと集光との比較

Fig.8 は変調周波数を 1.5kHz、振幅値を 1.8mApp とし、測定距離ごとにターゲットへレーザー光を集光した測定の結果である。ターゲットへ光を集光した場合、15cm 未満の距離では集光できなかったため、測定距離は 15cm から 80cm とした。

Fig.6 と Fig.8 の距離に対する誤差と比較すると、Fig.8 の誤差は小さく抑えられていることが確認できる。平均誤差は 0.15% となった。よって、測定距離ごとにターゲットへ光を集光した方が、測定精度は良いと言える。測

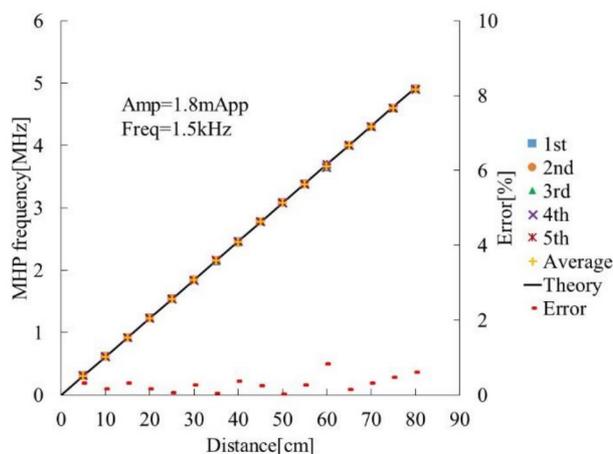


Fig.6 Measurement result with collimated beam.

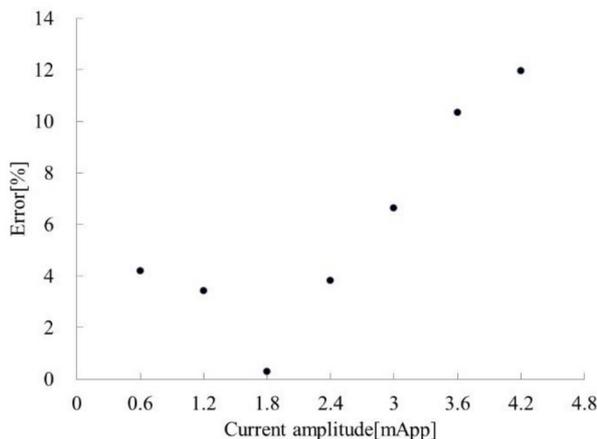


Fig.7 Error as a function with current amplitude.

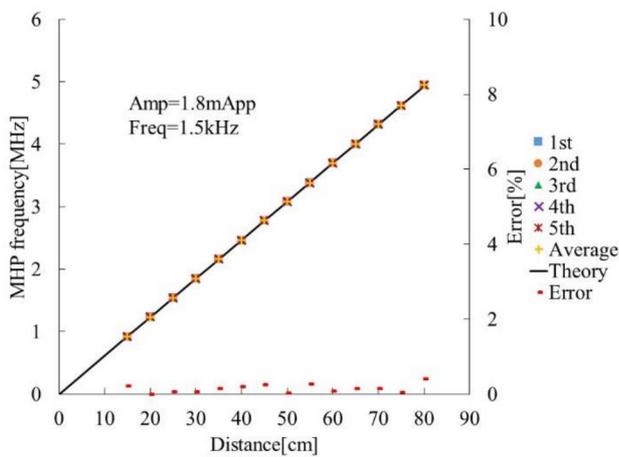


Fig.8 Measurement result with focused beam.

定距離ごとにターゲットへレーザ光を集光した場合、平行ビームと比較すると戻り光量が大きいので、測定精度が良いと考えられる。

### 5・3 変調周波数に対する誤差の変化

変調周波数を変化させても共振条件を満たす回数は変化しないので、距離分解能に影響しない。しかし、設計した受信回路の周波数特性に適した変調周波数で測定する必要があるため、変調周波数を変化させて実際に測定することは精度の良い測定をする上で必要である。

Fig.9は距離15cmから80cmまでを測定範囲とした、変調周波数を変化させた場合の平均誤差の変化を示す。レーザ光は測定距離ごとにターゲットへ集光し、振幅値は1.8mAppとしている。Fig.9より、変調周波数を変化させた場合も振幅値を変化させた場合と同様に誤差が変化した。変調周波数が低いとMHP周波数がハイパスフィルタのカットオフ周波数に近くなり、変調周波数が高くなるとローパスフィルタのカットオフ周波数に近くなるので、MHP周波数に誤差が表れたものと考えられる。

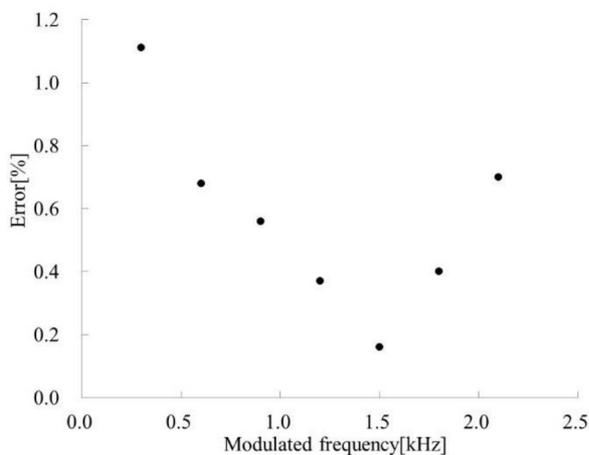


Fig.9 Error as function of modulated frequency.

### 5・4 測定最長距離

5・3節までの測定結果から、ULM850を用いた測定の場合、レーザ光は測定距離ごとにターゲットへ集光し、電流振幅値を1.8mApp、変調周波数を1.5kHzとすれば最も精度の良い測定ができることが確認できた。ここでは、上記の条件で測定できる限界の距離を示す。Fig.10は上記の条件で測定した結果を示す。測定限界距離は105cmで、平均誤差は0.15%となった。これ以上長い距離ではMHP周波数がローパスフィルタのカットオフ周波数を超えてしまい、測定できなかった。測定距離1mでも誤差の大きさが0.1%程度に抑えられているので、このセンサは高精度なセンサとして利用できるとわかる。

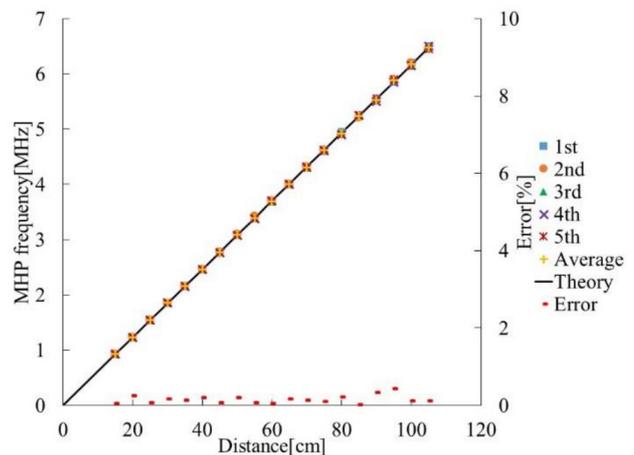


Fig.10 Measurement limit distance.

## 6. まとめ

外部反射面の散乱光の一部が戻り光としてLDの活性層内に入ると、共振器内のレーザ光と干渉して光出力が揺らぐ。この現象を自己結合効果として利用した距離測定センサの研究を行った。

LDの自己結合効果を応用した研究ではこれまでFP型LDを使用してきたが、FP型LDでは共振器長が長くモードホップが発生しやすいので、VCSELを用いた自己結合効果の研究を行った。VCSELは半導体基板側に多層膜反射鏡を使用しているため、VCSELの後方にPDを搭載してもMHPを検出できない。そこで、自己結合効果による光出力の変動に伴ったLDの端子間電圧の僅かな変化を利用した。この方法であればPDを必要としないので、より密なセンサの配置が可能となる。

自己結合効果を利用した距離センサはVCSELに三角波電流を注入している。三角波電流の振幅値を大きくすると共振条件を満たす回数が多くなるので、分解能が良くなる。しかし、注入電流に対する波長変化の線形性が悪くなるので、誤差は大きくなる。また、振幅値を小さく

くすると注入電流に対する波長変化の線形性は良くなるが、分解能が悪くなるので誤差が大きくなる。このことから、精度の良い測定を行うためには、最適な電流振幅値で VCSEL を駆動させなければならない。また、設計した受信回路の周波数特性にあわせて変調周波数を決定する必要もある。そこで、自己結合型センサの精度向上を目的として、最適な電流振幅値と変調周波数を求める研究を行った。

反射シートをターゲットとして、レーザ光を平行ビームにし、電流振幅値を大きさに対する平均誤差の変化を測定したところ、振幅値が 1.8mA のときに平均誤差が最も小さくなった。また、測定距離ごとにターゲットへレーザ光を集光した場合と平行ビームで測定した場合を比較すると、ターゲットにレーザ光を集光した方が平均誤差は小さくなった。ターゲットにレーザ光を集光した方が平行ビームより戻り光量が大きいためであると考えられる。また、変調周波数を変化させて測定を行ったところ、最も平均誤差が小さくなった変調周波数は 1.5kHz であった。これらの結果を踏まえて測定限界距離を測定した結果、測定限界距離は 105cm となり、距離 1m に対する誤差を約 0.1% に抑えられた。以上のことから、このセンサは高精度な測定ができると確認できた。

#### 参考文献

- (1) 坂本明紀・津田紀生・山田諄：「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」 電学論 C, Vol.126, No.12, pp.1454-1459 (2006)
- (2) 中尾祐介・津田紀生・山田諄：「半導体レーザの自己結合効果を用いた自己補正型距離計」 電学論 C, Vol.121, No.12, pp.1819-1825 (2001)
- (3) T. Gharbi, A. Courteville and A. Chebbour : "Backscatter-modulated laser diode for low-frequency small-amplitude vibration measurement", Appl. Opt. 36, pp.8233-8237 (1997)
- (4) G. Giuliani, S. Donati, and L. Monti : "Self-mixing laser diode vibrometer with wide dynamic range", Proc. SPIE Vol. 4827, pp.353-362 (2002)
- (5) 名和靖彦・津田紀生・山田諄：「自己結合効果を用いた微小振動の自動測定」、電学論 C, Vol.129, No.12, pp.2115-2120 (2009)
- (6) P. J. Groot, G. M. Gallatin, and S. H. Macomber : "Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode", Appl. Opt. 21, No. 21, pp.4475-4480 (1988)
- (7) L. Krehut, J. Hast, E. Alarousu, and R. Myllyla : "Low cost velocity sensor based on the self-mixing effect in a laser diode", Opto-Electronics Rev. 11, No. 4, pp.313-319 (2003)
- (8) J. Hashizume, S. Shinada, F. Koyama, K. Iga : "Reflection Induced Voltage Change of Surface Emitting Laser for Optical Probing", Optical Review, Vol. 9, No. 5, pp.186-188 (2002)
- (9) C. Gorecki, S. Khalfallah, H. Kawakatsu, Y. Arakawa : "New SNOM sensor using optical feedback in a VCSEL-based compound-cavity", Sensors and Actuators, A-87, pp.113-123(2001)

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 26420397 の助成を受けたものです。

(受理 平成 27 年 3 月 19 日)