

ピコ秒パルスレーザを用いた厚み測定

押田 至啓

Interferometric Measurement of Thickness using a Pico-second Pulse Laser

Yoshihiro OSHIDA

In this paper, a thickness measuring system using a pico-second pulse laser is proposed. The properties of the Pico-second Pulse Laser are narrow pulse width, high energy density, high peak power and broad bandwidth of oscillation. The pulse laser is used for micromachining. But, the coherency of the pulse laser is low due to broad bandwidth. Moreover, two light waves with optical path difference over the pulse width cannot interfere, then the interference fringes are not observed. Therefore, in the interferometer using the pulse laser, two path lengths (reference beam, object beam) must be equal to obtain the interference fringes. In this method, by maximizing the contrast of the interference fringes, the interferometer with zero path difference between two paths can be constructed. When the transparent media is placed in the object beam of this zero path difference interferometer, the contrast of the fringe decreases or vanishes. In this case, zero path difference is achieved by moving the reference mirror to the position where contrast of fringes is maximum value. The amount of displacement of the reference mirror corresponds to the path difference occurred by the transparent media. Consequently thickness of the object can be measured by the amount of the displacement of the mirror. To demonstrate the validity of this method, we show the experiment to measure the thickness of plastic plate. Experimental results show the validity of this method.

1. 緒言

パルス幅がナノ秒からフェムト秒の短パルスレーザは、短いパルス幅にエネルギーを集中できることから、高いエネルギー密度と高いピーク出力を得ることが出来る。このことを用い、レーザ微細加工への応用技術が開発されている。また、高速に強度が変化することを用いた加工や、通信技術への応用等が研究されている¹⁾。さらに、高速パルスであるため、スペクトルが広くなり、これを用いた分光分析等が行われている。一方、スペクトル幅が広いことから、コヒーレンシーが低下し、干渉現象が起こりにくくなる。このため、パルスレーザを光源として用いた干渉計測はほとんど行われておらず、短パルスレーザの特性が計測にはあまり生かされていないといえる。しかし、白色光に比べコヒーレンシーは高いため、光路差がほぼ0に近い2光波については干渉現象を容易に観測することが出来る。また、光波がパルス形状をしているため、パルス同士が重なり合う場合以外は光波の重ね合わせが起こら

ず、干渉現象は生じない。これらの特性を組み合わせれば、短パルスレーザの干渉を用い、光路差0の干渉光学系を精度良く構成することが可能であると考えられる。また、干渉計中の光路長の変化に追従し、光路差0の状態を維持することにより、光路長変化を測定することが出来る。

本論文では、短パルスレーザのパルス性と広帯域性に注目し、干渉現象がパルスの重なり合う状態のみで、しかも光路差が0に近い状態でのみ干渉現象が観測されることを用いた透明物体の厚み、および段差の寸法測定システムを提案する^{2,3)}。本法では、光源としてピコ秒パルスレーザを用いた干渉光学系において、測定される干渉縞のコントラストがピークになるよう光学系を調整することにより、光路差0の干渉計を構成している。この干渉計の光路中に透明物体を挿入したことにより生じる光路長変化を、干渉計中の鏡の移動により得られる干渉縞のコントラストがピークとなる移動量より求める。干渉縞のコントラストは光源のコヒーレンシーとパルス幅により決定されるため、本論文では、ピコ秒パルスレーザのスペクトル幅およびパルス幅と干渉縞コントラストの関係に

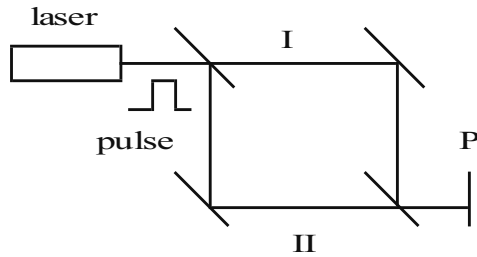


図1 マッハツェンダー干渉計

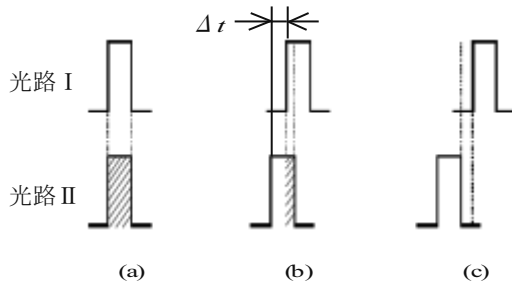


図2 パルス2光波の重ね合わせ

ついて述べ、これを実験的に検証する。さらに、干渉縞コントラストのピーク位置を検出することにより、透明プラスチック板の厚み測定を行った結果より、本法の厚み測定への妥当性を示す。また、高精度な段差の寸法測定への応用の可能性を示す。

2. 短パルスレーザーの干渉

2. 1 短パルス性と干渉

本法の基本的な光学系として、図1に示す短パルスレーザーを光源としたマッハツェンダー干渉計を考える。光源から出射されたパルスレーザー光はハーフミラーにより光路 I と光路 II に分けられ、観測面 P で再び重ね合わされる。光学系中の光路 I と光路 II の間に光路差がない場合には、図 2 (a) に示すように 2 光波は完全に重なり合い干渉することにより、観測面で波面の傾きに対応した干渉縞を生じることになる。しかし、2 光路間に光路差がある場合には、光路差により観測面への 2 光波の到達時刻に差が生じるため、図 2 (b) に示すように 2 光波間に Δt の時間ずれが生じる。このとき重なり合っている図中の斜線部分の光波はお互いに干渉するが、それ以外の光波は干渉現象には全く寄与しないことになる。すなわち重なり合わない光波は光強度のみが観測され、バイアス成分としてはたらくため、干渉縞のコントラストが低下することとなる。

光路 I、光路 II からの光波それぞれの強度を I_1 、 I_2 とすると、観測面 P で観測される干渉縞の強度 I は

$$I = (T - \Delta t)(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi) \quad (1)$$

と表すことができる。ただし、 T はパルス幅、 Δt は 2 光波間の時間のずれ、また、 φ は 2 光波間の波面の傾きにより生じる位相差分布を表す。光強度 I の最大値を I_{max} 、最小値を I_{min} とすれば、干渉縞のコントラスト C は

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2(T - \Delta t)\sqrt{I_1 I_2}}{(T + \Delta t)(I_1 + I_2)} \quad (2)$$

と表される。特に $I_1 = I_2$ ならば

$$C = \frac{T - \Delta t}{T + \Delta t} \quad (3)$$

となり、時間ずれ Δt の増加とともにコントラストが低くなる。さらに、 Δt が大きくなり、パルス幅 T より大きくなれば図 2 (c) の状態となり、もはや干渉縞は観測されなくなる。

本研究で使用するピコ秒パルスレーザーのパルス幅は 50ps であるため、この大きさの時間遅れを生じるための光路差は、光速を $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、15mm となり、これ以上の光路差がある場合には干渉縞は観測できなくなることになる。

さらに、図 2 のパルスではパルス形状を矩形としたが、実際はガウス分布に近い形となっており、コントラストの低下はさらに大きくなると考えられる。

2. 2 広帯域性と干渉

パルスレーザーではそのパルス性の故にスペクトル分布が広がる。そのために可干渉距離は限られたものとなる。図 2 (b) の状態では干渉縞は観測されるが、スペクトル分布の広がりの影響でコントラストの低いものとなる。すなわち干渉縞の形成はパルスレーザーの時間コヒーレンスに依存する。光源のスペクトル分布がガウス分布であるとき、発進帯域幅 (半値幅) を $\Delta \omega$ とすると

$$\Delta t \leq \frac{2\pi}{\Delta \omega} \quad (4)$$

が満たされる範囲で干渉縞が観測される⁴⁾。この Δt に対応する光路差すなわち可干渉距離 Δl は

$$\Delta l = \frac{2\pi c}{\Delta \omega} = \left(\frac{\lambda}{\Delta \lambda}\right) \lambda \quad (5)$$

となる。ただし、 c は光速、 λ は中心波長、 $\Delta \lambda$ は実効的な

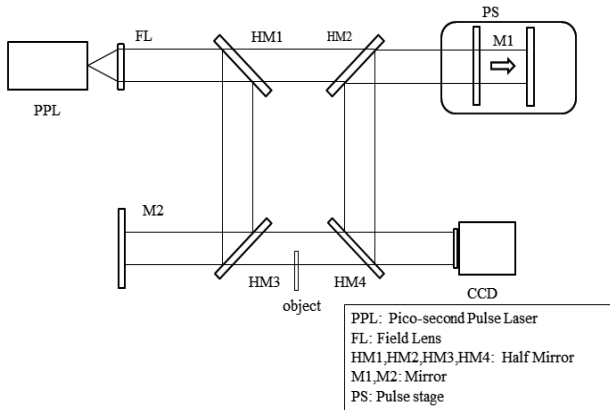


図3 厚み測定光学系

波長範囲を表す。

パルスレーザの干渉では、2. 1で述べたパルス性のために生じるコントラストの低下に、コヒーレンス長の影響が重畳されて、時間差すなわち光路差に対するコントラスト変化の関係が先鋭化され、コントラストのピーク位置の判定がより精度よく考えられる。

3. パルスレーザによる厚み測定原理

厚み測定に用いる光学系を図3に示す。マッハツェンダー干渉計を基本とした光学系を構成する。この光学系においては、光路中の鏡M1をパルスステージにより光線軸方向に平行移動し、一方の光路の光路長を調整する。観測面における干渉縞をCCDカメラで観測し、干渉縞のコントラストがピークになる位置まで鏡M1を移動することにより、干渉計の2光路の光路差を0とする。

まず、測定物体が存在しない状態で干渉縞のコントラストをピークにすることにより光路差0の状態とする。次に、光路長調整用の鏡M1を含まない光路中に透明な測定物体を挿入する。透明物体の挿入により一方の光路の光路長が変化するため、干渉縞のコントラストの低下が起こる。あるいは光路長変化がパルス幅を超える場合には2光波の重ね合わせは起こらず、干渉縞が消失してしまう。この状態で、干渉縞のコントラストが再びピークになるように、パルスステージにより光路長調整用の鏡M1を移動すれば、この鏡の移動量 ΔL が透明物体を挿入したために生じた2光路間の光路差となる。

光路長の変化は挿入した透明物体の厚み L と、屈折率 n_p の積によって与えられる。従って、パルスステージ移動量 ΔL から透明物体の厚みは次式により得ることができる。

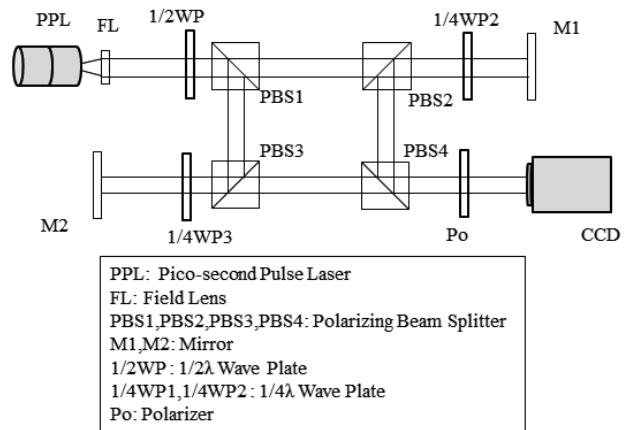


図4 偏光ビームスプリッタを用いた厚み測定実験光学系

$$L = \frac{\Delta L}{n_p - n_a} \quad (6)$$

ただし、 n_a は周囲の空気の屈折率であり、簡単のため透明物体は平行平板で、光線はその表面に対し垂直に入射しているものとする。

4. 実験方法

4. 1 可干渉距離測定

本実験では、光源として浜松ホトニクス製ピコ秒パルスレーザPLP-02 (パルス幅49ps)を用いる。また、光学系としては光損失を抑えるために、図4に示す偏光ビームスプリッタを用いた光学系を構成した。図中の鏡M1をパルスステージ (移動量 $1\mu\text{m}/\text{pulse}$)により平行移動した。

可干渉距離を測定するため、干渉縞のコントラストが最大となるよう鏡M1を調整する。次に、干渉縞のコントラストが0となり、観測されなくなるまで鏡M1を移動し、その移動距離より、可干渉距離を求める。

また、スペクトロメーター (THORLABS製CCS100)によりスペクトル分布を求める。

4. 2 厚み測定実験

図4の光学系のPBS3とPBS4の間に測定対象の透明物体を挿入し、干渉縞のコントラストを最大にする鏡M1の移動量から(6)式により透明物体の厚みを測定する。透明物体としては厚さ 1.10mm 、屈折率 $n_p=1.54$ のプラスチック板を用いた。またパルスステージの送りは5pulseごとすなわち $5\mu\text{m}$ ごととした。

5. 実験結果および考察

5. 1 可干渉距離測定

スペクトロメータにより得られたピコ秒パルスレーザのスペクトル分布を図5に示す。これにより、中心波長648nm、帯域幅4.3nmであることが得られた。また、スペクトル分布はほぼガウス分布をしていると考えられる。そのため可干渉距離としては(5)式を用いることができると考えられ、式中の ΔL が半値幅であることを考慮すると、可干渉距離は0.39mmとなる。

次に、干渉縞のコントラスト最大から0になるまでの鏡M1の移動量を測定した結果、実験的に得られた可干渉距離は0.42mmである。

このことより、干渉縞のコントラストは、主としてスペクトルの広帯域性によるものであることが分かった。今回の実験ではパルス性の影響は検出することができなかったが、鏡M1の移動量とコントラストの関係を求めれば、その関係が先鋭化されているものと考えられる。

5. 2 厚み測定実験

透明なプラスチックを挿入して得られた干渉縞画像を図6に示す。

図の右側半分領域にプラスチック板を挿入しており、左側は物体が存在しない領域である。物体が存在しない状態でコントラストが最大になる図6(a)の場合には、物体透過領域では光路差のために干渉縞は観測されない。この状態から、調整用鏡M1をパルスステージで移動し、

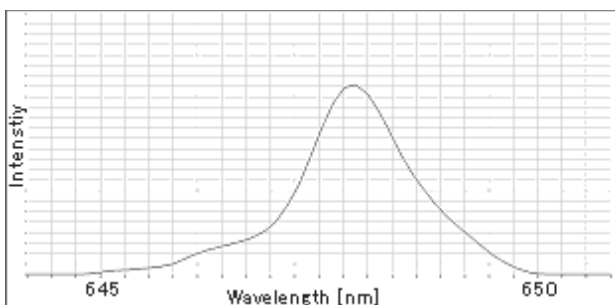
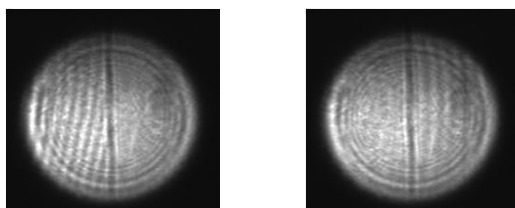


図5 ピコ秒パルスレーザのスペクトル分布



(a) (b)

図6 厚み測定実験結果

図6(b)に示すように、物体領域で干渉縞のコントラストが最大になるように調整した。このときのパルスステージの移動量から得られた光路長変化量は590 μm であった。この結果から(6)式を用いて厚み L を求めると1.09mmの値を得た。ただし空気の屈折率は $n_a=1.00$ とした。この結果をマイクロメータを用いた値1.10mmと比較するとほぼ一致しており、本方法により厚み測定が可能であることが実験的に検証された。

本法においてはパルスステージの送り幅と精度が測定結果の精度を決定することとなる。今回の実験では送り幅を5 μm と設定したが、さらに高精度で送りを行えば高い精度で厚みを測定することができる。さらに干渉縞が得られている領域では、干渉縞には形状分布情報が含まれているため、位相シフト法を適用して高精度な形状分布測定を行うことができる。

今回は厚み測定を行ったが、透明物体の代わりに鏡M2の位置に段差物体を置くことにより、厚み測定と同様な手順で段差の寸法を測定することができる。これにより、段差部分は本法を用い、平面部分は位相シフト法を用い、段差と表面形状を同時に高精度で測定することが可能であると考えられる。

6. 結言

パルスレーザのパルス性と広帯域性を用いた厚み測定システムを提案した。本法では、干渉縞のコントラストのピークになる状態を利用し、光路差測定を行っている。このコントラストの変化は広帯域性によることを実験的に示した。また、透明プラスチックの厚み測定により、本法の妥当性を検証した。今後、位相シフト法を組み込み高精度測定システムを構成するとともに、コントラスト測定の自動化を行うことにより、自動厚み・段差測定システムを構成することができる。

最後に、本実験においては元本校専攻科機械制御工学専攻科生の松本雅人氏、大崎達也氏、中島往馬氏に負うところが大きい。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) J.Herrmann B.Wilhelmi, 超短光パルスレーザ(1991) 共立出版.
- 2) 松本雅人, 押田至啓, 2012 年度精密工学会春季大会 学術講演会講演論文集, pp1161-1162 (2008).
- 3) 中島往馬, 押田至啓, 2011 日本実験力学学会講演論文集, pp413-416 (2011).
- 4) M.Born E.Wolf, Principles of Optics, (1999)pp348-352, Cambridge University Press.