低コヒーレンス位相シフト干渉法を用いたナノ潤滑膜の 三次元画像計測*

張 賀 東^{*1}, 三 矢 保 永^{*2}
坂 野 貴 裕^{*3}, 福 澤 健 二^{*4}

Three-Dimensional Measurements of Nanometer-Thick Lubricant Films Using Low-Coherence Phase-Shifting Interferometry

Hedong ZHANG^{*5}, Yasunaga MITSUYA,
Takahiro BANNO and Kenji FUKUZAWA

^{*5} Department of Complex Systems Science, Graduate School of Information Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8601 Japan

We have developed a method utilizing low-coherence phase-shifting interferometry (LCPSI) to directly visualize molecularly thin lubricant films coated on diamond-like carbon (DLC) surfaces. In contrast to conventional point-by-point scanning methods, this method straightforwardly measures lubricant distributions in three dimensions using phase-shifted two-dimensional interferograms which are generated by a Michelson interferometer and a robust feedback controlled phase-shifting system. To effectively suppress the image noise caused by unwanted interference, we employed a low-coherence light source rather than a laser. Moreover, an image subtraction method, in which the pseudo lubricant thickness attributed to surface roughness and system noise is first measured on a non-lubricated disk and is then subtracted from the result obtained on the lubricated disk, was introduced to eliminate the influence of surface roughness and system noise. By measuring nanometer-thick perfluoropolyether films coated on DLC surfaces, we demonstrated that the LCPSI is capable of providing real-time three-dimensional measurements with a thickness resolution of sub-nanometer and a spatial resolution of several micrometers.

Key Words: Tribology, Lubrication, Optical Measurement, Interferometry, Phase Shift, Low Coherence, Three-Dimensional Measurement, Nanometer Thickness

1. まえがき

磁気ディスク装置では、信頼性・耐久性を確保するために、ディスクの表面に高分子液体潤滑剤がごく薄く塗布されている。磁気ヘッドの浮上すきまの微小化により記録密度を向上する点からは、潤滑膜はできるだけ薄いほうが望ましく、その厚さは、1-2 nm まで微小化されて、分子サイズ（主鎖の断面直径約 0.6 nm）に近づいており、これ以上の薄膜化には限界が見え始めている⁽¹⁾。浮上すきまの微小化とともに、潤滑膜の特性や挙動が、直接浮上安定性や信頼性を支配するよ

うになっている。とくに、ヘッドとディスクの接触摺動における潤滑膜の減耗や、間欠接触における潤滑膜の破断に関連して、ナノ潤滑膜の表面流動現象の解明が重要な課題となっている。

ナノ潤滑膜の表面流動特性を評価する方法として、ディップ法（ディスクを垂直に潤滑剤の希釈液に浸して引き上げる方法）により、ディスク表面の一部に段差状の潤滑膜を形成し、段差境界における潤滑膜の厚さ分布の経時変化を測定する方法がある⁽²⁾⁽³⁾。これまでは、膜厚の測定には、おもにエリプソメトリ⁽²⁾⁽⁴⁾、赤外分光分析⁽⁵⁾などの光学的な方法や、X線光電子分光法⁽⁶⁾などの化学的な表面分析法が用いられてきた。最近では、複数の光学現象を併用し、種々の測定データを融合して表面特性を系統的に測定・評価する光学式表面分析装置（optical surface analyzer: OSA）が開発され、潤滑膜の厚さや表面流動特性の測定に応用されている⁽⁷⁾。これらの方法は、いずれも長短があり、目的に

* 原稿受付 2006 年 12 月 21 日。

^{*1} 正員，名古屋大学情報科学研究科（〒464-8601 名古屋市千種区不老町）。

^{*2} 正員，フェロー，名古屋大学工学研究科。

^{*3} 名古屋大学工学研究科。

^{*4} 正員，名古屋大学工学研究科。

E-mail: zhang@nuem.nagoya-u.ac.jp

より使い分けられている。また、基本的には点測定（一次元）であり、膜厚分布を測定するためには、なんらかの機械的走査を必要とする。

一方著者は、ディスク表面におけるナノ潤滑膜の表面流動現象を直接可視化するために、マイケルソン顕微干涉を利用して、潤滑膜の分布を二次元画像として測定する新しい方法を提案するとともに、実測により二次元測定が可能であることを示した⁽⁸⁾。この計測法は、被測定部にレーザ光を面照射して、マイケルソン干涉縞を形成し、干涉縞の歪みの時間推移を用いて、流動現象を測定するものである。従来の点測定法（一次元）と異なり、走査が不要なため短時間の計測や、リーク型顕微鏡の利用による高倍率の計測が可能な点に特長がある。しかし、干涉縞画像の解析法として尾根線検出法を使用しているために、画像情報の利用効率が悪い点、また光源としてコヒーレンスの高いレーザを使用しているために、散乱光や迷光に起因する画像ノイズが大きい点に問題が残されていた。

本報告では、これらの問題を解決するために、従来の研究をさらに発展させ、外乱に頑健な位相シフト制御系を導入することによって、二次元マイケルソン干涉縞画像に位相シフト法を適用し、三次元画像計測が可能とした。また、干涉光学系の光源として、低コヒーレンスの白色光源を採用し、散乱光や迷光に起因する干涉ノイズを抑圧するとともに、潤滑膜付きディスクの測定結果から、潤滑膜なしディスクの測定結果を引き算処理する方法を導入して、物体面と参照面の面粗さやシステムノイズの影響を効果的に除去し、測定精度を飛躍的に向上した。さらに、ダイヤモンドライクカーボン（diamond-like carbon: DLC）表面上に形成した段差状パーフロロポリエーテル（perfluoropolyether: PFPE）系潤滑膜の厚さ分布を実測し、本手法により、sub-nmの厚さ精度と数 μm の高空間分解能で、リアルタイムかつ三次元的な測定が可能であることを確認した。

2. 位相シフト法による三次元計測の原理

位相シフト法は、物体光と参照光間に一定の位相差を与えた時の干涉光の強度変化を複数枚の二次元干涉

Fig. 1 Principle of phase-shifting Michelson interferometry

縞画像として採取して、これらを画像処理することにより、干涉縞画像の各点における物体光と参照光の位相差（位相画像）を算出する手法である⁽⁹⁾。位相画像を得るためには3枚以上の干涉縞画像を必要とし、複数の画像間の差分処理により、位相画像を得る。差分処理に使用する画像枚数を増やすことにより、ノイズ成分の抑圧効果を高めることが可能である⁽¹⁰⁾。本研究では、画像処理時間の節約を考慮して、8枚の干涉縞画像を使用することとした。

マイケルソン干涉系に位相シフト法を適用して、ディスク表面におけるナノ潤滑膜の厚さ分布を三次元的に測定する原理を図1に示す。物体面と参照面に光を面照射し、ハーフミラーにより両者からの反射光を合成して、等厚干涉縞を形成する。参照光と物体光に位相差を付与するために、参照面を $\lambda/16$ （ λ : 波長）の間隔で駆動して、8枚の干涉縞画像を撮影する。干涉縞画像の各点における物体光と参照光の位相差 $\phi(x, y)$ は以下の式で与えられる⁽⁹⁾。

$$\phi(x, y) = -\tan^{-1} \left[\frac{\sum_{j=0}^7 I_j(x, y) \sin\left(\frac{j\pi}{4}\right)}{\sum_{j=0}^7 I_j(x, y) \cos\left(\frac{j\pi}{4}\right)} \right] + 2\pi N(x, y) \quad (1)$$

ここで、 $I_j(x, y)$ ($j=0, 1, \dots, 7$) は干涉縞画像の強度分布、 $N(x, y)$ は逆 $\tan$ 関数によって算出された不連続な位相を接続するための整数である。

測定原理を簡単に説明するため、物体面からの反射光は潤滑膜表面からとディスク表面からのみとし、かつ光の垂直入射の近似が成立するものと仮定する。この場合には、参照面に対して物体面の各点における厚さ $h(x, y)$ は次式により求められる。

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y) \quad (2)$$

ディスク表面を完全な平滑平面に近似して、これを厚さ $h(x, y)$ から引き算すれば、ディスク表面における潤滑膜の厚さ $h_0(x, y)$ を得ることができる。すなわち、位相シフト法によって求めた位相画像は潤滑膜の厚さに対応するため、潤滑膜の流動現象を三次元的に直接観測することができる。しかし厳密には、4章で述べるように、透明な潤滑膜においては、多光束干涉現象が生起しており、真の膜厚 $h_t(x, y)$ を求めるために、観測される見かけの膜厚 $h_0(x, y)$ を厳密な多光束干涉の式を用いて較正する必要がある⁽⁸⁾。

3. 測定装置と試料

3・1 実験装置 実験に使用した測定装置の構成

を図2に示す。基本的な構成は前報⁸⁾と同じであるので、ここでは要点のみを説明する。物体面と参照面(全反射ミラー)に平行光を照射し、反射光はハーフミラーにより合成され、顕微鏡によって5倍に拡大された後に、CCDカメラと一次元位置検出素子(position sensitive detector: PSD)上に干渉縞パターンを形成する。CCDカメラによる撮影時間は画像一枚あたり1/30 sである。この測定装置の特徴は、作動距離を確保し、かつ空間分解能を向上するために、物体面側と参照面側に特性の等しい二つの対物レンズを配置したリニーク型顕微鏡を採用した点である。ここでは、波長 $\lambda = 600$ nmの光および、開口数 $N.A. = 0.14$ の対物レンズを用いたため、空間分解能は $\lambda/(2 \times N.A.) = 0.6/(2 \times 0.14) = 2$ μm となる。

前報からの改良点は、以降に説明するように低コヒーレンスの白色光源の導入、および外乱に対して頑健な位相シフト制御系の構築である。従来では、干渉光学系の光源として、汎用的なHe-Neレーザを用いていたが、コヒーレント長が長い扱いやすい一方で、光学部品の表面からの反射光や散乱光も干渉を起こすために、干渉ノイズにより測定精度が低下した。そこで、レーザの代わりに低コヒーレンス光源である白色光を採用した。図2に示したように、キセノンランプを内蔵した高輝度光源装置(ウシオ電機社: SX-UI500XQ)からの白色光は、干渉フィルタを用いて、中心波長 $\lambda = 600$ nm、帯域幅 $\Delta\lambda = 10.0$ nmの準単色光(コヒーレント長 $= \lambda/\Delta\lambda^2 = 36$ μm)に変換され、球面平凸レンズ2つを用いて、平行光に変換される。平行度を高めるために、1つ目のレンズの集光点に直径1 mmのアイリス、また2つ目のレンズの後に直径3 mmのアイリスを設置した。低コヒーレンス光源による干渉縞画像ノイズの抑圧効果については、5.1節で詳述する。

図2の全反射ミラー(参照面)を搭載したピエゾア

Fig. 2 Experimental setup

クチュエータ (piezoelectric actuator: PZT) は、参照面を駆動して位相シフトを行うためのものである。しかし、外乱や測定系の熱変形により、干渉縞には微小振動やドリフトが生じ、位相送り誤差の原因となる。位相送り誤差を低減するために、まず干渉縞の位置をPSDにより検出し、その出力をPZTにフィードバックする干渉縞追従制御を用いて、干渉縞をPSDの中心すなわちCCD画面の一定位置に固定することとした。さらに、PSDをモータ駆動精密ステージに搭載し、干渉縞追従制御が動作中に、ステージを微小送りで駆動することによって、高精度な位相シフトを実現した。位相シフトするための時間は、ステージの移動速度と干渉縞の幅に依存する。ここでは、移動速度は0.1 mm/s、干渉縞の幅はおおよそ4.5 mm(顕微鏡により5倍拡大)であるため、位相シフトに要する時間は約45 sとなる。これを前述した画像撮影時間と合わせると45.3 sになり、リアルタイムな三次元測定が可能であることがわかる。この測定装置で用いた干渉縞追従制御系の原型は、前報⁸⁾において既に構築したが、簡易な積層型PZTを用いたため、伸縮とともに彎曲変形が発生して、干渉縞画像の各点に対する位相シフトの不均一性が生じる点、また、比例要素のみから構成した簡易な制御回路を用いたため、干渉縞追従性能が不足である点に問題があった。そこで、本研究では、平行板ばねによる平行駆動を行う超高精度のセンサ内蔵型PZT(PI社: P-753.11C)を新たに導入するとともに、PZT支持機構を外乱に強い高剛性の構造に改良し、さらに積分要素と比例要素を組み合わせたPI補償器を追加して、最適な制御回路を設計した。

3・2 供試ディスクと潤滑剤

供試ディスクとして、特注品である直径2.5インチの透明ディスクを用いた。これは、図3に示すように、ガラス基板の前面に無反射コーティング、背面に厚さ5 nmのDLC膜コーティングを施した構成となっている。4章で述べるように、この透明ディスクを用いれば、多光束干渉に起因した測定感度低下の問題を回避できるため、ナノメートル厚さの潤滑膜を高感度で測定することが可能となる。

潤滑剤としては、直鎖構造分子の末端に水酸基をもつ極性潤滑剤Fomblin PFPE ZdolとZietaol(Solvay Solexis社)の2種類を使用した。Zdolは、各末端に1

Fig. 3 Experimental disk

つの水酸基をもち、分子量は2000 g/molである。Ztetraolは、各末端に2つの水酸基をもち、分子量は2900 g/molである。いずれの潤滑剤もハイドロフルオロエーテル系の溶媒(3M社:HFE-7200)を用いて希釈し、ディップ法により供試ディスクに段差状の潤滑膜を形成した。なお、潤滑膜をDLC膜側(ディスクの背面)のみに塗布するため、DLC膜面が外向きとなるように、2枚のディスクをオーリング(外径65 mm)を介して重ねて、無反射コーティング膜面を密封した。潤滑膜の厚さは、引き上げ速度と希釈度によって変えることができる。ここでは、引き上げ速度を2.0 mm/sに固定して、希釈度により膜厚を調整した。透明ディスクの前面から光を入射し、ディスクの背面(DLC膜側)に形成した潤滑膜からの反射光を利用して測定を行う。

4. 多光束干渉に基づく膜厚の較正

透明ディスクでは、ガラス/DLC膜/潤滑膜/空気のそれぞれの界面における反射光により多光束干渉が生じる。その影響を受けて、観測される膜厚 h_o は真の膜厚 h_i とは一致しないために、両者の関係(較正曲線)を求めておく必要がある。前報⁽⁸⁾で導入した厳密な式を用いて求めた較正曲線を図4に太い実線で示す。参考のため、市販の磁気ディスクの前面に塗布した潤滑膜を計測する場合、すなわち空気/潤滑膜/DLC膜/磁性膜/ガラスから構成した膜構造における多光束干渉の場合についても、較正曲線を求めて図4に重ねて細い実線で示す。この図上で、勾配1の破線は観測値が真値に等しい関係を示す。磁気ディスクの場合には、較正曲線は破線よりもはるかに下回ることから、測定感度が大幅に低下し、薄い潤滑膜の計測には不都合であることがわかる。それに比較して透明ディスクの場合には、感度の低下がわずかであり、ナノメートル厚

Fig. 4 Relationship between actual and observed thicknesses

さの潤滑膜を高感度で測定できることがわかる。

5. 測定精度の向上

5・1 低コヒーレンス光源による干渉ノイズの抑圧

比較のため、まず従来のHe-Neレーザを用いて、潤滑膜を塗布していない透明ディスクの背面において形成した干渉縞画像を図5(a)に示す。光学部品や光学部品に付着した微小な塵埃による反射・散乱光に起因する干渉ノイズが含まれており、画像品質は良好ではないことがわかる。一方、低コヒーレンス光源によって形成した干渉縞画像を図5(b)に示す。干渉ノイズが効果

Fig. 5 Interferograms formed by different light sources

Fig. 6 Intensity distributions obtained by different light sources

的に抑圧され、画像品質が向上したことがわかる。また、図 6(a), (b)はそれぞれ、図 5(a), (b)に破線で示した干渉縞画像の中央部分の走査線に沿った光強度分布である。低コヒーレンス光源を使用することによって、干渉縞強度分布の乱れが抑圧されて、SN 比が従来の 4.30 から 44.5 まで飛躍的に向上した。なお、SN 比の計算では、信号の大きさとしては、正弦波で近似した曲線の振幅を、ノイズの大きさとしては、この近似曲線からのずれの標準偏差を用いた。

5・2 干渉縞追従制御系による位相シフト精度の向上 位相シフトの再現性を確認するために、潤滑膜を塗布していない透明ディスクを用いて、干渉縞追従制御系が動作中に、まず干渉縞を一周期分駆動するための PSD の移動量(おおよそ縞間隔の 5 倍)を同定し、つぎに同定した移動量分だけ PSD を 16 回繰り返して駆

Fig. 7 Accuracy of phase shift

Fig. 8 Distributions of 10-nm-thick step-shaped Zdol film obtained with previous phase-shifting system

動し、16 枚の干渉縞画像を採取した。各干渉縞画像における干渉縞の尾根線を抽出して直線近似を行い⁽⁸⁾、直線近似した 16 本の尾根線を用いて算出した平均尾根線からのずれを図 5 に示した y 方向にわたって平均した。なお、この値は CCD 画面上における干渉縞位置のずれを意味し、縞間隔に依存する。そこで、縞間隔に対応する PZT 伸縮量が $\lambda/2$ (≈ 300 nm) であることに基いて、画面上の干渉縞位置のずれを PZT 伸縮量の誤差に換算し、位相シフト誤差として図 7 に示す。この図により、300 nm の PZT 伸縮量に対して、誤差(標準偏差)がわずか 0.3 nm であり、高精度の位相シフトが実現できたことがわかる。

さらに、位相シフトの精度向上の効果を確認するために、位相シフト系を改良する前後において、DLC 表面に形成した厚さ 10 nm の段差状 Zdol 潤滑膜の厚さ分布を測定した。それぞれの結果を比較して図 8 と 9 に示す。なお、図(a)は三次元分布で、図(b)は位相シフト方向(x 方向)から見た二次元投影分布である。従来の位相シフト系を用いた図 8 の場合には、膜が均一に塗布されていたにもかかわらず、位相シフト誤差があったため、位相シフト方向においては、擬似的な変動⁽¹⁰⁾が生じた。一方、改良位相シフト系を用いた図 9 の場合には、位相シフト方向における擬似的な変動が除去され、これにより三次元測定の精度が向上したことが確認できた。

5・3 画像引き算処理法によるノイズの除去 図 9 の基板領域 ($y < 0.6$ mm) には、潤滑膜が存在していないにも関わらず、0.87 nm の膜厚のばらつきが観測さ

Fig. 9 Distributions of 10-nm-thick step-shaped Zdol film obtained with improved phase-shifting system

Fig. 10 Distribution of 10-nm-thick step-shaped PFPE Zdol film after applying the image subtraction method

(a) In three dimensions

(b) In two dimensions

Fig. 11 Distribution of 3-nm-thick step-shaped Zdol film on DLC surface

れている。これは、ディスク表面を完全な平滑平面に近似したため、ディスク表面上に存在するうねりや面粗さが膜厚として現れたもの、また光学部品の精度や光学系の調整精度に限界があるため、干渉縞の歪みや階調のムラによるシステムノイズが膜厚として現れたものと考えられる。後者も、画面に固定されているために前者と等価である。そこで、ディスクやシステムノイズの影響を除去するために、潤滑膜を塗布していない状態において、三次元画像を事前に測定しておき、潤滑膜を塗布した状態において測定した三次元画像から、事前に測定した膜なし状態の画像を引き算処理する方法を導入した。引き算処理後の結果を図 10 に示す。

(a) In a wide range

(b) Expansion of region A indicated in (a)

(c) Expansion of region B indicated in (a)

Fig. 12 Distribution of 15-nm-thick step-shaped Ztetraol film on DLC surface

潤滑膜が存在しない領域 ($y < 0.6$ mm) における膜厚のばらつきが 0.14 nm まで大幅に減少し、引き算処理法が有効であることがわかる。

6. ナノ潤滑膜の厚さ分布の三次元計測

DLC 表面に厚さ 3 nm の段差状 Zdol 膜を塗布して、50 min 経過時に本計測法を用いて膜厚分布を測定した結果を図 11(a) に示す。この三次元画像により、段差境界に平行な方向 (x 方向) において、約 3 nm の潤滑膜が均一に分布していることがわかる。本計測法の精度を定量的に評価するために、三次元画像から二次元流動プロフィールを抽出して、それを厚さ分解能が 0.1 nm であるエリプソメータ (ファイブラボ社: MARY-102) を用いた測定結果と比較した。その結果を図 11(b) に示す。両者のずれの標準偏差がわずかに 0.14 nm であり、本計測法の精度が sub-nm レベルに達していることが確認できた。

さらに、DLC表面上に形成した厚さ 15 nm の Ztetraol 潤滑膜を対象として、膜形成後 15 min 経過時に膜の表面分布を測定した結果を図 12(a)に示す。潤滑膜表面を詳細に見るために、図 12(a)中の領域 A (100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$) を拡大して図 12(b)に示す。潤滑膜が均一に分布せず、表面に約 20 μm 間隔の微小な滴が観測される。また、参考のために、ディスク表面についても、図 12(a)中の領域 B (100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$) を同様に拡大して図 12(c)に示す。潤滑膜表面に比較して、粗さ形状がランダムであり、かつ平滑性が高いことがわかる。このため、潤滑膜表面における微小な滴はディスクの表面粗さや測定誤差ではなく、ディウエットイング (dewetting) 現象⁽¹¹⁾によって生成されたものと判断される。なお、エリブソメータの場合には、ディスク面上の 30 $\mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ の楕円状照射スポット内における膜厚の平均値を測定するため、ミクロンサイズのディウエットイング現象の測定が不可能であった。

7. まとめ

固体表面におけるナノ潤滑膜の分布を直接可視化するために、マイケルソン顕微干渉法に位相シフト法を適用することによって干涉縞画像を位相画像に変換し、潤滑膜の表面形状を三次元画像として測定する方法を開発した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) レーザの代わりに低コヒーレンスの白色光を光源として採用することによって、光学部品の表面からの反射光や散乱光に起因する干涉ノイズを効果的に抑圧して、干涉縞画像の SN 比を飛躍的に向上させた。

(2) 超高精度の PZT を導入するとともに、PZT 支持機構を高剛性の構造に改良し、さらに干涉縞追従制御系に PI 補償器を追加することにより、外乱に頑健な位相シフト系を構築し、高精度の位相シフトを実現した。

(3) ディスク表面上に存在するうねりや面粗さ、および光学部品の精度や光学系調整精度の限界に起因するシステムノイズを事前に同定しておき、これを観測画像から引き算する方法を導入することにより、測定精度を大幅に向上した。

(4) DLC 表面におけるナノメートル厚さの PFPE 潤滑膜の分布を実測して、sub-nm の厚さ精度と数 μm の高

空間分解能でリアルタイムかつ三次元的な測定が可能であることを確認した。

謝 辞

干涉縞追従制御系について助言をいただいた富士通研究所河辺享之氏に謝意を表します。本研究は、一部を独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 18 年度産業技術研究助成事業、および情報ストレージ研究推進機構 (Storage Research Consortium: SRC) の助成金を利用して実施された。

文 献

- (1) Mate, C. M. et al., Will the Numbers Add Up for Sub-7-nm Magnetic Spacings? Future Metrology Issues for Disk Drive Lubricants, Overcoats, and Topographies, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41 (2005), pp. 626-631.
- (2) Novotny, V. J., Migration of Liquid Polymers on Solid Surfaces, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 92 (1990), pp. 3189-3196.
- (3) Ma, X. et al., Spreading of Perfluoropolyalkylether Films on Amorphous Carbon Surfaces, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 110 (1999), pp. 3129-3137.
- (4) Azzam, R. M. A. and Bashara, N. M., *Ellipsometry and Polarized Light*, (1987), Elsevier Science Publishers B. V., The Netherlands.
- (5) Novotny, V. J. and Baldwinson, M. A., Lubricant Dynamics in Sliding and Flying, *Journal of Applied Physics*, Vol. 10 (1991), pp. 5647-5652.
- (6) Hoshino, M. and Kimachi, Y., XPS Measurement of Lubricant Layer Thickness on Magnetic Recording Disk, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, Vol. 81 (1996), pp. 79-85.
- (7) Meeks, S. W. et al., Optical Surface Analysis of the Head-Disk-Interface of Thin Film Disks, *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, Vol. 117 (1995), pp. 112-118.
- (8) Mitsuya, Y. et al., Two-Dimensional Measurement of Lubricant Spreading on Magnetic Disk Surface using Image Processing on Fringe Patterns Formed by Michelson Interferometry, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 66 (2000), pp. 3655-3663.
- (9) Malacara, D. et al., *Interferogram Analysis for Optical Testing*, (1998), pp. 247-283, Marcel Dekker.
- (10) de Groot, P. J., Vibration in Phase-Shifting Interferometry, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 12 (1995), pp. 354-365.
- (11) Kim, H. I. et al., How Disjoining Pressure Drives the Dewetting of a Polymer Film on a Silicon Surface, *Physical Review Letters*, Vol. 82 (1999), pp. 3496-3499.