

自己結合効果による端子間電圧変化を用いた距離測定

Distance measurement using terminal voltage fluctuation by self-coupling effect

佐野敏之†, 津田紀生††, 山田諄††

Toshiyuki Sano, Norio Tsuda, Jun Yamada

Abstract A distance measurement using self-coupling effect of laser diode has been studied. In the study, a photo diode is used to detect the self-coupling effect. Recently, the terminal voltage fluctuation in laser diode by self-coupling effect is detected. If the photo diode is not used to detect the self-coupling effect, more laser diodes can be densely integrated in array on semiconductor substrate. So we try to measure a distance using terminal voltage fluctuation in laser diode by self coupling effect.

1. はじめに

半導体レーザはこれまでの大型レーザと違い、安価、小型、軽量、高利得且つ高効率であることや、注入電流によってレーザ光の波長や出力の調整や変調などの制御がしやすいという利点を持っている。このような特徴を活かし、すでに光通信技術、光情報技術やレーザプリンタなどに使われており、その他にも物体の形状測定、距離測定、回転制御測定などといった計測の分野にも広く応用されるようになった。そのため現在では、工場内の生産ラインにおいて、距離、外形、形状センサとして多く使用される。

現在、工場では生産ラインの自動化(ファクトリーオートメーション)が進みより多くのロボットが使用されるようになった。そのために、工場の生産ラインで物体の形状測定が高速に行う事ができる、高性能、小型で安価な距離センサの需要が高まっている。そこで、小型、高精度、安価かつ非接触で測定することができる半導体レーザを使用して距離測定を行った。

現在、レーザ光を用いた距離測定の方法には、三角測量法とマイケルソン干渉計がある。三角測量は実用化されており、その特徴として分解能がマイクロメートルと高精度な測定が可能であるということが挙げられる。し

かし、測定可能範囲が非常に狭く、対象物までの距離測定が制限されるという欠点を持っている。また、マイケルソン干渉計を用いて半導体レーザの周波数変調により生じるビートを測定し距離を求める方法もある。この方法は三角測量法よりも測定距離は長く、また精度もよいが、光学系が複雑で外部振動に弱いという問題を持っている。

そこで本研究では半導体レーザの自己結合効果を利用して距離測定を行った。自己結合効果とは、レーザ光がターゲットに当たり、その散乱光が半導体レーザに戻ってきた時、レーザの戻り光と出力光の位相がそろうとレーザの出力が微小に増加する現象のことである。この現象は従来ではノイズとして扱われ、極力表れないようにしてきた。しかし、本研究ではこの現象を積極的に利用して距離測定を行った。

自己結合効果を用いた距離計はフォトダイオード内蔵の半導体レーザを用いる事で自己結合効果の検出ができる。そのため半導体レーザのみで発光、干渉、受光を兼ねる事ができ、センサ部が半導体レーザとレンズのみの構成となる事から非常に小型で外部振動に強い¹⁾。

近年、この自己結合効果の検出がフォトダイオードだけでなく、半導体レーザの端子間の電圧変化からでも検出できる事が判明した²⁾。将来的には、半導体レーザを半導体基板に二次元アレイ状に配列し、形状測定に用いる事を目指している。そのためフォトダイオードを用いずに自己結合効果を検出し、距離測定が可能であるのならば、二次元アレイ状に配列する時により密に配列することができる。それだけでなく、自己結合型距離計の応

† 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 電気学科
電子工学専攻 (豊田市)

用範囲が広がる事が期待される。しかし、半導体レーザによる端子間電圧の変化については、現在までほとんど研究が行われてこなかった。そこで本研究では、自己結合効果の新たな応用方法の研究として端子間電圧から自己結合効果の検出をして、距離測定を行う事を目的とした。

本研究ではまずある程度の戻り光量の確保のために焦点距離 10mm、直径 10mm のレンズを使用し、そしてターゲットには特殊な反射板を用いて自己結合周波数を測定した。次に従来は自己結合効果をフォトダイオードで検出をしていたので、フォトダイオードとの違いを調べるために同じレンズ、同じターゲットを用いて自己結合周波数を測定した。最後に端子間電圧変化を用いた場合とフォトダイオードを用いた場合とで比較を行った。

2. 測定原理

2.1 自己結合効果

単一波長で動作する半導体レーザはコヒーレントが高いために、可干渉性が強いという特徴がある。このために、レーザ光が対象物に当たり、その散乱光の一部が半導体レーザの活性領域内に戻ると、出力光と干渉しあう。一般的にこの干渉を戻り光ノイズと呼んでおり、この戻り光ノイズは、出力光に対する相対的な戻り光パワーが 10^{-6} 程度と極めて低い値でも顕著に現れてくる。なぜならば、出力光と戻り光が共振条件を満たすと、半導体レーザの活性領域内における増幅作用により、実際に戻ってくる光量よりも大きな出力の増加が起こるためである。この現象はこれまでの各種の応用技術に対して雑音の原因として大きな障害となっていた。しかし、この現象を積極的に利用すれば距離測定に応用できる。この効果を用いる事で、距離測定装置のセンサ部は半導体レーザとレンズというシンプルな構成となるため、小型化が可能となる。また、非常にわずかな戻り光でも顕著に現れるために、対象物がミラーのような反射物体でなくても距離測定が可能である。

自己結合効果型距離計のモデルを簡単に表したものを図 1 に示す。

発振波長を λ 、VCSEL の出力ミラーから外部反射面までの距離を L とすると共振条件は

$$L = \frac{\lambda}{2} \times n \quad (n \text{ 整数}) \quad \text{式(2.1)}$$

となる。ここで n は定在波数である。式(2.1)を満たす時出力光と戻り光は強めあい、光出力が僅かに増加する。これを自己結合効果と言う。

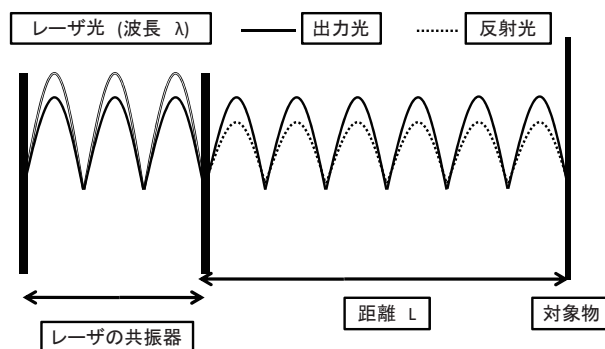


図 1 自己結合型距離系の簡易モデル

2.2 自己結合効果による端子間電圧の変化

自己結合効果によって光出力に変化が生じる。その際にレーザにはレーザの端子間にも電圧変化が生じる。その主な原因は自己結合効果によって光出力が上昇するとそれに伴い、半導体レーザへの入力電力も増加するからである。そのため W を半導体レーザの消費電力、 V を電圧、 I を電流とすると

$$W = V \times I \quad \text{式(2.2)}$$

と表す事ができる。半導体レーザは電流一定で駆動するので、電力 W が増加すると電圧 V に変化が生じる。

2.3 自己結合効果による光出力と距離の関係

半導体レーザは注入電流が変化すると発振波長も変化するという特性を持っている。本研究ではこの特性を活かすために半導体レーザに三角波の電流変調を行っている。図 2 左図で示すように半導体レーザに電流変調を加える事で、発振波長が変化し共振条件を満たす時と満たさない時が発生し、光出力の増加が起こる。この時、注入電流と発振波長の関係が線形的であるとすれば、共振条件を満たす光出力の増加は常に一定の間隔で起こり、これを時間に対する電圧で観測すると図 2 右図の実践部。

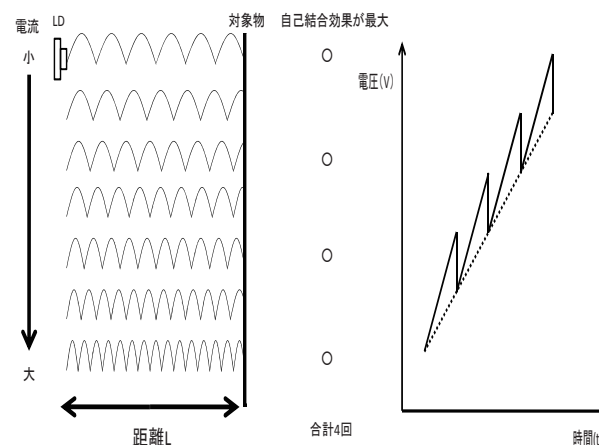


図 2 距離と自己結合効果の関係性(距離 L)

分で表されるように、のこぎり刃状になる。

図2に示す例を使って説明する。図2の例では電流を変化させた時、波長が変化し、共振条件を満たす回数は4回である。この時端子間電圧を観測すると、自己結合効果が起こった分だけ電圧が上昇し、4つののこぎり波形が発生する。ここで長さLを半分のL/2とすると図3のようになる。

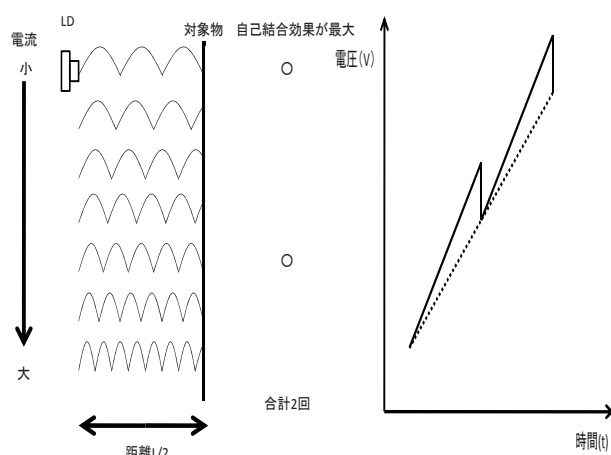


図3 距離と自己結合効果の関係性(距離L/2)

図3から分かるように距離が半分になると共振条件を満たす回数は半分の2回となる。このとき端子間電圧を観測すると、共振条件を満たす回数が半分になったので、のこぎりの数が半分の2個になる。つまり、半導体レーザーに電流変調をかけると、共振条件を満たす回数がターゲットまでの距離に対して比例する。このため変調をかけた時における、電圧の増減から生じる周波数を測定する事で距離測定が可能となる。この時、共振条件による端子間電圧の微小な変化を自己結合周波数と呼ぶ。従来の自己結合型距離計は、この変化を内蔵のフォトダイオードで検出を行っていた。そこで本研究では自己結合効果を端子間電圧の変化から検出し、半導体レーザー内蔵のフォトダイオードで検出する場合と比較することにした。

3. 測定システム

3.1 システム概要

測定システムを図4に示す。本研究で試作した装置は、センサ部とVCSEL駆動回路と周波数測定回路から構成されている。測定に使用した半導体レーザーはVCSEL型を用いた。VCSELはOPTEK社の光通信用面発光型半導体レーザーOPV310を用いて、発振波長は850nm、光出力は3mWとした。

VCSELと集光レンズからなるセンサ部は、アルミ板、とバネから構成され、VCSELはVCSEL駆動回路によっ

て発振し、レーザー光は直径10mm、集光距離10mmのレンズを用いて14cm先で集光してターゲットに照射した。ターゲットは住友3M社製のスコッチ印反射シート4090を使用して、戻り光量を多くとった。レーザー光はターゲットに当たり、散乱を起こしその一部がVCSELの活性領域内に戻り自己結合効果を起こす。自己結合効果によって端子間電圧の変化が引き起こされるので、この変化を増幅するためにVCSELの端子間側にアンプを接続し、変調周波数と高周波ノイズ除去のためにハイパスフィルタとローパスフィルタ回路を用いた。その後、自己結合周波数測定のために、高速フーリエ変換(FFT)を用いて解析を行った。本研究で用いたFFTはTektormix社製のTDS2010Bを使用した。そして本研究では比較のために自己結合効果によって引き起こされる変化をフォトダイオードからも検出を行い、I-Vコンバータを通し、その後フィルタ回路を通して同様にFFTで測定を行った。

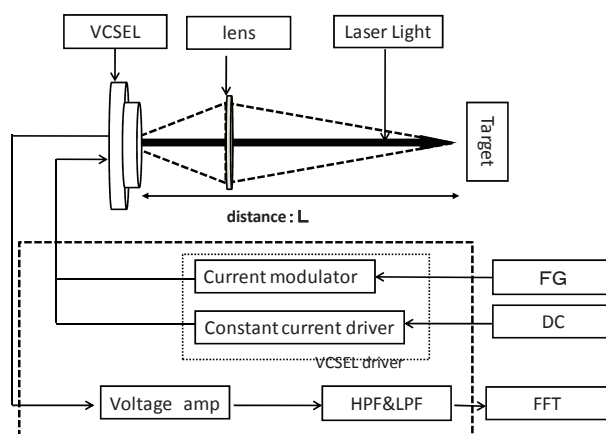


図4 測定システム

3.2 センサ部

自己結合型距離計は小型、軽量かつ安価な距離センサとして製作することが可能である。実際に自己結合型距離計のセンサ部はPD内蔵のVCSEL、集光レンズとアルミ板そしてバネから構成されており、距離測定はこれだけで行える事ができるため、従来のものと比べると非常にシンプルで小型となる。

VCSELとレンズは装置の前方に設置し、それぞれVCSELとレンズを固定している板の4隅にねじ穴を開け、そこにねじを通して2つのアルミ板を固定した。VCSELを固定しているアルミ板とレンズを固定しているアルミ板の間にバネを使用して、VCSELとレンズの距離が一定になるようにし、ねじの調節によってVCSELとレンズの距離が一体化するようにした。また、VCSELは絶縁のためにテープを巻いてある。

4. FFT を用いた自己結合周波数の測定

4.1 端子間電圧を用いた自己結合周波数測定

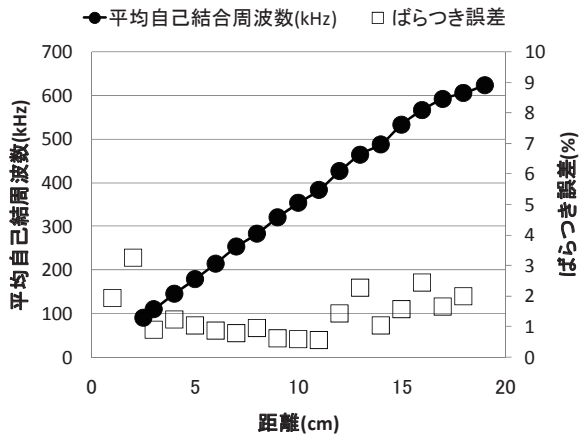


図 5 端子間電圧を用いた測定結果

図 5 に実際に端子間電圧の変化を用いた実験で得られた結果を示す。図 4 の装置を使用し、基準電流を 10mA、変調周波数は 2kHz、FG の振幅電圧 1Vpp とし、変調回路を用いて VCSEL に ±1mA の電流を加えた。その時における VCSEL の光出力 3mW、発振波長 850nm でレーザ発振させて、距離に対する自己結合周波数の測定を行った。集光距離は 14cm ようにレンズと VCSEL の距離を一定に保ち、測定距離は 2.5cm～測定不可能までとした。図中にある平均自己結合周波数は各距離における測定を 3 回行いその平均をとったものである。また本研究におけるばらつき誤差の算出方法は、平均自己結合周波数から各々の自己結合周波数との誤差をとり、その平均を出したものである。

実験の結果から、距離に対して自己結合周波数は直線的な関係をとっている事がわかる。この事から端子間電圧の変化からでも距離測定を行う事は十分に可能であると言える。またばらつき誤差の最大は 3%程度と低くなっている。最低距離は 2.5cm なのは、ハイパスフィルタ回路のカットオフ周波数が 90kHz となっているために、それより低い周波数帯が排除されてしまうという事と、戻り光の焦点距離がレーザの活性領域からずれてしまい、活性領域に十分な戻り光が戻らないためである。最高測定距離は 19cm となった。距離が長くなると活性領域に戻る戻り光量が減ってしまい、端子間の電圧変化が小さくなる。そのため変化がノイズの中に埋もれてしまい測定が不可能となってしまった。

4.2 フォトダイオードを用いた自己結合周波数測定

図 6 にフォトダイオードを用いて測定した場合の実験結果を示す。実験を行った条件は 4.1 の時と同じ状態で検出の方法をフォトダイオードに切り替えた。フォトダイオードの出力は電流であるので I-V コンバータを通して、電圧に変換を行い、その後ハイパスフィルタ、ローパスフィルタを通して FFT で測定を行った。

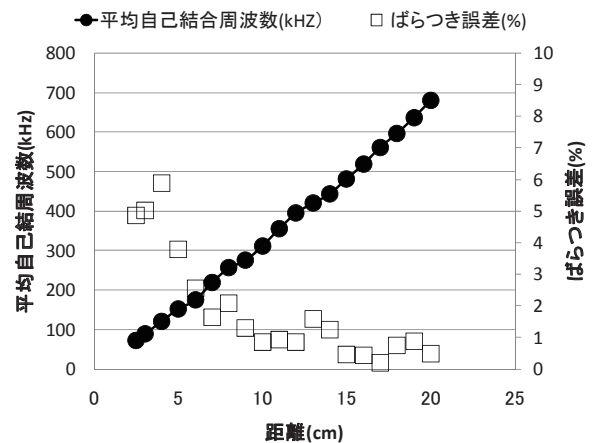


図 6 フォトダイオードを用いた測定結果

図から分かるように、フォトダイオードの場合においても距離に対して自己結合周波数は直線的な関係を持っている。またばらつき誤差の最大は 6%と高い値になっている。最低距離は 2.5cm となっている。原因としては、端子間電圧の場合と同じようにフィルタ回路のカットオフ周波数が 90kHz となっている事と、近くなると戻り光が十分にレーザの活性領域に戻らないためである。最高距離は 20cm となった。これは本研究でターゲットとして用いたステージ台が、最高 20cm までしか動かないためである。実際は 20cm よりも遠距離を測ることが可能である。

4.3 二つの比較 (レンズ有)

端子間電圧の変化を用いた場合とフォトダイオードを用いた場合の距離に対する平均自己結合周波数の比較を図 7 に示す。

図から分かるように、端子間電圧における場合もフォトダイオードにおける場合も距離に対して直線的な関係を保っており、端子間電圧の変化から取り出した自己結合周波数はフォトダイオードから取り出した自己結合周波数に近いものとなった。値が完全に一致しなかったのは、本研究の測定は手動で行っていたので、人の手による測定の誤差であると言え、またそれだけでなく端子間電圧を用いる場合のほうがフォトダイオードを用いる場合

の時の測定と比べると S/N 比が悪い事が挙げられる。

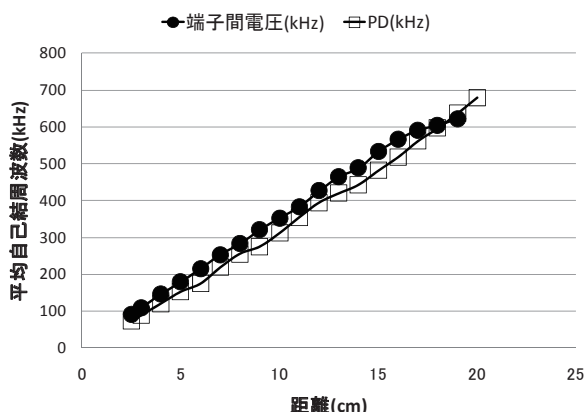


図7 二つの自己結合周波数の比較

4.4 端子間電圧を用いた測定(レンズ無)

本研究の目的は半導体基板にアレイ状にして配置し形状測定をすることが目的である。そのため、できるだけ光学系は単純である事が望ましい。そこで本研究で図4における測定システムからレンズを取り外し、より光学系を単純にした場合においても測定を行った。

図4の実験装置からレンズのみを取り外し、それ以外の条件は4.1の時と同じ状態でFFT用いて測定を行った。その時の実験結果を図8に示す。

図8から分かるように、レンズを使用しない場合でも距離に対して自己結合周波数は直線的な関係を持っている。しかし、レンズを使用した場合に比べると最大距離が4.5cmと短くなった。またばらつき誤差においてもレンズを用いた場合と比べると大きくなった。最低測定距離は2.5cmとなった。これはフィルタのカットオフ周波数と戻り光が活性領域に十分入らないためである

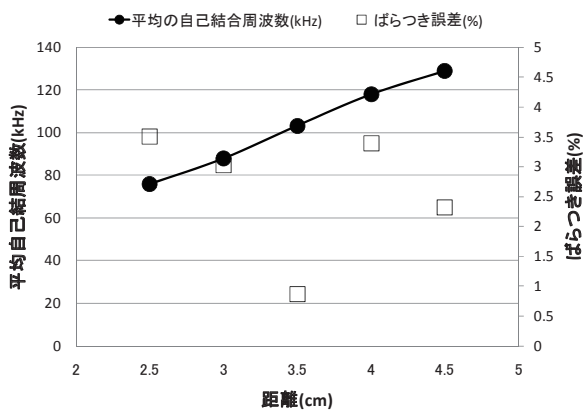


図8 端子間を用いた測定 (レンズ無)

4.5 フォトダイオードを用いた測定 (レンズ無)

比較のためにフォトダイオードにおいてもレンズを取り外し実験した。

図9に実験の結果を示す。図から分かるように距離に対して自己結合周波数は直線的な関係を持っている。フォトダイオードにおいても、最大測定距離は14cmとレンズを使用しない時と比べると測定距離は短いものとなった。また、ばらつき誤差においてもレンズを用いない場合と比べると大きくなっている事が分かる。最低測定距離は2.5cmとなった。これはフィルタ回路のカットオフ周波数と活性領域に戻り光が十分に入らない事が原因である。

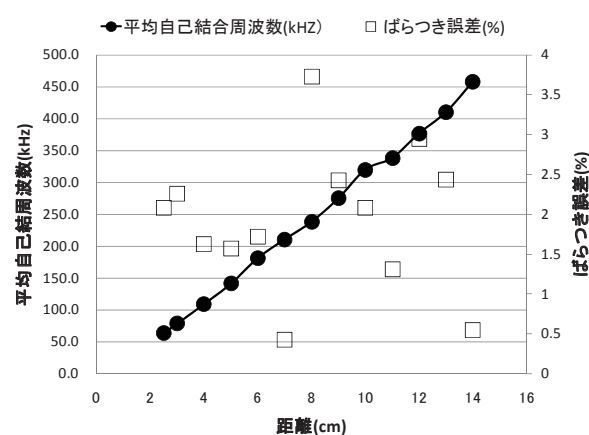


図9 フォトダイオードを用いた測定 (レンズ無)

4.6 二つの比較 (レンズ無)

二つの自己結合周波数を比較したものを図に示す。

図から分かる通り、端子間電圧もフォトダイオードでも距離に対して直線的な関係を持っている事が分かった。しかし、端子間電圧の変化を用いるとフォトダイオードを用いた場合に比べると最大測定距離は短いものとなってしまった。これは端子間電圧を用いる場合はフォトダイオードを用いる場合と比べると S/N 比が悪い。

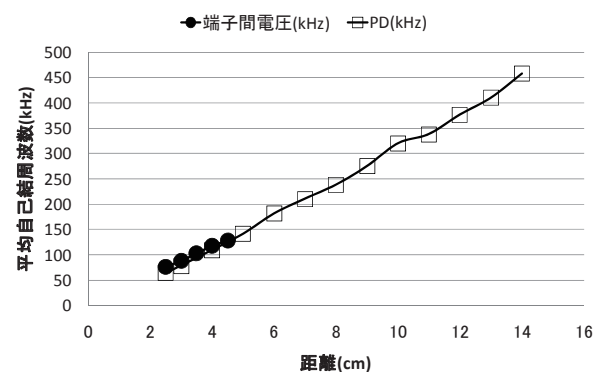


図10 二つの自己結合周波数の比較 (レンズ無)

そのため、距離が遠くなると自己結合周波数の信号がノイズに埋もれてしまうからである。

5 まとめ

半導体レーザはターゲットからの散乱光が戻り光となって活性領域に入る時、戻り光と出力光の位相がそろとうと出力光が大きくなる問題を持っていた。しかし、この問題を自己結合効果として積極的に採用する事で距離測定への応用にした。

これまでに、PD 内蔵型 VCSEL を使用した自己結合型距離計で、距離測定を行う事が確認されており、光軸調整が難しい光学系が無くても安価で小型な距離計が製作可能であった。

本研究では半導体レーザを半導体基板にアレイ状に並べて形状測定をすることを目指している。そのためフォトダイオードなどの余分なものがあるとあまり密に配列することができなくなる。そこでフォトダイオードを使用せずに自己結合効果を検出して、そこから距離測定が可能か調べ、且つフォトダイオードを用いる手法との違いを調べる目的で研究を行った。

端子間電圧の変化から FFT を用いて距離測定を行った。距離に対して自己結合周波数は直線的な関係を持ち、距離を測定することが可能であるという事が分かった。測定距離は 2.5~19cm となっていた。ばらつき誤差も最大 3% と小さいものとなった。

端子間電圧の変化を用いた場合と比較を行うためにフォトダイオードでも自己結合効果の検出を行い同様に FFT で測定した。フォトダイオードの場合では測定距離は 2.5~20cm であるが 20cm が最大ではなくステージ台

の問題から最大 20cm までしか測れなかった。またばらつき誤差は最大 6% であった。

両者の比較を行ったところ、自己結周波数は近い値となり、端子間の電圧変化からでも距離は測定することが可能であると言える。

次により光学系の単純化を目的として、レンズを用いない場合で端子間電圧の変化から測定を行った。この実験では測定距離は 2.5~4.5cm となり、ばらつき誤差はレンズを使用した場合と比べると大きな値となった。

比較のためにフォトダイオードを用いて測定を行ったところ、こちらでも測定距離は 2.5~14cm となった。ばらつき誤差はレンズを使用した場合と比べると大きなものとなった。

両者の比較を行ったところ、端子間電圧では測定距離は短いものの、自己結合周波数は近い値となり、レンズが無くても測定が可能であった。

以上より、端子間電圧の変化を用いても自己結合効果は検出可能で、距離測定への応用も十分可能であると言える。

参考文献

- 1) 面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特許 ; 坂本 明紀 津田 紀生 山田 諄
平成 18 年 12 月電気学会論文誌 C
- 2) Displacement and Distance Measurement using the Change in Junction Voltage Across a Laser Diode due to the Self-Mixing Effect
Proc. Of SPIE vol.6038,60381O(2006)

(受理 平成 23 年 3 月 19 日)