

SHG 青紫色レーザの波長偏移を用いた位相シフト干渉計

陳 軍^{*1} 清原 通雄^{*2}

Phase-shifting interferometry using wavelength shifted SHG blue laser

Jun Chen ^{*1} and Michio Kiyohara ^{*2}

We describe a digital phase-measurement interferometer using a tunable SHG blue laser at 410nm. This system enables us to test high NA lenses used in high-density optical storage devices. Excellent features such as wavelength tunability, narrow spectral linewidth, and wavelength stability, make the SHG laser very suitable as a light source for a phase-shifting interferometer working at blue-violet wavelength region. We investigated the tuning characteristics of the SHG laser as a function of DBR-section current and found that the wavelength-changing ratio was 0.0017nm/mA. An unbalanced Twyman-Green interferometer with the SHG laser was composed to measure the transmitted wavefront of an optical pickup lens with a NA of 0.85. The theory and experimental results are presented.

1. はじめに

IT(情報通信技術)の目覚ましい進歩により、インターネットで取り扱う情報量が爆発的に増え、また、テレビ放送では地上波デジタルハイビジョン放送も展開されつつある。そのため、高密度・大容量の記録装置が強く求められている。光ディスクは大容量と高速アクセスなどの点から最有望の記録媒体の一つである。光ディスクの記録容量は光ピックアップレンズの開口数(NA)及び情報の読み書きに使用されるレーザの波長 λ に依存し、すなわち、記録容量は $(NA/\lambda)^2$ に比例する。窒化ガリウム(GaN)系半導体を用いた青紫色半導体レーザの開発により、片面1層15GBや23GBの光ディスクが開発されている。このような光ディスクドライブには、高品質のプリズムや波面収差が十数分の1波長以下の光ピックアップレンズが用いられている。このような高品質の光学部品の開発製造には、同じ青紫色レーザを用いた計測評価装置が欠かせない。

一方、位相シフト干渉法¹⁻¹⁴は干渉する2光波間の位相を段階的に変えたときの3つ以上の干渉縞強度分布から被検の位相分布を高精度で導出する方法で、最も有効な干渉計測法として知られている。いくつかの位相シフトを与える方法³⁻¹⁴が開発され

ているが、半導体レーザの注入電流による発振波長の偏移を用いた方法は、従来のピエゾ素子を用いた方法に比べて安価で、可動部がないなどの利点があり、最も有望な方法の一つである。

本論文は波長可変SHG(Second Harmonic Generation)青紫レーザを用いた波長偏移位相シフト干渉計について述べる。GaN系半導体レーザは次世代光ディスクシステムの光源として用いられている。しかし、赤外波長領域の半導体レーザと違って、GaN半導体レーザは一般的にマルチモードで発振する。発振波長が不安定のうえ、干渉縞可視度の低下から、一定の光路差を必要とする波長偏移位相シフト干渉計の光源には不向きである。

GaN系半導体レーザと違って、SHG青紫レーザは単一モード発振、狭スペクトル線幅、波長の安定性など優れた特性を有し、青紫色波長領域で作動する干渉計の光源として最適である。そこで、SHGレーザの波長偏移特性を調べたうえ、両腕に光路差を持つトワイマン・グリーン干渉計の光源として用い、波長偏移位相シフト干渉計を構成した。位相シフトを導入するには、レーザのDBR(Distributed Bragg Reflector)領域の注入電流を変えて、レーザの発振波長を変化させた。さらに、高NA光ピックアップレンズの波面収差の計測でこの方法の有効性

^{*1} 東京工芸大学工学部メディア画像学科教授 ^{*2} 株式会社 清原光学
2006年10月6日 受理

を示した。

2. SHG 青紫色レーザーの波長偏移特性

2.1 SHG 青紫色レーザー

我々の研究に使用した SHG 青紫色レーザー（松下電器製）は波長可変 DBR 赤外レーザーと導波路型光第 2 高調波デバイスから構成され、その構造を図 1 に示す。分散型反射器を設けた波長 820nm の半導体レーザーからの出力光を周期的な分極反転構造を設けたニオブ酸リチウム導波路に入射させてパワー 10mW、波長 410nm の出射光を得る。導波路に形成された周期的な分極反転による擬似位相整合 (QPM: Quasi-phase matching) により、高い変換効率を実現されている。GaN 系半導体レーザーそのものでは、DBR や分布帰還型 (DFB: Distributed Feedback) の形成が困難なため、シングルモードでの発振が得られない。それに対して、SHG レーザは赤外 DBR

半導体レーザーの単一モード発振や、狭スペクトル線幅 (<500kHz)、長時間安定性などの優れた特性をそのまま持ち、さらに DBR 領域などの注入電流で発振波長を変化することが可能である。

DBR 赤外半導体レーザーは活性領域と、位相制御領域、DBR 領域の三つの領域からなる。これらの領域はそれぞれの電極によって独立に制御できる。そのため、レーザーの発振波長はこの三つの領域に注入する電流で制御できる。まず、DBR 領域に流れる電流が変わると、ブラッグ波長が変わり、そのため、発振波長も変化する。一方、位相制御領域の注入電流を変えると、導波路のキャリア密度が変わり、導波路の有効屈折率が変わり、その結果活性領域と DBR 領域の光路長が変わって、発振波長が変化する。また、活性領域の注入電流を変えると、同じ理由で活性層の屈折率が変わり、波長が変化する。

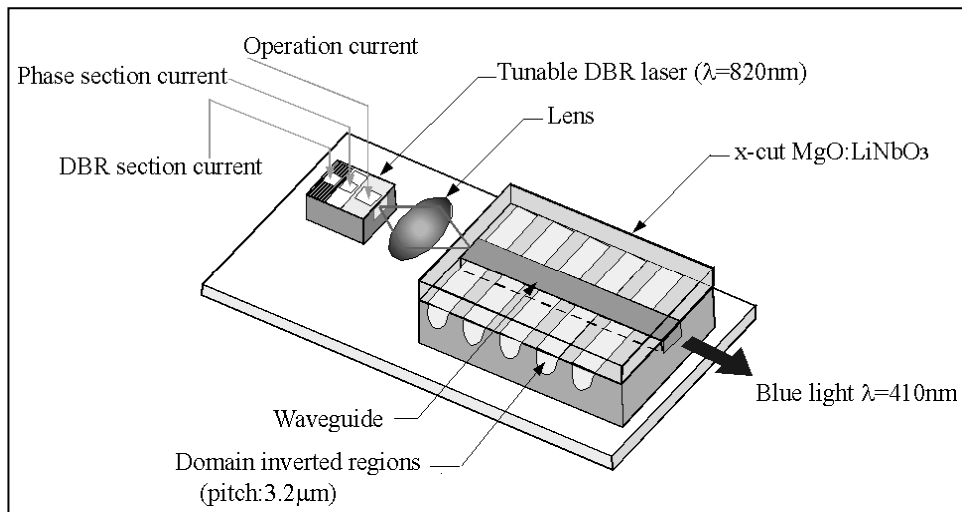


図 1 SHG 青紫色レーザーの構造

2.2 SHG 青紫色レーザーの波長偏移特性

レーザーの波長偏移特性には個体差があり、位相シフト干渉計の光源として用いる前に、その特性を調べて置く必要がある。我々は高分解能光スペクトラムアナライザ(Q8347, Advantest)を用いて、SHG レーザの波長偏移特性を調べた。用いた光スペクトラムアナライザは可動ミラーを持つマイケルソン干渉計を内蔵し、スペクトルの導出にはフーリエ分光法

を用いており、波長分解能は 0.001nm に達している。青紫色レーザーのモード間隔は狭く、近接モードを分離して計測するには、このような高分解能の分光器が不可欠である。さらに、温度変化による影響を抑えるため、温度制御装置を用いてレーザーの雰囲気温度を $25 \pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内に保てるようにした。レーザーの注入電流を 60mA、位相領域の電流を 17.1mA に固定して、DBR 電流を 50mA から 65mA まで変えた

ときの発振波長を計測し、結果を図2に示す。波長が急激に変化したところは発振波長が軸モードの隣のモードにジャンプしたもので、モードホップと呼ばれる。一方、DBR 電流が 52mA から 63mA までの領域では、発振波長がほぼ線形的に変化し、DBR 電流に対する発振波長の変化率は $0.0017\text{nm}/\text{mA}$ である。上述通り、DBR 電流を上げると発振波長が長波長側にシフトし、この場合、QPM-SHG 光導波路の位相整合条件がずれ、出力パワーも変わる。DBR 電流を変えたときのレーザパ

ワーの変化を図3に示す。レーザパワーの変化は位相シフト干渉法の位相導出プロセスで大きな誤差原因になるため、パワー変動が最も小さい 56 から 60 mA までの領域を選択して実験に用いた。SHG レーザの発振波長は DBR 電流のほかに、レーザ自身の注入電流や位相制御領域の電流によっても変化するが、波長変化率やパワーの変動などを総合的に考慮した結果、本研究では DBR 電流による波長偏移を選択した。

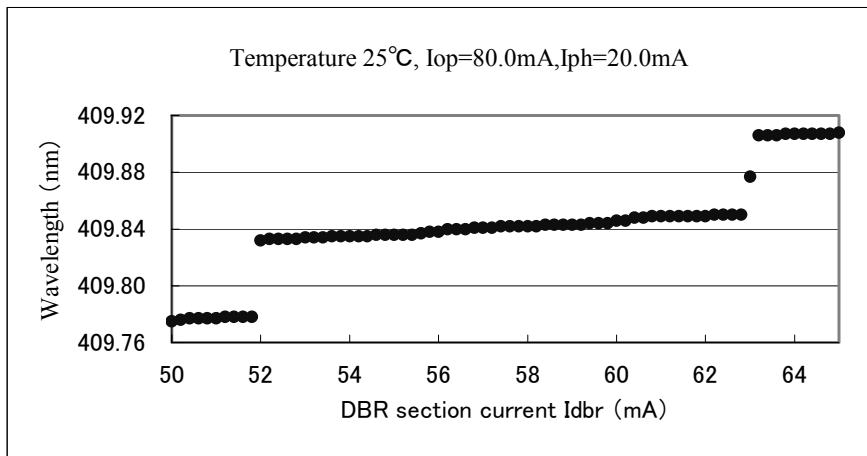


図2 SHG 青紫色レーザの発振波長の DBR 電流依存性

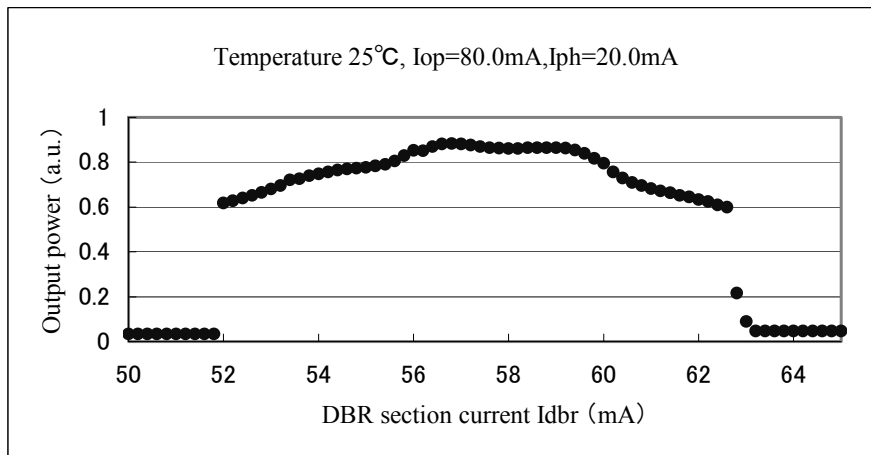


図3 SHG 青紫色レーザの波長と出力パワーの DBR 電流依存性

3. 青紫色レーザーを用いた位相シフト干渉計

SHG 青紫色レーザーの波長偏移を用いた位相シフト干渉計の構成図を図4に示す。レーザーからの光を対物レンズ (4X、NA0.4) でコリメートし、さらにビームエキスパンダーを用いてビーム径を拡大した後、トワイマン・グリーン干渉計に入射させる。開口数の小さい対物レンズを用いることで、半導体レーザーからの出射光の非点収差を低減できる。干渉計の両腕間には、距離 L の光路差を設け、この光路差は波長偏移を通して干渉する2光束間に位相シフトを導入するのに必要である。拡大されたレーザービームはプリズムビームスプリッター(BS)によって2つに分割し、一方のビームは参照平面鏡を照射し、もう一方は被検平面鏡を照射する。レンズの波面収差を計測する場合は、被検平面鏡の代わりに被検レンズと参照球面鏡をセットする。参照鏡と被検鏡からの反射光は再びビームスプリッターで重ねあわせて干渉する。干渉縞パターンは結像レンズを通して CCD カメラで検出する。検出された干渉縞

の強度分布は

$$I(x, y; \lambda) = a(x, y) + b(x, y) \cos \frac{2\pi}{\lambda} [(2W(x, y) + L)]^2, \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $a(x, y)$ と $b(x, y)$ はそれぞれ干渉縞パターンのバイアスと振幅で、 $W(x, y)$ は被検の位相分布である。もし SHG レーザの DBR 電流を ΔI_d だけ変えたと、レーザーの発振波長は $\Delta \lambda = \alpha \Delta I_d$ だけ変化する。ただし α は発振波長の変化率である。発振波長が λ から $\lambda + \Delta \lambda$ に変わったとき、干渉縞の強度分布は

$$I(x, y; I_d) = a(x, y) + b(x, y) \cos \{ \varphi(x, y) - \delta \}, \quad (2)$$

となる。ただし、 $\varphi(x, y) = (2\pi/\lambda) \{ 2W(x, y) + L \}$ は被検の位相分布で、 δ はレーザーの波長偏移による位相シフトである。位相シフトと DBR 電流の変化量 ΔI_d とは

$$\delta = \frac{2\pi L \Delta \lambda}{\lambda^2} = \frac{2\pi L \alpha \Delta I_d}{\lambda^2}, \quad (3)$$

のような関係がある。

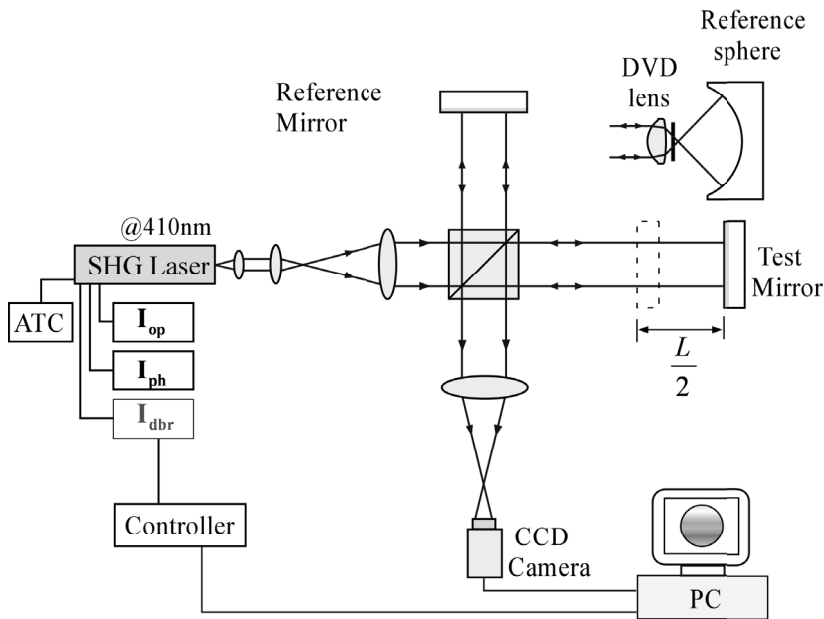


図4 SHG 青紫色レーザーを用いた波長偏移位相シフト干渉計の構成図

(2)式の干渉縞強度分布において、バイアス、振幅と被検位相の三つの未知数があるので、位相シフトを導入した三つ以上の干渉縞画像から被検の位相

分布を算出できる。複数の位相導出アルゴリズムが提案されているが、¹⁻² 位相シフトエラーによる位相誤差が小さいことから、Schmit et. al.¹⁴ らによ

て提案された5バケット法を用いた。位相シフト δ を

$$\delta_j = (j-1)\frac{\pi}{2} \quad (j=1,2,3,4,5) \quad (4)$$

のように与えたとき、被検面上の各点における被検の位相 $\varphi(x,y)$ は

$$\varphi(x,y) = \tan^{-1} \frac{-I_1 + 4I_2 - 4I_4 + I_5}{I_1 + 2I_2 - 6I_3 + I_5} \mod 2\pi, \quad (5)$$

と求められる。ここで、 $I_1 \sim I_5$ は位相シフトを(4)式に従って与えたときの干渉縞の強度である。算出

した位相分布からは、

$$W(x,y) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(x,y) - \frac{L}{2}, \quad (6)$$

の関係式から被検の波面収差分布を求められる。一般的に、このように求められた位相分布には参照波の傾きや被検レンズの焦点はずれによるチルトやディフォーカスなどが含まれる。これら不要の位相成分を除去し、波面収差各成分を分離するため、最少二乗法を用いて、計測で求められた位相分布をゼルニケ多項式に適合させた。

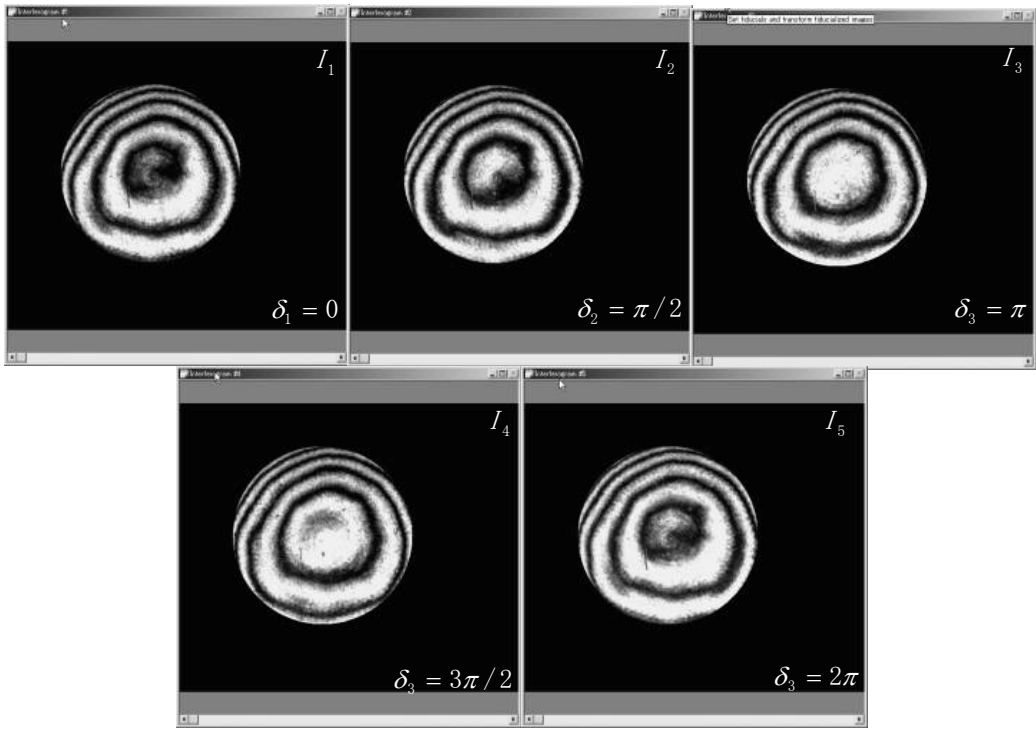


図5 SHG レーザの波長を変化させて $\pi/2$ ずつの位相シフトを与えたときの干渉縞
(被検レンズ : NA0.85 の光ピックアップレンズ)

4. 波面計測の実験と実験結果

SHG 青紫色レーザの波長偏移を用いた位相シフト干渉計を用いて、ブルーレイディスク(BD)用光ピックアップの対物レンズの波面収差を計測した。被検レンズは、ガラスモールド非球面レンズで、開口数は 0.85 で、レンズの直径は 3 mm である。参照球面鏡の曲率半径は 10mm で、開口数は 0.9 である。

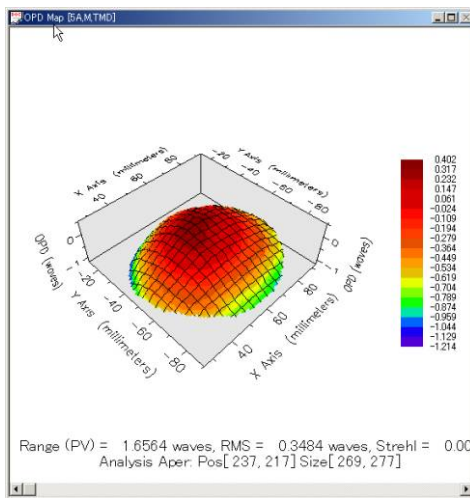
被検対物レンズは深さ 0.1mm の記録層にレーザ光を集光させるように設計されているため、波面収差計測を行う際、厚さ 0.1mm ガラス板を補償板としてレンズのすぐ後に挿入した。CCD カメラで検出した干渉縞の強度分布は画像ボードを通して $640 \times 480 \times 8$ -bit のデジタル信号に変換し、計算機により、被検の位相分布を算出する。トワイマン・グリーン干渉計の両腕には 30.9 mm の光路差を

導入した。(3)式から 2π の位相シフトを導入するのに必要な DBR 電流の変化は 3.2mA と得られる。実験では、干渉縞の取り込みと位相計算には Intellwave (Engineering Synthesis Design Inc.)を使用した。

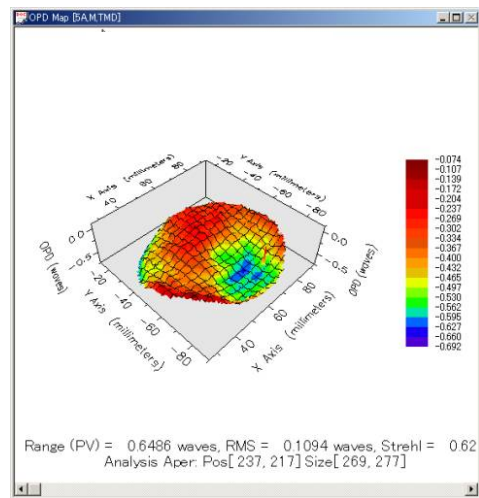
レンズの波面収差計測の実験において、SHG レーザの DBR 電流を 65mA から 0.8mA ずつ変え、干渉計両腕に $\pi/2$ ずつの位相シフトを与えて得られた五つの干渉縞画像を図 5 に示す。これらの干渉縞の強度分布から(5)式の位相導出アルゴリズムを用いて被検の位相分布を算出し、さらにゼルニケ多項式に適合させた。図 6 に実験結果を示す。図 6 (a)はチ

ルト波面のみを取り除いたときの波面分布で、図 6(b)はチルトとディフォーカスの双方を取り除いた結果である。また、測定で得られた球面収差は 0.0167 λ で、直交する 2 座標軸のコマ収差はそれぞれ 0.0317 λ と 0.1892 λ であった。これらの実験結果は従来のピエゾ素子を用いた干渉計の計測結果とよく一致している。

高 NA のレンズの収差を計測する際、被検の波面収差を精密に計測するには、できるだけワンカラーの状態での計測が望ましい。¹⁵ここでは、位相の定量計測の有効性を示すため、意図的にディフォーカスを導入して波面収差の計測を行った。



(a)



(b)

図 6 BD 用光ピックアップレンズの透過波面の計測結果

(a)傾き波面を取り除いた後の波面分布(b)焦点はずれを取り除いた後の波面分布

5. おわりに

青紫色波長領域で使用される光学部品やデバイスの高精度な干渉計測を目的に、SHG 青紫色レーザの発振波長偏移を用いた位相シフト干渉法を提案し、レンズの波面収差の計測実験でその有効性を確かめた。発振波長が短いことから、青紫色半導体レーザには赤外半導体レーザに用いられる DBR や DFB 構造を導入しにくいいため、通常の窒化ガリウム系の青色半導体レーザは単一波長で発振せず、高精度の干渉計の光源としては不向きである。SHG 青紫色レーザは短波長の光を出力しながら、DBR 赤外半導体レーザの持つ単一波長発振や、狭スペクトル

線幅、高波長安定性など優れた特性を受け継いでいる。コヒーレンス長が長いと、干渉計の両腕に数センチの光路差をつけても、可視度の高い干渉縞が得られ、波長偏移位相シフト干渉計の光源として最適である。

参考文献

- 1) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and J. Brangaccio, "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses", Appl. Opt. **13**, pp. 2693-2703, 1974.

- 2) K. Creath, "Phase-measurement interferometry Techniques", in *Progress in Optics*, E. Wolf, ed. (Elsevier, Amsterdam), Vol. **26**, pp. 349-393, 1988.
- 3) J. Chen, J. Endo, Y. Niino, and H. Fujita, "Phase-shifting interference microscopy using a Fresnel's biprism", *Proc. of SPIE*, **4416**, Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology, pp. 158-161, 2001.
- 4) J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada, and H. Fujita, "Transmission laser microscope using a phase-shifting technique and its application to measurement of optical waveguide", *Appl. Opt.*, **41**, pp. 1308-1314, 2002.
- 5) Y. Ishii, "Laser diode interferometry", in *Progress in Optics*, E. Wolf, ed. (Elsevier, Amsterdam), Vol. **46**, pp. 243-309, 2004.
- 6) Y. Ishii, J. Chen, K. Murata, "Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode", *Opt. Lett.*, **12**, pp. 233-235, 1987.
- 7) K. Tatsuno and Y. Tsunoda, "Diode laser direct modulation heterodyne interferometry", *Appl. Opt.* **26**, p. 37-, 1987.
- 8) J. Chen, Y. Ishii, K. Murata, "Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode", *Appl. Opt.*, **27**, pp.124-128, 1988.
- 9) J. Chen and K. Murata, "Digital phase measurement Fizeau interferometer for testing of flat and spherical surfaces", *Optik* **81**, pp. 28-32, 1988.
- 10) J. Chen, N. Baba, and K. Murata, "Quantitative measurement of a phase object by fringe scanning interference microscopy", *Appl. Opt.* **28**, pp. 1615-1617, 1989.
- 11) R. Onodera, Y. Ishii, "Phase-extraction analysis of laser-diode phase-shifting interferometry that is insensitive to changes in laser power", *JOSA A*, **13**, p. 139, 1996.
- 12) Y. Ishii, J. Chen, R. Onodera, and T. Nakamura, "Phase shifting Fizeau interference microscope with a wavelength shifted laser diode", *Opt. Eng.* **42**, pp. 60-67, 2003.
- 13) J. Schmit and K. Creath, "Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.* **34**, 3610-3619 (1995).
- 14) S. Nakadate and M. Isshiki, "Real-time Fringe Pattern Processing and Its Applications", *Proc. of SPIE*, 2544, pp. 74-86 (1995).
- 15) 渋谷真人, "投影光学系リソグラフィの高解像力化の研究", 博士論文, pp.63-66, 1996.