

最近の技術から

半導体レーザーの波長変化を用いる位相測定干渉計

石井 行 弘

職業訓練大学校電気系電子科 〒229 相模原市相原 1960

1. ま え が き

位相測定干渉計に関する研究は、長い歴史を有し、内外の干渉計メーカーにより製作、市販され実用に供されている。この光路長計測法の原理は、ヘテロダイン干渉法¹⁾に基づいており、参照光の位相を変化させるため、ピエゾ素子や音響光学素子などの位相シフター²⁾を使用している。近年、半導体レーザー (LD) は、信頼度が向上し、光エレクトロニクスの広範な分野で使用されるようになった。そこで、干渉計の光源に LD を用い注入電流を直接変調し、これに伴う波長変化から干渉に寄与する二つの光ビームの間の位相差を変化することができ、従来の位相測定干渉計と同様な干渉計^{3,4)}を構成することができる。

ここでは、0.78 μm 帯の近赤外域で発振する LD を用いた位相測定干渉計による波面測定の結果や精度について、著者の仕事をとりあげながら述べていく。

2. LD 位相測定干渉計

図1の光路差 l をもつ不等光路トワイマン・グリーン干渉計による被検凸レンズの波面収差の測定について考えてみる。レンズと平面鏡のペアーを使用することにより、コマ収差のような非対称の収差は除去され、球面収差、非点収差のような対称収差が残存する。干渉計は、余分な反射光などの影響を避けるため偏光ビームスプリッター (PBS) と、1/4 波長板の組み合わせたものを用いる。LD の波長は、電流だけでなく温度にも影響を受け変化する。ここでは、発振波長にモードホップがなく電流に対して線形に変化する範囲を利用して、波長を偏移させ縞の走査を行なうので、LD の温度を一定に保つことが必要となる。そこで、LD を銅ブロックに取り付け、ペルチェ素子によりブロック温度を一定に制御する自動温度制御 (ATC) 装置を使用している。発振波長は、ATC 装置により 22°C に保ち、電流 65 mA で 788.2 nm となり、電流チューニング比は 0.0046 nm/mA となった。

従来の干渉計の位相変調は、参照光路の位相を変化させているが、ここでの位相シフト量は、干渉計の両腕の光路差により与えられ、位相変調を受ける光路が異なる。図1の光学系における位相シフト量は、一定の光路差 l が波面収差より十分大きい条件の下で、レンズの光路長に依存しなくなる。このとき、波長が λ_0 から $\Delta\lambda$ まで偏移したとすると位相シフト量は $2\pi l \Delta\lambda / \lambda_0^2$ となる。それが場所ごとに無視できない場合には、補正を必要とするであろう⁵⁾。また、LD の光強度が電流とともに増加するので、出力変動が無視できなくなる。この場合には計算機により⁴⁾、または光出力を光電素子によりモニター³⁾し、縞強度の正規化手順を実行する。また、位相変調を受ける l を長くとり、作動電流範囲が小さいとして、光出力の増加分を無視することもできる。

1 縞内の移動を考えると、波長を λ_0 から $\lambda_0 + \lambda_0^2/l$ まで、Bruning⁶⁾ の方法によれば段階的に、または Wyant⁷⁾ の方法によれば連続的に変化して、縞の走査を行ない、1 縞の N 分割点に相当するおのおのの干渉縞強度が CCD カメラで受光され、フレームメモリーを介してコンピュータに取り込まれる。Wyant の bucket 法により測定⁷⁾を行なうに際して、CCD カメラのフィールドパルスで D/A 変換器を作動し、コンピュータから発生した線形に変化する電流で LD を駆動し、干渉縞を CCD カメラの電荷蓄積時間で積分できるようにしてある。

3. 波面測定と測定精度

図2は例として、図1のレンズを光軸に関してわずかに傾け非点収差を発生し、その波面を測定した結果である。(a)は得られた干渉縞で、(b)は1縞の4分割 ($N=4$) 点に相当する波長変化を等間隔に与え、Bruningの方法により計算された測定波面を示している。波面の形状は、非点収差特有の鞍型となっている。

LD の波長は、光学素子からの戻り光の影響などにより、設定した値からずれることがある。この干渉計測に使用される位相導出アルゴリズムは、位相シフト量が既

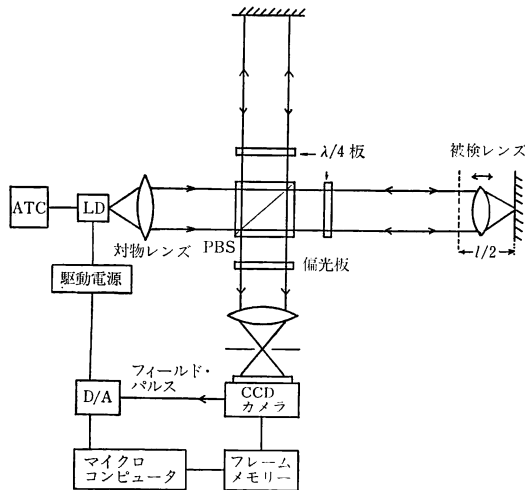


図1 光源にLDを用いる位相測定干渉計

知であることを前提としており、位相シフト量の不正確さにより測定精度が低下する。これは、ピエゾ素子のドリフト誤差⁸⁾についても生ずる問題である。図3は、 $N=4$ としたときの位相計算において、位相シフト量の誤差が導出位相にどの程度影響を与えるかを計算機シミュレーション⁹⁾により求めた結果である。図の横軸は、おのおのの位相シフト量に対して等量に与えた誤差の百分率と干渉縞の振幅に対する加法的なガウス雑音の標準偏差の百分率を表わし、縦軸が測定精度 (rms 値) を示している。図から、位相シフト量の誤差が増加するに従い、測定精度が低下することを現わしている。そこで、位相シフト量の較正を行えば、干渉縞の加法的な雑音が測定精度の低下の主たる原因となる。

一つの位相シフト量の数値的な較正法を紹介する⁴⁾。

図2(a)において、4段階の位相シフトを与えた干渉縞からチルト縞を取り出し、非線形最小2乗法により各段階の位相シフト量を未知数として、余弦縞にフィッティングを行なう。良好な初期値は、抽出したチルト縞から得られ、数回の反復演算で解が収束した。この結果の位相シフト量は、1縞を不等間隔にサンプルしているので位相計算が煩雑になるが、10回の測定を行ない繰り返し精度 (rms 値) を計算すると、較正前後で、0.23 から 0.17 rad となった。よって、被検物体に直した精度は、ダブルパス干渉計を用いているので、 $\lambda/75$ となる。

以上、解決しなければならない問題点はあるが、LDの波長変化を用いる干渉計は、ピエゾ素子のような可動部分を取り除き、高速直接変調を利用した測定を可能にしている。現時 LD 点のは、近赤外域で発振し目に見え

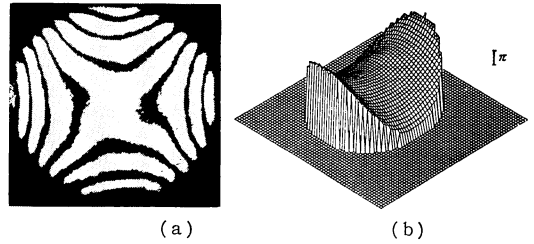


図2 レンズの非点収差の干渉縞(a)と測定された波面収差(b)

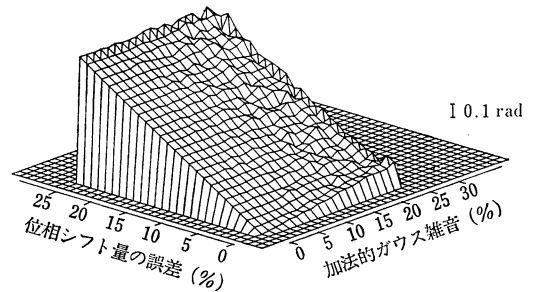


図3 位相シフト量誤差とガウス雑音があるときの測定精度 (rms 値)

にくい面があり、 $0.6 \mu\text{m}$ 帯の可視域で発振する LD の研究開発の進歩と相伴って、デジタル位相測定干渉計の光源として使用されることが期待される。

文 献

- 1) 中島俊典: “ヘテロダイナミクス干渉法”, 光学, 9 (1980) 266-274.
- 2) J.C. Wyant and R.N. Shagam: “Use of electronic phase measurement techniques,” *Proceedings of ICO-11 Conf.*, Madrid (1978) pp. 659-662.
- 3) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: “Diode laser direct modulation heterodyne interferometer,” *Appl. Opt.*, 26 (1987) 37-40.
- 4) Y. Ishii, J. Chen and K. Murata: “Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode,” *Opt. Lett.*, 12 (1987) 233-235.
- 5) 作田博伸, 岡田勝行, 小瀬輝次: 第48回応用物理学会予稿集, 第3分冊 (1987) p. 594.
- 6) J.H. Bruning: “Fringe scanning interferometers,” *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (John Wiley and Sons, New York, 1978) pp. 409-437.
- 7) J. Chen, Y. Ishii and K. Murata: “Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode,” *Appl. Opt.*, 27 (1988) 124-128.
- 8) C.J. Morgan: “Least-squares estimation in phase-measurement interferometry,” *Opt. Lett.*, 7 (1982) 368-370.
- 9) 石井行弘: 第48回応用物理学会予稿集, 第3分冊 (1987) p. 594.

(1988年2月4日受理)