

光学プロファイリングのための波長走査干渉計測

日比野 謙一

Optical Profiling by Wavelength Scanning Interferometers

Kenichi HIBINO

Profiling smooth surfaces by optical interferometry has attained a measurement resolution of $\lambda/2000$. However, the profiling of multiple-surfaces or discontinuous surfaces still suffers from a poor measurement resolution. Multiple-wavelength interferometry such as wavelength scanning interferometry and white-light interferometry allows an optical path-length dependent measurement which can solve these problems. Wavelength scanning interferometry allows a measurement of gap height, a simultaneous measurement of surface shape and optical thickness of a transparent object. Recent development of semiconductor lasers and solid-state lasers with an external cavity has realized a single-mode scanning of the source wavelength over 10 nm or larger. Discrete Fourier analysis, heterodyne and phase-shifting techniques combined with a source wavelength scanning of laser diode could provide a high resolution measurements of discontinuous surface-shape, optical thickness, geometrical thickness and optical constants.

Key words: interferometry, wavelength scanning, surface profiling, semiconductor laser, phase shifting, optical thickness, refractive index

可視から近赤外波長域で単一周波数発振あるいは狭帯域化 (300 Hz~20 kHz) した周波数可変半導体レーザー (DL) が利用できるようになり, 近距離通信や波長多重・長距離通信, 分光, 原子トラップや量子凝縮を行う原子光学, レーザー冷却原子を用いた周波数標準, パラメトリック発振による波長可変光源, 光波センシングなどに応用されている。ここでは, 波長走査光源を用いて表面形状や厚さ, 屈折率などを高精度に測定するプロファイリングの最近の研究を解説する。

光干渉を用いた表面形状計測では, なめらかな表面に対してフィゾー干渉計により $1/2000$ 波長 (0.3 nm) 程度の分解能がすでに得られて, 表面粗さも同時に計測されている。しかしながら, 光学材料の評価, 加工・組み立て工程においては, 大部分はなめらかであるが段差を含む表面を対象としたり, 表面粗さによるスペックル雑音で隣接部分との位相接続が困難であったり, 厚さ分布や屈折率など形状以外の光学定数の評価も必要となる。シリコンウェハー

やマスクガラスの表面形状や厚さ分布, 半導体露光装置や重力波干渉計などに用いる合成石英製透過素子の内部均一度 (屈折率や損失分布) の評価, デジタル・ミラー・デバイス (DMD) や微小電子機械 (MEMS) などの形状, ニオブ酸リチウム固体ファブリー・ペロー干渉計のウェハー厚さ分布, 光導波路の屈折率分布など測定需要は多い。こうした光学素子に要請される形状測定精度を統一的に議論することは難しいが, 例えば波面収差に関するマレシャルの基準 (透過波面で $\lambda/14$ RMS 値以内) に対応する形状精度は可視波長で $0.1 \mu\text{m}$ 前後であり, 計測法の分解能としてはその 10 分の 1 である 10 nm が必要であると考えられる。段差形状や厚さの測定では干渉縞に空間的不連続が発生するため, なめらかな表面と同様の測定手法は適用できない。その測定分解能は現状で $0.1 \sim$ 数 μm 程度にとどまり, さらなる向上が必要である。

光軸方向への空間分解能を発生するには, (共焦点) 顕微鏡による結像位置検出など光散乱を用いる幾何光学の手

法やスペクトル幅のある光源を用いた干渉法がある。干渉法には、白色光干渉法^{1,2)}と波長走査干渉法が知られている(低コヒーレンス干渉計の形状計測への応用の初期については文献1に詳しく、低コヒーレンス干渉計の生体・厚さ計測への応用(OCT)については文献2に詳しい)。前者は光のスペクトル幅から生じる相関長(コヒーレンス長の2倍)を、後者は反射光の時間遅れから生じる周波数差を利用して奥行き方向の分解能を発生する。白色光干渉はハロゲンランプの可視域スペクトルを波長フィルターで切り出して $2\mu\text{m}$ 程度のコヒーレンス長を実現し、縞位相測定で 1nm の奥行き感度をもつ。しかしながら、段差形状に対する測定分解能は参照鏡の送り精度で制約されて $0.1\mu\text{m}$ 程度であり、測定口径も 1cm 以下と小さい。波長走査干渉では、電流変調半導体レーザーの波長走査幅が活性層の屈折率変化の限界から 1nm 未満と小さいため、合成波長が $400\mu\text{m}$ 以上となる。このため、位相測定分解能が $1/500$ 波長と良好でも奥行き測定分解能は $1\mu\text{m}$ 程度となる。外部共振型半導体レーザーを用いると、波長走査幅が 10nm まで拡大し合成波長は $40\mu\text{m}$ と改善されるが、前述のコヒーレンス長に比べてまだまだ大きい。しかしながら、光源が単一周波数発振で波長が 7 桁以上安定している特徴を利用すると、後述するように干渉次数を決定することが可能となり、なめらかな面の測定と同様のナノメートル分解能の形状測定を実現できる可能性がある。以下では、表面や厚さ測定の現状を紹介し、またわれわれが行っている干渉次数の決定とナノメートル分解能の測定についても述べる。

1. 波長走査干渉計の特徴

可視域で波長を連続に走査できる光源には、電流変調DL、外部共振型DL、色素レーザー、チタンサファイヤ(Ti:Sa)レーザー³⁾などがあり、代表的な波長走査幅はそれぞれ 1nm 未満、 10nm 、 50nm 、 100nm である。図1にフィゾー配置の干渉計を示す。波長 λ の光を参照面および物体に照射すると、検出器面上に形成される干渉縞位相は、媒質の屈折率 $n(\lambda)$ 、干渉する一組の反射光の光路長差 nL を用いて次式で表される。

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (1)$$

両辺の波長微分をとると、位相変化量は光源波長の変化量 $\delta\lambda$ と光路長差に比例する。

$$\delta\phi = \frac{4\pi L}{\lambda^2} n \left(1 - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}\right) \delta\lambda = \frac{4\pi n_g L}{\lambda^2} \delta\lambda \quad (2)$$

ここで $n(1 - \lambda/n(dn/d\lambda))$ は、群屈折率 n_g とよぶ量で、

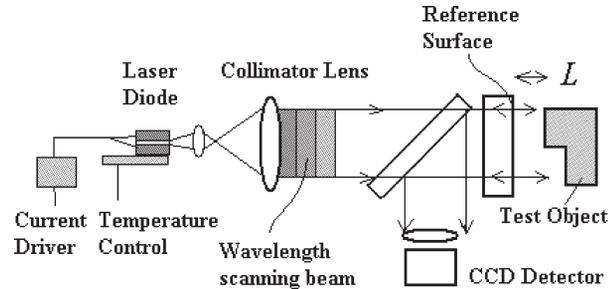


図1 波長走査干渉計を用いた段差形状測定の原理図。

光速の群速度に関する屈折率である。波長走査干渉の特徴のひとつは、波長走査に伴う位相変化量を計算する際に、屈折率として通常の屈折率ではなく群屈折率が現れることである。このため、位相変化量から段差高さや光学的厚さを測定した場合、測定値はそれぞれ空気や媒質の群屈折率に比例する。これは白色光干渉計で、波長幅をもつ信号光束が媒質中を伝搬する速度が光の群速度になることに対応する。群屈折率は、可視光領域で数%通常の屈折率より大きい。光の屈折を利用して測定した光路長(通常の屈折率 n)と波長走査で求めた光路長から物体の屈折率や厚さを計算する場合、媒質の波長分散に関する情報が必要となる。

第二の特徴は、物体からの複数の反射光が存在する場合、それぞれの干渉縞は光路長差に依存する周波数で変化するため、周波数空間でそれぞれの位相を同時に抽出できることである⁴⁾。奥行き方向の分解能は、次式の合成波長の半分である。

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3)$$

ここで、波長を λ_1 から λ_2 まで走査する。干渉縞の周波数から各反射面までの距離が、また各周波数成分の端数位相から境界面の形状がそれぞれ検出できる。この手法は光ファイバーの欠陥位置検出やヒト眼内の距離計測、二次元では段差^{3,5,6)}や粗面形状^{7,8)}、傾斜した粗面計測⁹⁾、平行平板¹⁰⁻¹²⁾や複数の境界面の形状計測¹³⁻¹⁵⁾に応用された。

第三の特徴は、電流変調DLにみられる周波数変調の容易さと高速性である。位相のヘテロダイン検出では変調器が不要であり、モードホップを利用して波長を大きく変化させて二波長干渉法を高速に実現することも可能である。

第四の特徴は、3章で述べるように、測定される光路長差や群屈折率が中心波長での値であると厳密に定義されることである。このため、光学的厚さを $1\mu\text{m}$ 以下まで高精度に測定する場合はトレーサビリティが高く有利となる。

2. 表面形状の測定

表面形状測定には多くの報告がある。波長走査による位相変調を与える便宜から、干渉計の2つの腕の光路長は通常異なる値に設定される。参照-測定面間の光路長差を $2nL$ とすると、波長 λ_i のときの干渉次数は整数部分 N と端数部分 ε を用いて次式で表される。

$$2nL = \lambda_i (N_i + \varepsilon_i) \quad (4)$$

端数 $2\pi\varepsilon_i$ の測定は、単色光干渉計で1/2000 波長以上の分解能が達成されていることはすでに述べた。この分解能は、CCD 検出器の S/N 比やレーザー波長の安定度、およびレーザー強度雑音などで制約されている。波長走査干渉においても、波長を λ_i 中心に変化させて干渉縞位相を 2π 変調し、その間に記録した複数の画像から位相シフト法やヘテロダイン法によって高分解能に検出する。その分解能は、例えば位相シフトフィゾー干渉計に関しては単色光源の場合とほぼ同じであるが、波長走査光源のほうがわれわれの経験ではわずかに劣るようである。電流変調 DL では波長走査に伴う出力光強度変化が大きく誤差要因となるが、レーザー出力を記録して干渉縞強度を規格化したり、強度変化を補償する位相シフトアルゴリズム^{16,17)} が工夫されている。

透明平行平板の測定は、従来、裏面反射の干渉縞を抑えるため裏面に反射防止オイルを塗布するが、口径が大きくなると清掃作業が負荷となる。異なる光路長差の干渉信号が周波数空間で分離する性質を利用して、複数の干渉縞の位相を位相シフト法により選択的に測定可能である。この手法で平行平板の表面形状測定^{10,11)}、光学的厚さ不均一との同時測定¹²⁾ が行われた。さらに、3面以上の境界面形状測定に一般化された¹³⁻¹⁵⁾。

波長を線形に走査し縞強度変調の周波数測定から光路長差を決定することは、OFDR (optical frequency domain reflectometry) 法として古くから利用されている。波長を λ_1 から λ_2 まで走査するとき、媒質の屈折率が波長に線形に変化する近似の範囲内で式 (4) より次式が導かれる。

$$n_g L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} (N_1 - N_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (5)$$

観測した干渉縞信号を時間方向にフーリエ変換すると、干渉次数の差 $N_1 - N_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ の整数近似値が得られる。光路長差は、合成波長の半値とこの整数周波数の積として得られる。測定分解能は合成波長の半分となり、波長走査幅 10 nm (波長 633 nm) で約 20 μm となる。段差形状測定として電流変調 DL⁵⁾、色素レーザー⁶⁾、外部共振器 DL^{7,8)}、Ti:Sa レーザー³⁾ をそれぞれ光源とした測定が報告され

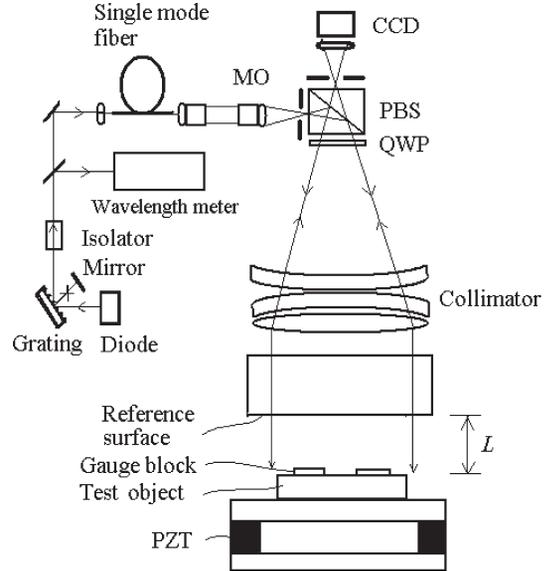


図2 口径 310 mm 波長走査フィゾー干渉計によるゲージブロック試料の形状測定。MO: 顕微鏡対物レンズ, PBS: 偏光ビームスプリッター, QWP: 1/4 波長板。

ている。また、粗面の形状測定でどの程度の傾斜角まで測定可能かが検討された⁹⁾。

波長走査幅が可視波長域で現状で 10 nm 程度と技術的に制約されるため、OFDR 法の測定分解能 (合成波長の半分) は 20 μm 前後である。このため 100 μm 以上の大きいスケールの段差測定には有効であるが、1 μm ~ 数十 μm 高の段差には分解能が不足する。こうした段差では、二波長法に端數位相測定法を組み合わせた方法がとられる。この方法では、合成波長が段差高の 4 倍以上になるように波長走査幅を (小さく) 設定する。すると式 (5) で次数差の整数部分 $N_1 - N_2$ はゼロないし 1 と確定し、波長走査前後に行う端數位相測定から端数差 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ が精密に決定されて、光路長差が決定される。端数部の測定法の工夫で多くの報告があり、PZT 素子駆動鏡による位相シフト干渉法¹⁸⁾、ヘテロダイン検出と面内走査を用いた方法^{19,20)}、モアレ縞による位相測定^{21,22)}、正弦波状波長変調による位相測定^{23,24)} が報告されている。この方法の奥行き測定分解能は、合成波長の約 1000 分の 1 で段差高さの約 250 分の 1、例えば 10 μm 高さの段差で 40 nm 程度である。このほか、3 波長を用いた合致法による段差形状の測定も報告されている²⁵⁾。

以上の二波長法では奥行き分解能は合成波長の 1000 分の 1 が上限なので、段差高さが大きくなると測定分解能は低下する。これを改善する方法として、合成波長を小さく保ったまま干渉縞周期数を数えるわれわれの研究を紹介する²⁶⁾。図 2 に示す口径 310 mm のフィゾー干渉計で、外部

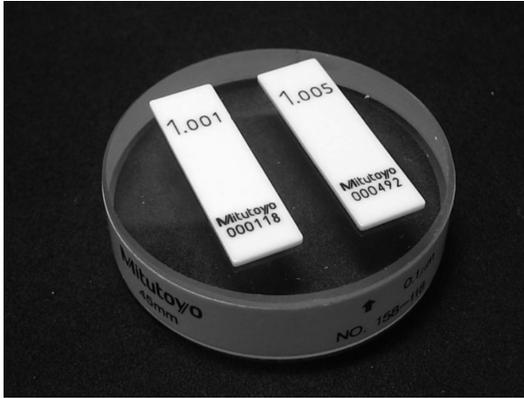


図3 段差試料の写真。口径 40 mm の光学ガラス平面上に、JIS 0 級で高さがそれぞれ 1.001 mm および 1.005 mm のゲージブロックがリングングされている。

共振器型 DL を光源として段差形状の測定を行った。DL 出力を二分割し、片方を波長計に他方を光ファイバーで干渉計に入力する。レンズで平行光として石英参照面および試料に照射する。試料は図 3 に示すように、1.001 mm および 1.005 mm のゲージブロックを貼り付けた口径 40 mm の平板ガラスである。波長を 632.1407 nm から 641.9879 nm まで走査し 491 枚の縞画像を記録する。また、走査の前後で PZT 素子で試料を光軸方向に機械的に半波長移動し、位相シフト法で端数位相 ϵ_1 , ϵ_2 を決定した。さらに、波長走査で得られた画像をフーリエ変換して周波数の整数近似値 ($N_1 - N_2 + \epsilon_1 - \epsilon_2$) を求めた。この整数近似値と端数値から次数差 $N_1 - N_2 + \epsilon_1 - \epsilon_2$ を決定する。こうして決定された光路長値 (中心波長 637 nm での $2n_g L$) の精度は 158 nm よりも高いので、波長 633 nm に換算した光路長値 $2nL$ を式 (4) に代入し干渉次数 N_1 を決定した。図 4 に測定された参照面-試料距離を示す。段差の高さはそれぞれ 1.001 mm および 1.005 mm 近傍の値となり公称値と矛盾しない。干渉次数 N が決定されると、段差高さや形状は端数位相値と同じ分解能 1/1000 波長で決定される。白抜きのパixel は、次数 N の割付けが失敗したパixel で、全体のパixel 数の約 30% であった。

3. 厚さと屈折率の測定

ガラスや結晶・シリコンウェハーなど透明平板の厚さ・屈折率を測定することは、光学素子製作のうえで基本である。半導体加工の細線化は露光プロセスでの焦点深度を小さくし、マスクガラスや半導体ウェハーの厚さや平坦度は $0.1 \mu\text{m}$ を上回る精度で測定することが要請されるようになった。光で測定できる距離は光学的距離なので、幾何学的厚さを決定するには、光学的厚さを予め知っている屈折

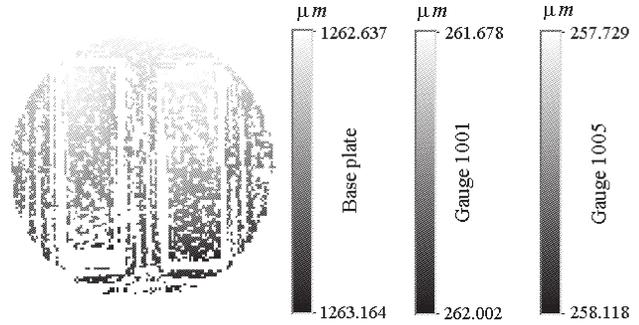


図4 測定された参照面-物体間の幾何学的距離。スケールは、右からそれぞれ 1.005 mm ゲージブロック、1.001 mm ゲージブロック、石英ガラスベース板。白抜きされている部分は干渉次数の割付けが失敗したパixel。

率でわり算するか、あるいは異なる 2 つの方法で光学的厚さを測定し、厚さと屈折率を同時に決定するかのいずれかの方法がとられる。

後者では、共焦点顕微鏡と白色光干渉計を組み合わせた例が多く報告されている²⁷⁾が、共焦点顕微鏡と波長走査干渉計の組み合わせも報告されるようになった²⁸⁾。文献 27 では、白色干渉計を用いた厚さ計測について詳しく説明されている。文献 28 では、電流変調 LD にヘテロダイナ検出法を併用して試料の光学的厚さ $n_g T$ を測定し、次に顕微鏡の周辺光線の集光位置を試料の表裏面に一致させるときの試料の移動距離が、対物レンズの開口数 NA と光学的厚さ nT を用いて次式で表されることを用いて nT を算出する。

$$z = T \sqrt{\frac{1 - NA^2}{n^2 - NA^2}} \quad (6)$$

この方法で厚さ、屈折率がそれぞれ $10 \mu\text{m}$ 、0.5% の測定分解能が得られている。

DFB レーザー (中心波長 1535 nm) を光源とした波長走査シアリング干渉計で、試料平板を回転させる方法で、シリコンウェハーおよび LiNbO_3 結晶ウェハー (いずれも厚さ約 0.5 mm) の厚さと屈折率を測定した結果が報告されている²⁹⁾。この方法では、傾いた透明平板試料を平行光で照明し、直接透過光と内部で 2 回反射した透過光を干渉させる。50 nm 程度の測定分解能が得られたと報告されている。

これらの方法は点計測であり、試料が平行平面で構成されていると仮定しているため、空間分布を得るには試料の空間走査が必要となる。また、得られる 2 種類の光学的厚さは、片方は群速度、他方は位相速度に関する屈折率を含むため、幾何学的厚さと屈折率を得るには試料の波長分散の情報が必要となる。われわれは厚さの二次元分布を直接

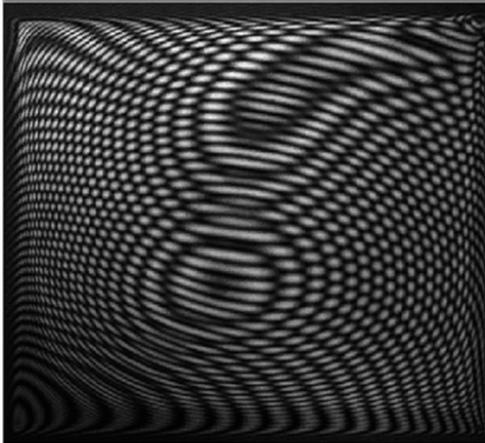


図5 マスクガラス測定で観察された干渉縞図形。参照面とマスク表裏面の三面干渉で3種類の干渉縞が観察される。中央部の同心円状の干渉縞がマスク表裏面で形成された縞で位相検出対象である。

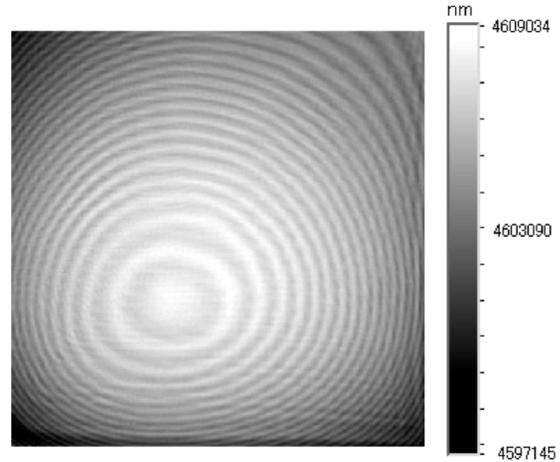


図6 マスクガラスの光学的厚さ分布の測定結果。口径7インチの中心部分(142×142 mm×3.1 mm)で、中心波長637 nmでの群屈折率に関する値 $n_g T$ の分布を示す。

得ることを目標にして、多面干渉測定¹⁵⁾を拡大して光学的厚さの測定、および空気間隙の絶対距離測定から厚さを測定することを目標に研究を行っている。以下に、前章で述べたのと同じフィゾー干渉計を用いてマスクガラスの光学的厚さを測定した実験³⁰⁾を紹介する。

段差測定と異なり、波長走査の前後で試料を機械的に動かしても干渉縞を変調できないので、走査開始波長632 nmおよび終波長642 nm付近で波長変化量を細かくし縞変調2周期分を38分割して記録する。図5に、7インチ四方のマスクガラス試料の表裏面および干渉計の参照面の三面干渉で観察された干渉縞を示す。38枚の画像から位相シフト法で端数位相 $\epsilon_{1,2}$ を決定した。次に2章と同様に、632~642 nmの波長走査間に記録した2621枚の干渉縞画像にフーリエ変換を施して干渉次数近似値を得た。最後に、この近似値と端数値から干渉次数を決定して、式(5)から光学的厚さを決定した。図6に測定結果(145 mm □)を示す。多面干渉が原因で端数値相抽出時に生じる他周波数からのクロストークがおもな誤差要因となり、約2 μm 干渉縞形状の系統誤差が観察された。現状では、ノイズによる誤差が1/4波長を上回るため、干渉次数の決定は困難である。波長走査幅が今後増加して、合成波長がより小さくなれば、このS/N比不足は緩和される。しかしながら、走査幅が20 nm(波長633 nm)を超えると、測定媒質の屈折率変化が波長に線形であるとみなせなくなるため、式(5)が厳密に成り立たなくなる。厚さ測定および形状測定に要請される精度は、現状で0.1 μm 以上なので今後さらなるノイズの除去・低減が必要である。

文 献

- 1) P. de Groot and L. Deck: "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain," *J. Mod. Opt.*, **42** (1995) 389-401.
- 2) 春名正光: "光コヒーレンストモグラフィの進展", 光技術コンタクト, **40** (2002) 760-766.
- 3) 洲之内啓, 郭 志徹, 山本明弘, 和田智之, 加瀬 究, 山口一郎, 田代英夫: "超広帯域波長走査干渉計", 光学, **29** (2000) 620-625.
- 4) K. Okada, H. Sakuta, T. Ose and J. Tsujiuchi: "Separate measurements of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 3280-3285.
- 5) M. Takeda and H. Yamamoto: "Fourier-transform speckle profilometry: Three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 7829-7837.
- 6) S. Kuwamura and I. Yamaguchi: "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 4473-4482.
- 7) T. H. Barnes, T. Eiju and K. Matsuda: "Rough surface profile measurement using speckle optical frequency domain reflectometry with an external cavity tunable diode laser," *Optik*, **103** (1996) 93-100.
- 8) H. J. Tiziani, B. Franze and P. Haible: "Wavelength-shift speckle interferometry for absolute profilometry using a mode-hop free external cavity diode laser," *J. Mod. Opt.*, **44** (1997) 1485-1496.
- 9) A. Yamamoto and I. Yamaguchi: "Profilometry of sloped plane surfaces by wavelength scanning interferometry," *Opt. Rev.*, **9** (2002) 112-121.
- 10) P. J. de Groot: "Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 2658-2663.
- 11) K. Hibino, B. F. Oreb and P. S. Fairman: "Wavelength-scanning interferometry of a transparent parallel plate with refractive index dispersion," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 3888-3895.
- 12) K. Hibino, B. F. Oreb, P. S. Fairman and J. Burke: "Simul-

- taneous measurement of surface shape and variation in optical thickness of a transparent parallel plate in wavelength scanning Fizeau interferometer," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 1241-1249.
- 13) L. L. Deck: "Fourier-transform phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 2354-2365.
 - 14) R. Hanayama, K. Hibino, S. Warisawa and M. Mitsuishi: "Phase measurement algorithm in wavelength scanned Fizeau interferometer," *Opt. Rev.*, **11** (2004) 337-343.
 - 15) K. Hibino, J. Burke, R. Hanayama and B. F. Oreb: "Tunable phase-extraction formulae for simultaneous shape measurement of multiple surfaces with wavelength-shifting interferometry," *Opt. Express*, **12** (2004) 5579-5594.
 - 16) Y. Ishii and R. Onodera: "Phase-extraction algorithm in laser-diode phase-shifting interferometry," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1883-1885.
 - 17) R. Onodera and Y. Ishii: "Phase-extraction analysis of laser-diode phase-shifting interferometry that is insensitive to changes in laser power," *J. Opt. Soc. Am. A*, **13** (1996) 139-146.
 - 18) J. Kato and I. Yamaguchi: "Phase-shifting fringe analysis for laser diode wavelength-scanning interferometer," *Opt. Rev.*, **7** (2000) 158-163.
 - 19) H. J. Tiziani, A. Rothe and N. Maier: "Dual-wavelength heterodyne differential interferometer for high-precision measurement of reflective aspherical surfaces and step heights," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 3525-3533.
 - 20) S. Yokoyama, J. Ohnishi, S. Iwasaki, K. Seta, H. Matsmoto and N. Suzuki: "Real-time and high-resolution absolute-distance measurement using a two-wavelength superheterodyne interferometer," *Meas. Sci. Technol.*, **10** (1999) 1233-1239.
 - 21) R. Onodera and Y. Ishii: "Fourier description of the phase-measuring process in wavelength phase-shifting interferometry," *Opt. Commun.*, **137** (1997) 27-30.
 - 22) Y. Bitou: "Two wavelength phase-shifting interferometry with a superimposed grating displayed on an electrically addressed spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 1577-1581.
 - 23) T. Suzuki, T. Yazawa and O. Sasaki: "Two-wavelength laser diode interferometer with time-sharing sinusoidal phase modulation," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 1972-1976.
 - 24) T. Suzuki, H. Suda and O. Sasaki: "Double sinusoidal phase-modulating distributed-Bragg-reflector laser-diode interferometer for distance measurement," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 60-66.
 - 25) A. Pfortner and J. Schwider: "Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 667-673.
 - 26) K. Hibino, Y. Tani, T. Takatsuji, Y. Bitou, S. Warisawa and M. Mitsuishi: "Absolute interferometry for surface shapes with large steps by wavelength tuning with a mechanical phase shift," *Proc. SPIE*, **6292** (2006) 62920Q.
 - 27) M. Haruna, M. Ohmi, T. Mitsuyama, H. Tajiri, H. Maruyama and M. Hashimoto: "Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 966-968.
 - 28) T. Fukano and I. Yamaguchi: "Separation of measurement of the refractive index and the geometrical thickness by use of a wavelength-scanning interferometer with a confocal microscope," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 4065-4073.
 - 29) G. Coppola, P. Ferraro, M. Iodice and S. D. Nicola: "Method for measuring the refractive index and the thickness of transparent plates with a lateral-shear, wavelength-scanning interferometer," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 3882-3887.
 - 30) K. Hibino, K. Yangjin, Y. Bitou, S. Ohsawa, N. Sugita and M. Mitsuishi: "Measurement of absolute optical thickness distribution of a mask-glass by wavelength tuning interferometry," *Interferometry XIV, Proc. SPIE*, **7063** (2008) 0S1-0S9.

(2008年7月1日受理)