

半導体レーザの自己結合効果による微小振動センサの自動調整化

Automatic Adjustment of Small Vibration Sensor using Self-Coupled Effect of Semiconductor Laser

近藤 圭一[†] , 津田 紀生^{††} , 山田 謙^{††}

Keiichi KONDO , Norio TSUDA , Jun YAMADA

Abstract With the advance in technology, it becomes necessary to detect a small vibration that has been neglected in the manufacturing process before. A laser interferometer is used as a small vibration sensor. But there are some disadvantages, for example, weakness for external vibration, difficulty for optical alignment, etc. These disadvantages are improved making use of self-coupling effect of semiconductor laser, because this sensor is composed of only a laser diode and a lens. The laser light is irradiated to a target with the lens, and the scattered light is detected by photodiode. When a small vibration less than half-wavelength of laser is measured, it is needed the reference signal. The reference signal is generated by moving the sensor at high speed. The vibration amplitude is detected from the ratio of the output signal to the reference one. Moreover, the sensitivity of the sensor is different from the distance between LD and target. Therefore, it is necessary to adjust sensitivity. Up to now, it has been adjusted by the method of the manual operation. The sensitivity adjustment is automated by the microcomputer. As a result, the measurement accuracy was able to be improved.

1. はじめに

近年、レーザを用いた様々な新しい技術が生み出され、その結果、光エレクトロニクスの分野が急速に発展している。その応用は光通信、コンパクトディスク、電子機器、加工・計測機器、医療、エネルギーの分野にも広がっている。

半導体レーザは、他のレーザと比較して小型・軽量という利点のみならず、高利得・高効率であることや、注入電流によりレーザ光の周波数や出力を制御でき、変調が可能である等の特徴をもつ。このような特徴を活かして、すでに実用化されている応用分野として光通信技術、光情報記録技術、レーザプリンタ技術がある。¹⁾また、前述した分野以外にも、物体の形状測定、距離測定、回転速度測定などの計測分野へも応用が広がるようになってきた。

このようなマイクロスコピックの中、半導体素子の集積化が進むにつれて、その製造過程などでは、より精密性が求められてきた。そのため、これまでのようにレーザの半波長未満の微小振動が無視できなくなり、半導体製造工程などにおいて微小変位の検出、制御を行う技術

が切望されてきた。非接触で微小振動を検出する方法にはレーザ干渉計があるが、光軸調整が困難で、振動に弱いという欠点がある。そこで最近、半導体レーザの自己結合効果を用いた微小振動センサについて研究を行ってきた。²⁾このセンサはセンサ部が半導体レーザと集光レンズのみで形成されるため小型で、そのうえ外部干渉計を用いないので振動に強い。レーザ光の半波長未満の微小振動を検出する時、振動中心の位置により感度が異なり誤差が大きくなるため、自己結合効果を用いて測定をする時は振動中心の位置を手動で調整することで感度が最大になるようしなければならなかった。

そこで本研究では、感度が最大になるようマイコンを用いて常に自動調整し、微小振動を精度良く検出出来るセンサについて研究を行った

2. 測定原理

2・1 自己結合効果

半導体レーザ(以下、LD)の特徴の一つは、外部共振器を用いずに半導体結晶の劈開面の平行性を共振器としていることである。しかしその反面、劈開面における光の反射率は約30%と低く、透過率が高いため、自ら発したレーザの出力光が外部反射面に当たることで散乱光の一部が劈開面を透過して活性領域内に戻り易くなる。この戻

† 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 電気学科 電子工学専攻(豊田市)

り光と出力光との干渉により、動作が不安定となり雑音（戻り光ノイズ）を生じる。この戻り光ノイズによる LD の特性変化は、出力光に対する相対的な光量が 10^{-6} 程度と極めてわずかであっても顕著に現れる。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、LD の共振器内での増幅作用により、実際の戻り光量以上の出力の増加となるためである。この現象はこれまで各種の応用技術に際して雑音の原因として大きな障害となっていた。しかし、この現象を自己結合効果として積極的に利用することにより振動測定に応用了した。この効果を用いることにより、センサ部が LD とレンズのみの構造となり小型化が可能となる。また、わずかな戻り光でも顕著に効果が現れるため、対象物が粗面であっても、また金属表面以外でも振動測定が可能である。

本研究における測定原理である自己結合効果を説明するために複合共振器モデルを図 1 に示す。LD から発振されたレーザ光は外部反射面（測定対象物）に照射され散乱する。その散乱光の一部が LD の劈開面を透過して活性領域内に戻る。この時、LD からの出力光と戻り光が劈開面と外部反射面との間で干渉を起こす。そして発振波長を λ 、LD の劈開面から外部反射面までの距離を L とする共振条件は

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

を満たすとき、両者の光は強めあい、出力光がわずかに増加する。これを自己結合効果と言い、この効果を微小振動測定に利用した。

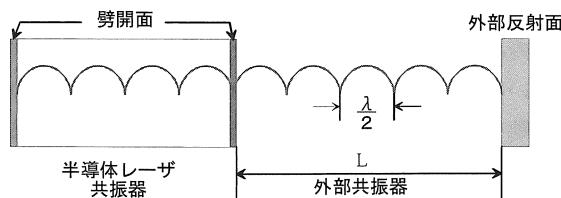


図 1 複合共振器モデル

2・2 振動振幅と光出力の関係

ここでは、LD 内蔵フォトダイオード（以下、PD）により検出される干渉波形と振動振幅の関係について述べる。まず、ターゲットが LD の発振波長の半波長以上の振動をしているとき、図 2 に入力信号と出力信号の観測波形を示す。入力信号はターゲットを駆動させる信号であり、また出力信号はセンサ部の PD により検出された信号である。図から分かるように、入力信号の半波長毎に出力の干渉波形が得られ、入力電圧の山、もしくは谷になる部分でセンサの出力信号が折り返され、この間を一周期とする。一周期における干渉波形から半波長以上の振動

振幅を測定した。

次に、ターゲットが半波長未満の振動するときの入出力の観測波形を図 3 に示す。ここでは周期の揃った二種類の正弦波が観測できた。ターゲットに対する入力電圧は半波長以上のものと比べ 10 分の 1 以下と小さくなっている。図のように、ターゲットの振動振幅が半波長未満の場合においては、センサの出力信号は入力信号と同じ周期の振動を示し、半波長以上のときのような比較対象が無いために半波長未満の振動振幅の検出は困難なものとなる。そのため、基準となる信号が必要となる。

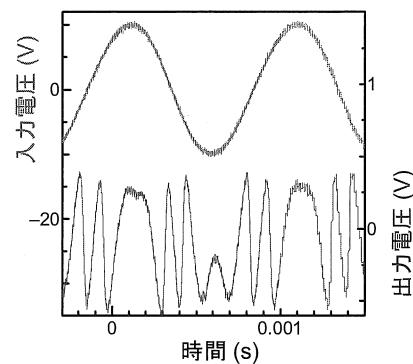


図 2 半波長以上における入出力観測波形

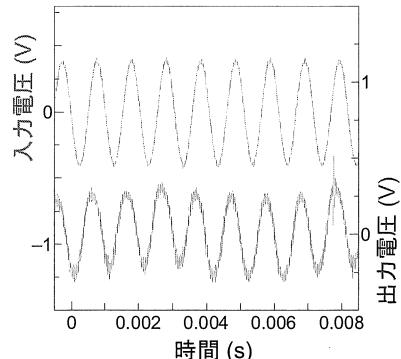


図 3 半波長未満における入出力観測波形

2・3 基準信号

本研究ではセンサ部を高速で動かすことにより、半波長以上の振動を起し、基準となる振動を作り出した。図 4 に半波長未満のときの振動振幅に基準信号を加えた観測波形を示す。これは、センサ部を二重円筒構造とし、その後方部に挿入した、センサ駆動用圧電素子によって作り出した基準信号である。このときの基準信号は入力信号に対して 8 周期に 1 度の割合で振動するようにした。これは、センサ部を物理的に駆動させるために圧電素子による振動を止めても、センサ部自体に残留振動が残ってしまい出力信号に基準信号の影響が残り、正確に振動を検出できない。そのため 8 周期に一度の割合で振動させることにより、その影響を極力少なくなるようにした。

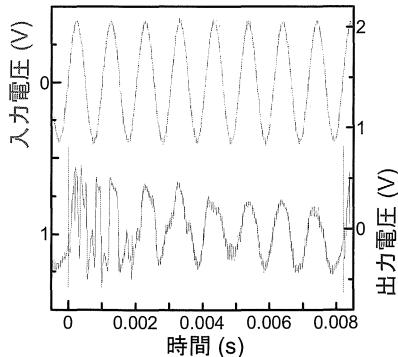


図 4 基準信号

2.4 センサの感度

図 5 に振動振幅が半波長未満のときの観測波形を示す。これは、ターゲットが等しい条件下で同程度の振動をしているときの観測波形であるが、図を見ると、明らかに出力電圧の大きさに違いが生じており、この場合には、約 4 倍の違いが確認できた。これは、レーザーターゲット間の距離が変化すると、センサ部で起こる干渉に大きく影響を与えてしまい、センサの感度が大きく変わってしまうためであり、干渉波形が正弦波関数であるために、位相差が 0 または 180° 付近のようなもっとも変化の大きい付近、つまり、感度の大きなところで振動しているのか、位相差が 90° 付近のような波形の折り返し部分である最も変化の小さい付近、つまり、感度の小さいところで振動しているのかの違いである。これにより、半波長未満の微小振動を測定するときには、感度が一番良いところで測定しなければ正確な測定はできない事が分かること。

そこで本研究では、常に感度が良くなるように、センサ駆動用圧電素子に直流バイアス電圧を加えることで調整できるようにし、レーザーターゲット間の距離を微調整できるようにした。それにより、半波長未満における振動では、常に感度が大きな所で測定が行えるようにマイコンによって自動調整を行い測定した。

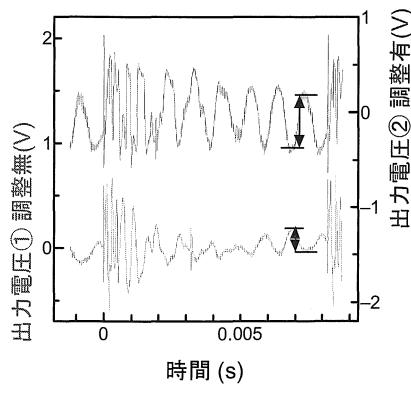


図 5 センサの感度

3. 測定システム

3.1 感度調整の自動化におけるシステム構成

図 6 に感度調整の自動化におけるシステム構成図を示す。本研究において測定システムは、LD と集光レンズからなるセンサ部、基準信号を作り出すためにセンサ部を圧電素子により高速で動かすための駆動部、及び微小振動を発生させるための圧電素子であるターゲットから構成される。センサ部からターゲットに向かって照射したレーザの戻り光が、センサ部内において干渉を起こし PD により検出される。この信号は手動時同様非常に微小な信号なので、この信号を增幅させフィルタにより高周波ノイズを取り除く。そしてその信号をオシロスコープにより波形を観測した。ターゲットが半波長未満の微小振動をするとき、前にも述べたように基準信号が必要となる。自動化するにあたり、それを得るためにセンサ駆動部を高速駆動させる回路をマイコンと増幅回路で構成した。これにより、回路の多段化による外部ノイズの影響を抑えることができた。そして、最大のポイントである直流バイアスによる感度調整をマイコンにより自動で制御した。

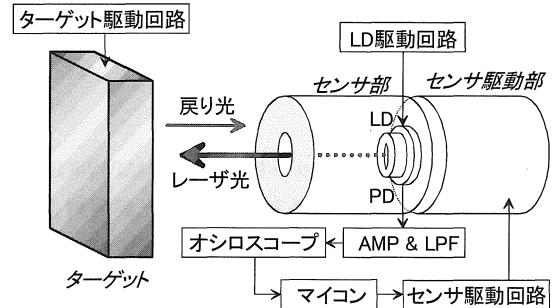


図 6 自動調整の測定システム

3.2 センサ部

試作したセンサ部の断面図を図 7 に示す。センサ部はフォトダイオード内蔵半導体レーザと、直径及び焦点距離が 10mm の集光レンズのみで構成され小型になっており、これらを直径 15mm、長さ 20mm のアルミ製円筒に収めた。使用した半導体レーザは SHARP 株式会社製 LTO24MD であり、発振波長 780nm、定格出力 20mW、しきい値電流 40mA である。フォトダイオードから信号を検出するための信号線はシールド線を用いて、外部からのノイズを最小限に抑えた。

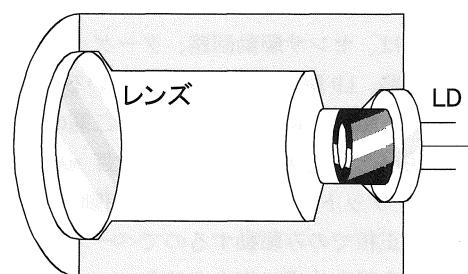


図 7 センサ部

3.3 センサ駆動部

本研究では、LD と集光レンズで構成されたセンサ部の円筒を、直径 10mm、長さ 5mm のバネを前方に挿入し、ターゲットの振動が半波長未満のときに使用するセンサ駆動用圧電素子により後方より押える形で置き、前後より固定した。これらを、直径 25mm、長さ 50mm から成るアルミ製円筒に収めるという内部円筒と外部円筒の二重構造とした。その断面図を図 8 に示す。そうすることで、ターゲットの振動が半波長未満のときにはセンサ部のみを高速で動かせるようにして、基準信号を作り出せるようにした。

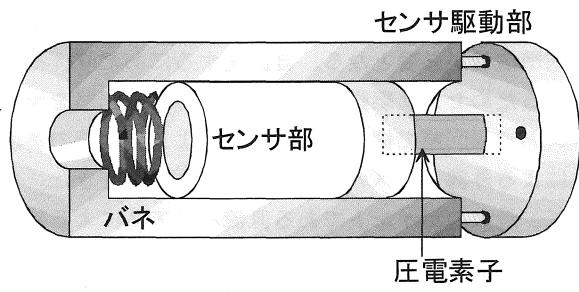


図 8 センサ駆動部

3.4 圧電素子

3.4.1 ターゲット

本研究で用いたターゲットは TOKIN 製 ASB170C801NP0 の金属封入型圧電素子であり、レーザ光が照射される部分は金属面である。この圧電素子に直流バイアスを加えた 1kHz 程度の正弦波信号を入力して駆動させた。駆動するにあたり入力電圧は、圧電素子が半波長未満の振動をする数百mV から、半波長以上の振動をする数十V まで加えた。

3.4.2 センサ駆動用

ターゲットと同様の内部構造を持つ TOKIN 製を用いたが、こちらは外部が樹脂で出来ている AE0203D16 を使用した。これは共振条件がターゲットで用いた金属型よりも高い周波数となっている。³⁾それにより、金属型よりも高速で駆動させることができ、本実験での基準信号を作り出すためのセンサ駆動用圧電素子として用いた。

3.5 測定回路

測定回路は、センサ駆動回路、ターゲット駆動回路、信号検出回路、LD 駆動回路からなっている。

ターゲット駆動回路はトランジスタ二基のダーリントン接続を用いた電流増幅回路により数百 mA まで電流増幅させ、ターゲットである圧電素子を駆動させた。また、圧電素子は正相でのみ駆動するのでベースバイアス調整により信号を歪ませずに出力させた。

信号検出回路は I-V 変換部、增幅部、フィルタ部から

なっている。回路の初段には PD から得られた電流を電圧に変換するための I-V 変換回路を組み込んだのちに FET 型負帰還増幅器回路、エミッタ増幅回路、エミッタ・フォオワからなる増幅部により信号増幅させ、LPF により高周波ノイズを取り除き干渉波形を検出した。

LD 駆動回路には定電流回路を用いて LD を発振させた。回路初段よりツェナーダイオードにかけた逆電圧 5.6V とトランジスタのベース-エミッタ間の電位差 0.6V であることから、5V の安定した定電圧を取り出す。そしてオペアンプのバーチャル・ショートを利用して、取り出した 5V と抵抗の組み合わせにより LD に流す電流を決める。また可変抵抗により定電流値を任意に調整出来るようにした。

センサ駆動回路においてはマイコン、増幅回路、保護回路からなっている。本研究に用いたマイコンは株式会社ルネサステクノロジ製 H8/3048 であり、これは 128KB の ROM、4KB の RAM、各種タイマ機能、A/D - D/A コンバータ、通信機能などを搭載した、動作クロック 16MHz のシングルチップマイコンである。

必要となる回路はマイコンの D/A 出力を電流増幅させるための増幅回路と、逆電流からマイコンを保護するためのバッファ回路だけになり、手動調整用に用いたほとんどの回路を省略することができた。これにより、回路同士のつなぎ目から乗っていたと考えられた外部ノイズが無くなった。また、測定装置の構成上センサ部 PD とセンサ駆動用圧電素子は隣り合う様な形となり、これにより高周波ノイズの乗った駆動信号で駆動させた圧電素子から PD へ電気的ノイズとして直接乗ってしまい、基準信号の振幅を正確に測定することが困難であったが、回路同士のつなぎを少なくすることによって電気的ノイズも抑えることができ、より正確に基準信号を得ることができるようになった。

3.6 直流バイアス制御

これまでターゲットが基準信号に対して中心で振動するように、センサ駆動用圧電素子に直流バイアス電圧を掛けてその変位量を調整し LD - ターゲット間を変化させて、感度が最大に成る所で測定していた。この感度調整はバイアス回路の可変抵抗値を手動で変えることで調整していた。³⁾しかし、この方法では調整する毎に干渉波形の振幅がばらついてしまう。そこでマイコンを用いて直流バイアス電圧を制御し、基準信号に対して中心で振動するように常に自動調整することで、このばらつきを軽減できるよう検討した。

まず前述した方法で基準信号を得る前に、ターゲットの振動振幅と周期の揃った干渉波形が観測できる。この振幅をマイコン内蔵の A/D 変換により取り込

み、マイコンにより圧電素子に直流バイアス電圧を掛けることで感度調整していく、振幅が最大になるように調整させる。こうすることで得られる出力信号は基準信号に対して中心で振動するときと同じ振幅となる。その後、マイコン内で作成した基準信号を D/A 変換し、保護回路、增幅回路を通してセンサ駆動用圧電素子を駆動すると同時に、A/D 変換によりセンサ出力信号を取り込み基準信号振幅値をストックし、出力信号と比較することで振動振幅を測定した。

3・7 マイコンのプログラム処理

本研究で取り扱った H8 マイコンにおけるプログラムの処理内容について述べる。H8/3048 のプログラムを開発する際に使用できるソフトウェアは、アセンブラー言語、C 言語などあるが、効率よく開発するために C 言語を用いて開発した。

処理の流れとしてフローチャートを図 9 に示す。D/A 変換によって直流バイアス電圧を変化させながら出力させ、そのときセンサ部で検出した出力信号を A/D 変換によりマイコン内に取り込んで比較していく、感度が最大になったところの最大出力電圧と最小出力電圧を検出する。これらの差を取ることで感度が最大における出力振幅のデータをストックする。ここで、D/A コンバータは 8 ビットの分解能であるので、0 から 255 まで +1 ずつ D/A 変換することで 5V の直流バイアス電圧を制御した。D/A 値を +1 にしていく毎にセンサ部の出力信号を A/D 変換していくデータを取りこんだ。

その後、センサ駆動用のパルス波形データを別の D/A 変換の出力ポートにより順次出力させ、センサ駆動部を駆動させる。このとき同時に A/D 変換でサンプリングしていく、取り込んだ基準信号の最大電圧及び最小電圧の差を取り基準信号振幅値のデータをストックする。波形データは 64 点からなり、1 点ずつ D/A 出力していく。1 点出力していく毎にセンサ部出力信号を A/D 変換により 5 点で取り込み、基準信号の最大振幅値をストックさせた。このサンプリングレートはマイコンの動作クロックと A/D 変換時間より 5 とした。

こうして得られたデータを電圧変換させ、H8/3048 に取り付けた 16 文字 2 行の液晶文字表示装置 (LCD) により出力信号の振幅値と基準信号振幅値を同時に表示した。LCD に表示させた後、これらの処理を繰り返し行った。このときに表示された振幅データを読み取り振動振幅値に変換することでターゲットの微小振動を検出した。

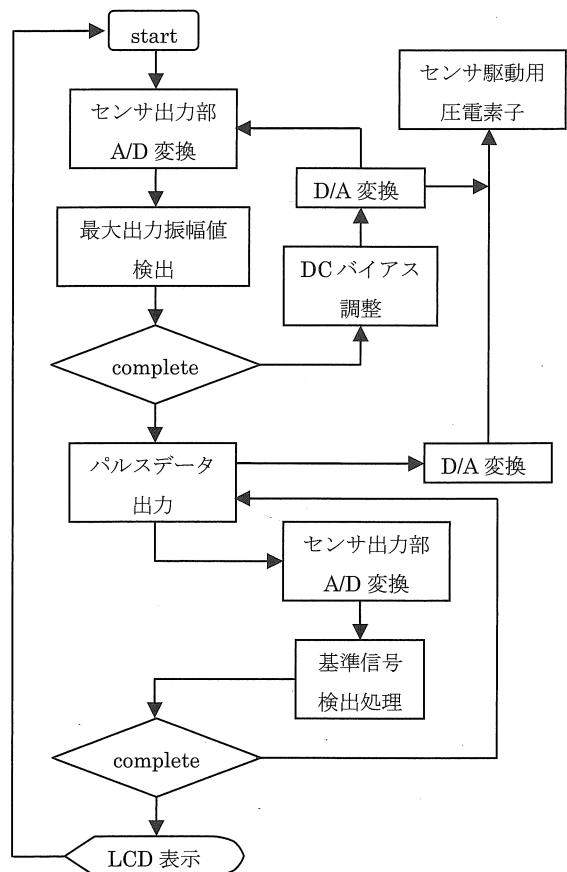


図 9 フローチャート

4. 測定結果

4・1 半波長以上の測定結果

図 10 の左にターゲットの振動が LD の半波長以上におけるターゲットに入力する正弦波の平均振幅電圧に対する平均振動振幅値の測定結果を示す。この測定結果はターゲットの振動周期が 1KHz のとき、10 回の測定値の平均から表されている。LD の半波長 $0.39 \mu\text{m}$ 以上である $0.5 \mu\text{m} \sim 1.7 \mu\text{m}$ まで測定した。図より入力電圧と振動振幅値が比例関係にあることがわかる。また平均の直線に対する各入力電圧の測定誤差を図 10 の右に示す。この結果平均入力電圧が大きいほど測定誤差は小さくなり、平均で約 2.0% の誤差となった。

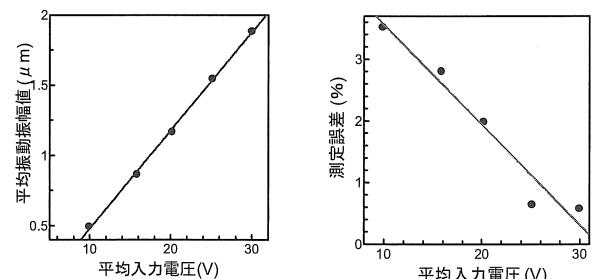


図 10 半波長以上の測定結果

4・2 手動調整における半波長未満の測定結果

図 11 の左に感度の手動調整を行った場合のターゲットの振動が LD の半波長未満におけるターゲットへの平均入力電圧に対する平均振動振幅値の測定結果を示す。この測定結果は半波長以上のときと同様にターゲットの振動周期が 1KHz のとき、10 回の測定値の平均から表されている。図中の直線は各値の平均をとっている。感度の手動調整によって測定できた最小振動振幅値は約 50nm となった。また入力電圧の増加に対する振動振幅値の増加の割合が半波長以上の結果と比べ小さくなっている。この原因はターゲットである圧電素子の駆動には閾値電圧を加えなければ駆動にいたらば、また駆動した後ならば閾値電圧より小さい電圧でも同一方向に電圧を加えたり取り除いたりすると往復動作をする。しかしそのときの動作は直線性ではなくヒステリシスを伴った変化を見せるため起こったと考えられる。

また図左の平均を表す直線に対する各入力電圧の測定誤差を図 11 の右に示す。各入力電圧においての測定誤差は大きいもので 30% を超え、全体の平均で約 16.7% となり、半波長以上の測定誤差と比べ非常に大きなものとなった。この誤差の原因是手動調整によって感度を最大に合わせるのが困難であるために生じたものと考えられる

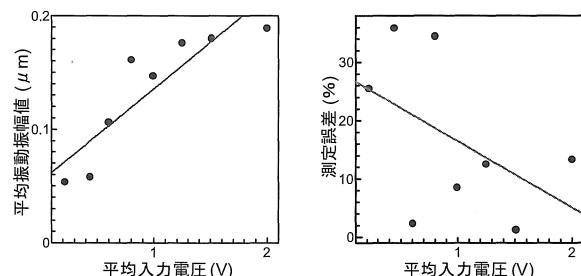


図 11 半波長未満の測定結果（手動調整）

4・3 自動調整における半波長未満の測定結果

感度の自動調整によるターゲットの平均入力電圧に対する平均振動振幅値を図 12 の左に示す。この測定結果はターゲットの振動周期が 700Hz のとき、10 回の測定値の平均から表されている。この振動周期はマイコンで出力信号を取り込みそのピーク値を検出するため、A/D 変換に無理の無い周期とするために 700Hz とした。図から分かるように、半波長未満の微小振動の時でも入力電圧と振動振幅値はほぼ比例の関係を示している。また図左の平均を表す直線に対する各入力電圧の測定誤差を図 12 の右に示す。どの入力電圧に対しても同じような誤差となった。測定誤差の平均は約 4.5% となり手動調整時よりも誤差を抑えることが出来た。ここで、感度の自動調整によって測定できた最小振動振幅値は約 55nm であった。この結果より、感度の自動調整によって微小振動をより正確な精度で測定可能であることが分かった

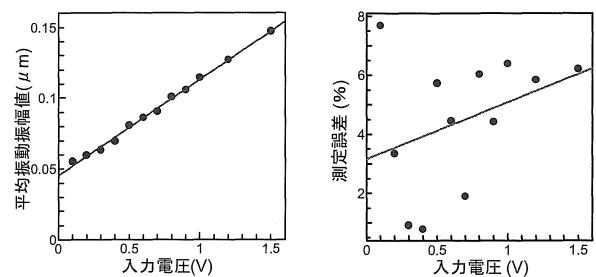


図 12 半波長未満の測定結果（自動調整）

5. まとめ

半導体レーザは、外部反射面からの散乱光が戻り光として活性領域内に戻ると出力光と結合し、ノイズを生じるという問題がある。本実験では、この現象を自己結合効果として積極的に利用することで、外部反射面であるターゲットの微小振動を測定した。

この微小振動を測定する際にセンサ部を高速駆動させることで基準信号を作り出し、出力信号と比較することで振動振幅値を検出した。このときターゲットの振動が基準信号に対して中心位置で振動するように、マイコンを用いて感度の自動調整を行った。

マイコンよりセンサ駆動用圧電素子に直流バイアス電圧を印加していく、感度が最大になったところの出力振幅をマイコン内に取り込む。その後マイコンによって基準信号を作り出し、基準信号振幅値を取り込み、LCD により出力振幅と基準信号振幅値を表示させターゲットの振動振幅値を測定した。自動化におけるターゲットの最小振動振幅値は約 55nm まで測定できた。そのときの平均測定誤差は 4.5% となった。

以上により、感度調整の自動化による半波長未満の振動測定が可能であり、手動調整時よりも高精度な振動測定が可能で 10nm 単位で測定できることが分かった。

今後の課題として、プログラムの最適化による高速な振動検出を可能にすることや、より正確な振幅測定などが挙げられる。

参考文献

- 1) 大澤敏彦, 保方富夫: レーザ計測, pp20-26, 裳華房, 1994
- 2) 川出寿彦, 津田紀生, 山田諄: 自己結合効果を用いた微小振動センサに関する研究, 愛知工業大学研究報告 №. 38, 2003
- 3) TOKIN: 圧電アクチュエータ使用ガイド, TOKIN, 1997

(受理 平成 17 年 3 月 17 日)