

半導体レーザーを用いた自己混合干渉による振動解析

松村尚哉^{*}、樋川芳史^{*}、月出 章^{**}、木村正廣^{***}

(受領日：2010 年 5 月 20 日)

^{*}, ^{***} 高知工科大学 電子・光システム工学科
〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

^{**} 高知大学 教育研究部医療学系
〒 783-8505 高知県南国市岡豊町小蓮

E-mail: ^{***}kimuram@iris.eonet.ne.jp

要約：光ヘテロダイン検出法的一种である自己混合干渉法を用いた簡便で安価な光散乱測定装置の開発を行った。本装置では、フォトダイオード内蔵型の半導体レーザーを使用することで従来の光ヘテロダイン検出法よりもはるかに簡便かつ安価に散乱光のパワースペクトルを求めることができる。また、振動物体からの散乱光について、光の電場に対する近似解から得られるシミュレーションを行った。その結果と実験結果は非常によく一致し、パワースペクトルの低周波領域には振動周波数に対応したピークとその高調波成分に対応したピークが表れ、同時にパワースペクトルのエッジから振幅を決定できることが分かった。本装置の性能をテストするために、振動するブザーからの散乱光を検出し、そのパワースペクトルから振動周波数を測定し振動振幅を $0.3\ \mu\text{m}$ の精度で決定した。

1. はじめに

レーザードップラー振動計によって非接触で極微小な振動振幅の測定が可能である。振動する物体にレーザー光を照射すると、散乱光にドップラーシフトが起きる。このドップラーシフトを散乱光と参照光との光のうなりから観測することで振動振幅等の情報を得ることができる。この手法の特色はノイズの影響を受けにくいこと、検出感度が高く、応答性に優れていることである。現在では高精度の振動計が開発され、超音波振動子の微小振動振幅測定¹⁾など様々な分野で用いられている。

しかしながら、これらの装置には多数の光学部品が必要となり、光学系の構成は複雑となるため装置が比較的大きくなることは避けられない。さらに、光学系の光軸調整には専門的知識と熟練が必要である。そのため装置は高コストにもなる。これらの問題点を克服するために我々は自己混合干渉法の使用を検討した。この手法は Fig. 1 のようにレーザーの出力光と測定対象からの散乱光をレーザー内部で干渉させ、測定対象の運動を測定

する手法であり、Shinohara^{2,3)}によって提唱され、Zakian^{4,5)}らによりその有用性が示された。この自己混合干渉法の使用によって従来のレーザードップラー振動計よりも光学系の構成を単純化でき、低コストの装置開発が可能となった。

本論文では、自己混合干渉法を用いた光散乱測定装置を開発し、振動物体の振動周波数と振幅とを同時に計測できることを、振動する市販の小型ブザーからの散乱光を測定することにより示した。本手法ではフォトダイオード (PD) 内蔵型の半導体レーザー (LD) を使用することで従来のレーザードップラー振動計よりも簡便かつ安価な装置を実現した。

また、測定対象を振動物体としたときに戻り光がある場合の LD 内光電場の近似解を導出し、実際の測定波形と比較した。

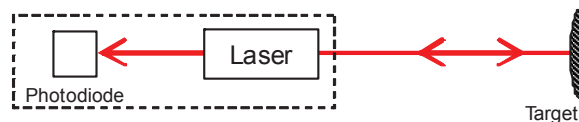


Fig.1 Principle of self-mixing interferometry

2. 戻り光と LD 内光電場の近似解の導出

Fig. 1 のように測定対象物体を振動板としたときの戻り光と LD 内光電場の近似解を導出する。振動板の変位を $A\cos(\omega_m t)$ と表すと振動板の速度 v は、

$$v = -A\omega_m \sin(\omega_m t) \quad (1)$$

となる。ここで A は振動板の振動振幅、 ω_m は角振動数である。散乱光のドップラーシフト ν_D は $2v/\lambda$ であるので

$$\nu_D = \frac{2v}{\lambda} = -\frac{2A\omega_m}{\lambda} \sin(\omega_m t) \quad (2)$$

となる。このドップラーシフトを角振動数 ω_D に直すと

$$\omega_D = 2\pi\nu_D = -\frac{4\pi A\omega_m}{\lambda} \sin(\omega_m t) \quad (3)$$

となる。一方、レーザー光が LD - 振動板間を一往復するのに要する時間 τ は

$$\tau = \frac{2L}{c} \quad (4)$$

で与えられる。ここで L は LD - 振動板間の距離、 c は光速である。

次に光の電場式を用いて LD 内のビート信号を表す近似解を導出する。時刻 t における LD 内の電場の大きさを次式のように表す。

$$E(t) = E_0 \exp(-i\omega_0 t) \quad (5)$$

ここで E_0 は $t=0$ における LD 内の電場である。また、戻り光がないときの時間 τ 後の LD 内の電場は次式のように表すことができる。

$$E(t+\tau) = E_0 \exp(-i\omega_0 t) \exp(-i\omega_0 \tau) \quad (6)$$

次に戻り光がある場合を考える。振動なしの場合ドップラーシフトはないので $\omega_D = 0$ となり、LD 内に戻る光の電場の大きさは次式のように式 (6) と同じ時間依存性を示す。

$$E(t+\tau) \propto \exp(-i\omega_0 t) \exp(-i\omega_0 \tau) \quad (7)$$

一方、振動をしている場合は $\omega_D \neq 0$ であり、 ω_D は時間の関数であるため LD 光が振動板に当たった直後の戻り光の電場は次式のようになる。

$$\begin{aligned} E(t+\tau/2) &= E_s \exp \left\{ -i \left(\omega_0 t + \int_0^t \omega_D dt \right) \right\} \times \exp(i\omega_0 \tau/2) \\ &= E_s \exp \left[-i \left\{ \omega_0 t - \frac{4\pi A}{\lambda} (\cos(\omega_m t) + 1) \right\} \right] \\ &\quad \times \exp(i\omega_0 \tau/2) \end{aligned} \quad (8)$$

この戻り光は LD 内に戻るまでにさらに $\tau/2$ の時間を要する。LD 内に戻ったときの戻り光の電場は次のようになる

$$\begin{aligned} E(t+\tau) &= E_s \exp \left[-i \left\{ \omega_0 t - \frac{4\pi A}{\lambda} (\cos(\omega_m t) + 1) \right\} \right] \\ &\quad \times \exp \left\{ i \left(\omega_0 \tau + \int_0^{\tau/2} \omega_D dt \right) \right\} \\ &= E_s \exp \left[-i \left\{ \omega_0 t - \frac{4\pi A}{\lambda} (\cos(\omega_m t) + 1) \right\} \right] \\ &\quad \times \exp \left[i \left\{ \omega_0 \tau - \frac{4\pi A}{\lambda} (\cos(\omega_m \tau/2) + 1) \right\} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

この式 (9) の電場と時間 τ 後の LD 内の光電場である式 (6) の電場とが LD 内で干渉するので、LD 内では式 (10) のようなビート信号 E_B が得られる。

$$E_B \propto \exp \left[i \frac{4\pi A}{\lambda} \{ \cos(\omega_m t) - \cos(\omega_m \tau/2) \} \right] \quad (10)$$

次に表 1 の実験条件の場合について式 (10) を用いてビート信号の計算を 20 ms (時間分解能 5.0 μ s) まで行い、その結果を Fig. 2 (a) に示す。このビート信号をフーリエ変換して強度スペクトル (サンプリング周波数は 48.83 Hz) を求めた結果が Fig. 2 (b) である。この低周波領域を拡大した強度スペクトルは Fig. 2 (c) に示すように主として振動周波数である 500 Hz の高調波の集合で構成されている。また、Fig. 2 (b) に示すように、ドップラーシフトの最大値である $2A\omega_m/\lambda = 21$ kHz よ

表 1 計算条件

LD- ターゲット間の距離	L	0.3 m
一往復に要する時間	τ	2 ns
振動振幅	A	2.2 μ m
振動周波数	$\omega_m / 2\pi$	500 Hz
レーザー波長	λ	658 nm

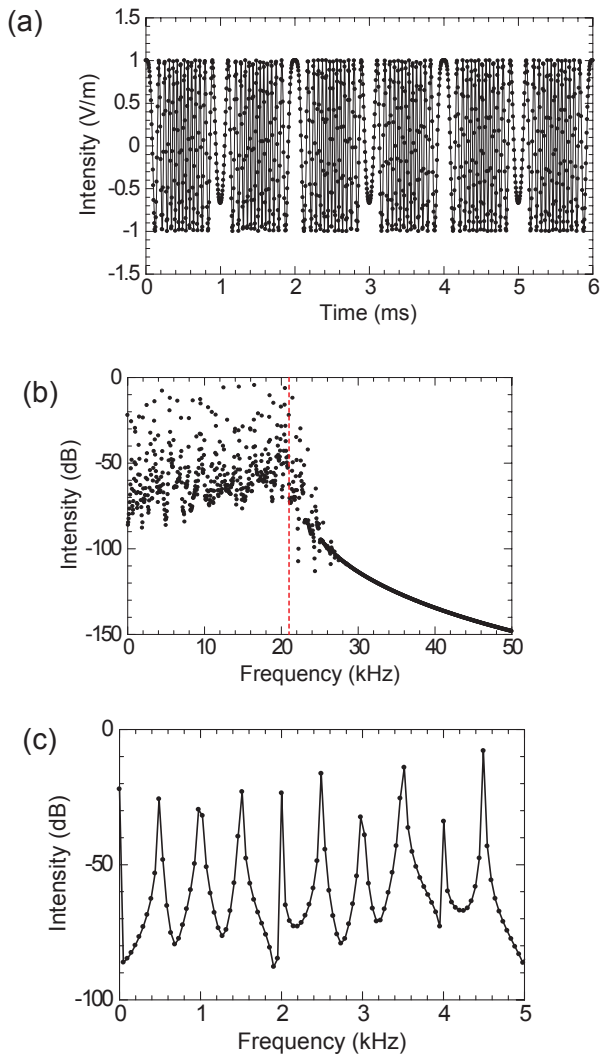


Fig.2 Results of theoretical calculations. (a) Beat signal, (b) power spectrum (the vertical dotted line indicates the expected maximum Doppler shift), and (c) the lower frequency region of the power spectrum.

り高周波側で強度は急激に減少をしているため 21 kHz の周波数位置がエッジ状になっている。このことを利用してスペクトルから逆に振動振幅を決定することが可能である。

3. 実験装置

Fig. 3 に振動測定に使用した装置の構成図を示す。LD には波長 785 nm、パワー 20 mW のものを使用し、カレントドライバーにより一定の電流を流した。レーザーに直結したフォトダイオード (PD) の出力電流を電圧シグナルに変換しアンプで増幅してから低域フィルターに通した。この電圧シグナルをフーリエ変換機能の付いたオシロスコープ内部でフーリエ変換することによってレーザー強度のパワースペクトルを得た。オシロス

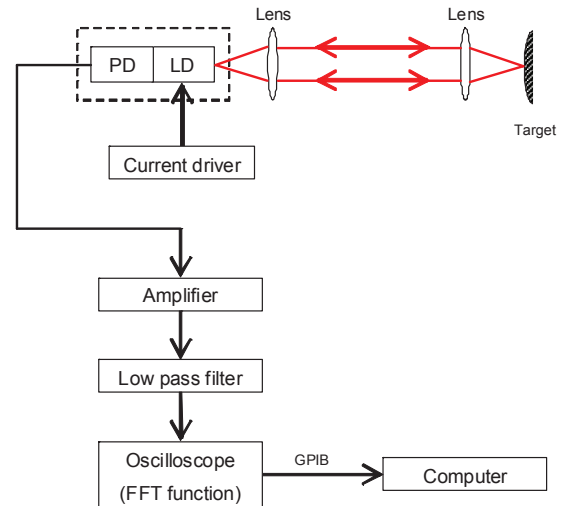


Fig.3 Experimental setup. LD-PD (Hitachi HL7851G), Current driver (Thorlabs LD1255), Amplifier (x1000, bandwidth: 2 MHz), Low pass filter (cutoff frequency: 100 kHz), and Oscilloscope (Agilent 54930B).

コープで測定したデータは GPIB 経由で PC 上に取り込んだ。また測定対象によっては波形にばらつきがあるため 20 回の積算平均を行い波形の平滑化を行った。

今回は市販の小型ブザーの中心部の振動測定を行い、シミュレーションによる結果と比較した。ブザーに印加する信号には 500 Hz の正弦波を使用し、振動振幅は $1.6 \mu\text{m}$ ~ $2.8 \mu\text{m}$ の領域で変化させた。シミュレーションでは区間 15 ポイントの移動平均をとることで平滑化を行った。また、測定波形には約 50 dB のノイズが乗っていたためこのノイズレベルを減算したデータを使った。

4. 実験結果

ブザーの振動振幅が $1.6 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$ 、 $2.8 \mu\text{m}$ の場合について、測定値とシミュレーション結果を比較したものをそれぞれ Fig. 4 (a), (b), (c) に示す。振動振幅が大きくなると最大ドップラーシフト量も大きくなる。それに対応して、強度スペクトルのエッジも高周波側へシフトしており、シミュレーション結果もこれとよく一致した形状を示していることが分かる。また、測定波形の低周波領域を拡大して見ると Fig. 5 に示すようにブザーの振動周波数である 500 Hz において強いピークが表れた。すなわち測定波形の低周波領域から振動周波数を決定でき、シミュレーションスペクトルが測定スペクトルに最も適合するものを選ぶことで測定対象物体の振幅を決定することが

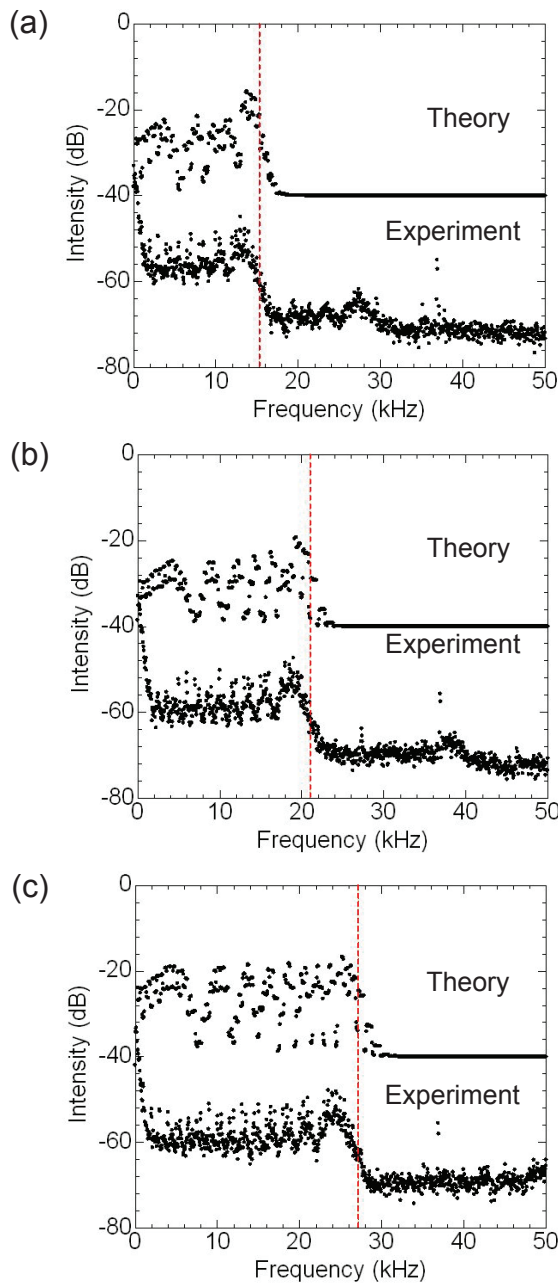


Fig.4 Power spectra obtained by the self-mixing interferometry compared with the theoretical simulations. Oscillation amplitudes are (a) $1.6\ \mu\text{m}$, (b) $2.2\ \mu\text{m}$, and (c) $2.8\ \mu\text{m}$.

可能である。

次にブザーの振幅が $2.2\ \mu\text{m}$ における測定値と、 $1.9\sim 2.5\ \mu\text{m}$ の振幅範囲を $0.3\ \mu\text{m}$ 間隔でシミュレーションした結果とを比較した (Fig. 6)。測定波形と最も適合するシミュレーション波形は振幅値が $2.2\ \mu\text{m}$ のときであることが分かる。このことから、本手法を使えば、振幅を少なくとも $0.3\ \mu\text{m}$ の精度で決定可能であるといえる。

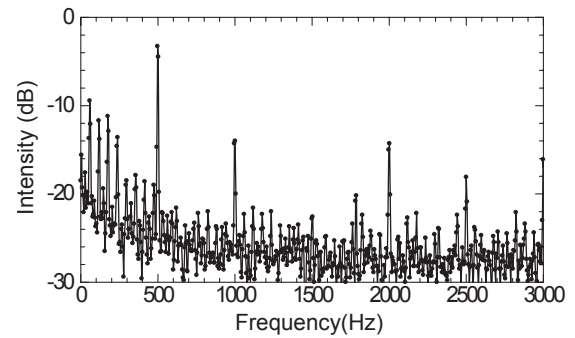


Fig.5 Power spectrum in the region of lower frequency.

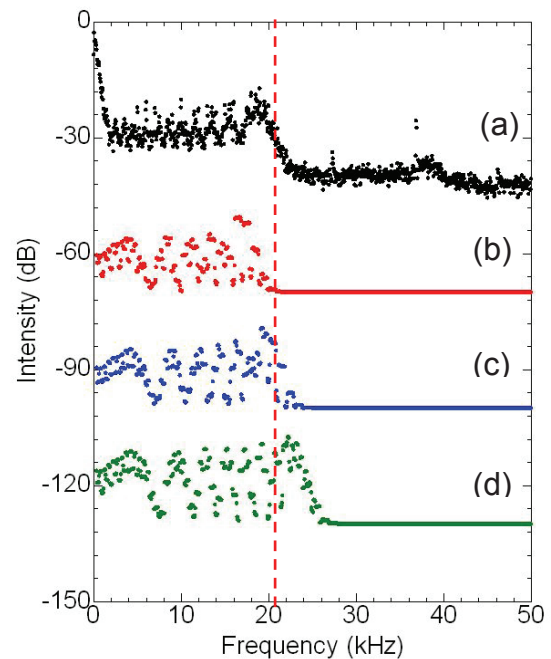


Fig.6 Comparison of the measured and theoretically obtained power spectra. (a) The measured power spectrum for the oscillation amplitude of $2.2\ \mu\text{m}$. The theoretically obtained ones are for the amplitudes of (b) $1.9\ \mu\text{m}$, (c) $2.2\ \mu\text{m}$, and (d) $2.5\ \mu\text{m}$.

5. まとめ

自己混合干渉法を用いた散乱光の測定装置を作製し、振動の測定を行い、光の電場式から導出した近似解によるシミュレーション結果と比較した。その結果、シミュレーション結果は測定波形を非常に良く再現できており、低周波領域にはブザーの振動周波数に対応した強いピークとその高調波成分とが表れた。さらに、測定対象物体の振動周波数だけでなく、測定波形とシミュレーション波形のフィッティングから振動振幅を決定できることを示した。本実験における振動振幅の決定分解能は、振動周波数が $500\ \text{Hz}$ のときに $0.3\ \mu\text{m}$

であった。

本手法は光のドップラーシフトを観測しているため広い周波数帯域にわたって振動振幅の測定が可能である。しかし、実際にはアンプの周波数帯域で制限される。本実験で用いたアンプの周波数帯域は 2 MHz であったが、これは振動周波数 500 Hz の場合、0.5 mm 以下の振幅、1.5 m/s 以下の速さに対応する。さらに近似解の改善を行うことで数十 nm の精度で振動振幅を決定できるようにすることも今後の課題である。

なお、本手法を用いれば、振動振幅の 2 次元画像化を行うことも可能であり、各種振動体の振動特性の解析に有用ではないかと考えられる。

謝辞

本研究に関して実験装置の一部を提供して頂い

たマンチェスター大学の Prof. Terence A. King, Dr. Mark Dickenson と Dr. Christian Zakian に心より感謝する。

文献

- 1) 清水達明、末松安晴、野村和康、森栄司：日本音響学会 **27** (1971) 285.
- 2) S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida and M. Sumi : Appl. Opt. **25** (1986) 1417.
- 3) S. Shinohara, E. T. Shimizu, H. Yoshida and M. Sumi : Trans. IEICE Japan E **70** (1987) 100.
- 4) C. Zakian, M. Dickinson, and T. King: J. Opt. A **7** (2005) S445.
- 5) C. Zakian and M. Dickinson: J. Opt. A **8** (2006) 555.

Vibrational Analysis by Using Self-Mixing Interferometry with a Laser Diode

Naoya Matsumura^{*}, Yoshihumi Hikawa^{*}, Akira Hitachi^{},
and Masahiro Kimura^{***}**

(Received : May 20th, 2010)

^{*}, ^{***}Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502

^{**}Kochi Medical School
Okochi, Nankoku city, Kochi 783-8505

E-mail: mkimura1@gmail.com

Abstract: We have developed a compact and inexpensive apparatus for measuring optical scattering by using self-mixing interferometry which utilizes optical heterodyne detection method. Power spectra of scattered light are obtained from a laser diode with a built-in photodiode. Theoretical simulations obtained from approximate solutions of electric fields of light are shown to reproduce the observed spectra very well. As an example of the ability of the apparatus we have detected the scattered light from an oscillating buzzer and obtained the oscillating frequency and amplitude simultaneously from the spectra.