

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560419

研究課題名（和文）正弦波状波長走査光干渉法によるナノオーダー精度での3次元膜形状計測

研究課題名（英文）Sinusoidal wavelength-scanning interferometry for measurement of thickness and surface profiles of thin films

研究代表者

氏 名：佐々木 修己 (SASAKI OSAMI)

所 属：新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：90018911

研究成果の概要： 厚さ 0.001mm 程度の非常に薄い膜の 3 次元形状を測定することは、微細構造をもつ電子デバイスの製造において重要なことあるが、容易に測定する方法がなかった。そこで、本研究では、光の波長が時間的に正弦波状に変化するレーザ光源を構築し、この波長走査光源を用いた干渉計で得られる干渉信号をコンピュータ内に取り込み、複雑な反復的演算処理を行うことによって、0.000001mm（ナノメートル）の正確さで膜形状を 3 次元的に測定することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総 計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：光応用計測

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：光干渉、光波長走査、形状計測、信号推定

1. 研究開始当初の背景

電子光情報機器で使用される高機能デバイスの開発・生産では薄膜形成技術が重要となっており、3次元膜形状計測の高精度化、高速化が求められている。例えば、FPD(Flat Panel Display)のガラス基板上の配向膜や透明導電膜、半導体ウエハ上のレジスト膜やSiO₂膜があげられる。これらの膜厚を光学的に測定する機器は多く市販されているが、多くは1点の測定であり、また膜の表面および裏面の形状は測定できない。そこで、本研究

において、新規なレーザ干渉法を用いて、膜の表面および裏面の形状および膜厚分布を数 nm の精度で3次元測定する装置を開発した。

2. 研究の目的

厚さミクロン程度の薄い膜の3次元形状を測定するためには、(A)光波長以上の光路差を数 nm の精度で測定できること、(B)表面および裏面の2つの反射面からの干渉信号

を分離できること、この2つの特性を有する干渉法が必要であり、現在白色干渉法と波長走査干渉法がある。

白色干渉法による測定装置は既に市販されているが、圧電素子により機械的に光路差を走査する必要があるため、特性(A)に関する測定精度はその機械的な走査精度に依存する欠点がある。

一方、本研究では波長走査干渉法に注目するが、通常の方法では波長 λ を直線的に走査する。この場合、干渉信号の位相 ϕ は光路差 L に比例した傾きで直線的に変化し、光路差 L に比例した周波数の正弦波信号が干渉信号に生じる。この干渉信号の周波数を解析することから光路差を求める。しかし、検出される干渉信号のデータ長 T は波長走査幅と走査速度で決定されるため、データ長 T はある制限された値になる。また、干渉信号のデータ長 T は必ずしも干渉信号に含まれている正弦波の周期の整数倍でないため、上記の特性(A)を満たすことは困難である。特性(B)については同様な理由により、波長走査幅が数20nm程度の場合に識別できる反射面間の距離は数100 μm 程度である。

そこで、本研究では、独創的な波長走査方法として正弦波状に走査する。まず正弦波状波長走査される光源を構築する。そして、この光源を用いたレーザ干渉計を構成し、そこで得られる干渉信号を効果的な信号処理方法を用いて演算処理することによって、数nmの精度で薄膜の3次元形状を測定することを実現する。

3. 研究の方法

(1) 光波長 λ を $b\cos\omega_0 t$ と正弦波状に走査する。この場合は、干渉信号の位相 ϕ は通常の干渉計で得られる位相 α と、波長走査によって得られる位相項 $Z_0\cos\omega_0 t$ とに明確に分けられる。位相 α からは光路差 L の波長以下の部分の細かい値 L_α が数nmの精度で求まる。変調振幅 Z_0 からは光路差 L のおおまかな値 L_Z が求まり、 L_Z の測定誤差が半波長以下であれば、 L_Z と L_α から、光路差 L が波長の何倍であるかを定めることができる。変調振幅 Z_0 の測定は、位相 ϕ に含まれている $\omega_0/2\pi$ の周波数成分の振幅測定となるため、位相 ϕ に雑音が存在する場合でも、精度良く L_Z が得られる。更に、正弦波状波長走査は正弦波状の繰り返し走査であるので、波長走査時間 T すなわち干渉信号のデータ長 T を制限するものはない。このことより、干渉信号に含まれている雑音を除去するために必要とされる十分に長いデータ長 T とすることができる。以上の特性を有する正弦波状波長走査を効果的に活用する方法を検討して行く。

(2) 膜のように2つの反射面を持つ物体

では、多重反射光が生じ、光路差の異なる物体光がいくつか存在する。そこで、2つの反射面を有する測定物体において多重反射する物体光の強度について検討し、2つの物体光が存在した場合の正弦波状波長走査干渉法の干渉信号の理論式を明らかにする。

(3) 2重正弦波位相変調干渉法を用いれば参照光に位相変調を加えることにより、参照光との干渉により生じる信号のみを取り出すことができる。しかしながら、2つの干渉信号が重なっているため、従来の二重正弦波位相変調法では光路差を求めることができない。そこで、正弦波状波長走査干渉法の干渉信号の周波数成分は周波数 $\omega_0/2\pi$ の高調波成分から成り立っていることを利用して、検出された干渉信号を理論値に正しくフィッティングすることから、2つの反射面について、それぞれ位相 α 、変調振幅 Z_0 を求める方法を検討する。すなわち、理論式より得られた信号と検出信号の差の二乗和を誤差関数とし、この誤差関数を最小化することにより位相 α 、変調振幅 Z_0 を求める方法を明らかにする。

(4) 信号推定処理法での誤差関数に含まれる関数は三角関数などの周期的な関数であるため、多数の局所的最小値が存在する。正しい推定解を短時間で得るためには、初期値の設定が重要となるので、この初期値の設定する方法を明らかにする。

(5) 以上(2)から(4)の結果に基づき、以下の測定対象に必要な正弦波状波長走査光源を構築し、そして干渉計を構成し測定を行う。最初に、厚さ約20 μm のシリコンガラス膜、次に厚さ数 μm の酸化シリコン薄膜、最後0.5 μm 程度の窒化クロム薄膜である。

4. 研究成果

(1) 干渉信号推定処理法による測定

正弦波波長走査と正弦波位相変調を行った場合に、2つの反射面をもつ測定物体からの干渉信号を周波数解析することによって得られる推定すべき干渉信号すなわち推定干渉信号の理論式を導いた。検出された推定干渉信号と推定干渉信号の理論式との差の二乗和を誤差関数とし、この誤差関数を最小にすることによって2つの反射面の位置に対応する2つの光路差を求めることができることを確認した。すなわち、推定すべき変数としては、光路差に比例する波長走査から生じる変調振幅位相、干渉位相、そして複数の干渉信号の振幅比であり、これらの変数を推定することによって、2つの反射面の位置をナノメートルの精度で測定できる。

(2) 初期値の決定方法

干渉信号推定処理法においては、誤差関数

を最小化する際に多数の局所的極小値が存在することを数値シミュレーション解析によって確認した。そのため、初期値が重要であり、正しい推定解を得るために必要とされる初期値と真値の差の許容できる最小値を求めた。その結果、変調振幅位相は 2rad 、干渉位相は 1.5rad 、そして複数の干渉信号の振幅比は 50% であった。これらの条件が1つでも満たされない場合には、正しい推定解が得られるとは限らない。このため、より確実に初期値を求める方法を明らかにした。

(3) 外部共振型半導体レーザーによる波長走査光源 (波長走査幅 20nm)

AR コート付きの半導体レーザー、回折格子、スキャナーミラーを用いて外部共振を構成し、スキャナーミラーを正弦波状に振動させることによって波長走査幅 20nm 程度の波長走査光源を構成した。

(4) シリコンガラス膜 (厚さ $20\mu\text{m}$) の形状測定

上記(3)の光源を用いて、シリコンガラス膜 (厚さ $20\mu\text{m}$) の形状測定を行った。測定物体からの多重反射光は1次、2次の反射光だけを考慮すれば良いことが分かり、干渉信号推定処理の初期値の設定方法を明らかにした。厚さ約 $20\mu\text{m}$ のシリコンガラス板を繰り返し測定誤差 10nm 程度で測定することができた。

(5) SLDとAOTFによる波長走査光源 (波長走査幅 40nm)

光源として 50nm の広い発振スペクトル幅を有するスーパーミネッセントダイオード (SLD) を使い、SLDの発振スペクトルの一部を音響光学波長可変フィルタ (AOTF) で取り出し、正弦波状波長走査を行う。この波長走査を正確に行うためのAOTFへの印加電圧の波形の生成方法について明らかにした。

(6) 干渉信号の近似式による誤差の影響

上記(4)の測定においては波長走査振幅が 20nm 程度であり、この場合に用いた干渉信号の理論式は、波長走査振幅が発振波長に比べて十分に小さい条件の下で導いた近似式となっていた。しかし、上記(5)のように波長走査振幅が 40nm 程度以上になると、この近似式による測定誤差が生じることが明らかになった。このため、近似を緩やかにした新しい干渉信号の理論式を導き、今後この理論式を用いた。

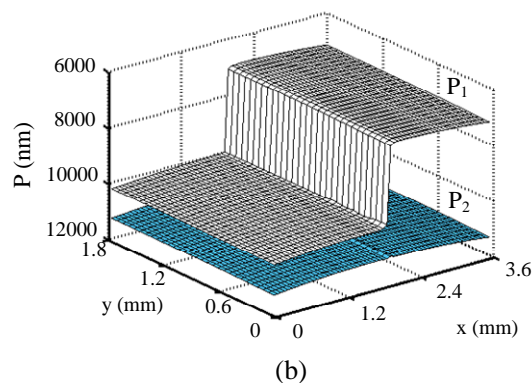
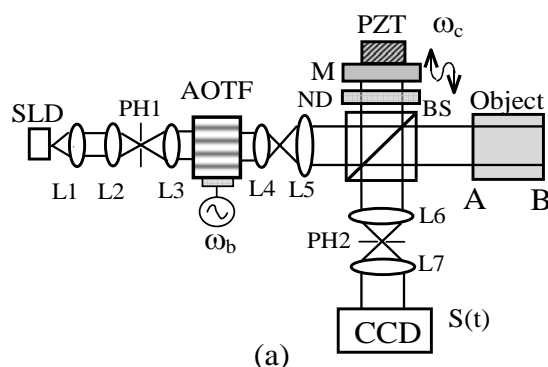
(7) 直線状波長走査干渉法による初期値の設定

多重反射光による複数の干渉信号の振幅

比の初期値は、干渉信号推定処理において重要な値であるが、測定物の正確な屈折率は未知であるためこれらの振幅比を求めることが困難になった。そこで、直線状波長走査干渉法を用いれば、複数の干渉信号の振幅比の初期値が求められることが明らかになった。また同時に変調振幅位相の初期値も求められた。

(8) 酸化シリコン薄膜 (厚さマイクロンオーダー) の形状測定

シリコンウェハ上にコーティングされた厚さ $1\mu\text{m}$ と $4\mu\text{m}$ の SiO_2 膜を測定対象とした。上記(5)、(6)、(7)に基づいて、干渉計を下図(a)のように構成した。測定結果は下図(b)のようになり、2つの反射面である表面A、裏面Bのそれぞれの位置 P_1 、 P_2 が求められた。厚さの薄い領域では平均膜厚 1062nm 、厚い領域では 4109nm の膜厚であり、繰り返し誤差は 3nm 以下となった。

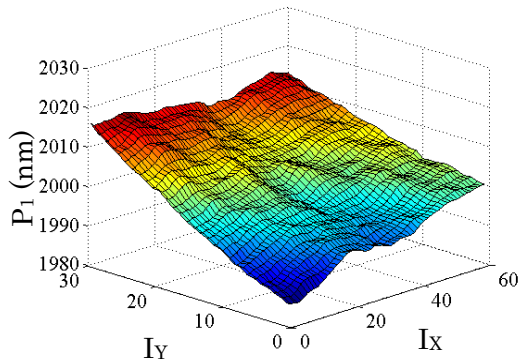


(9) ハロゲンランプとAOTFによる波長走査光源 (波長走査幅 240nm)

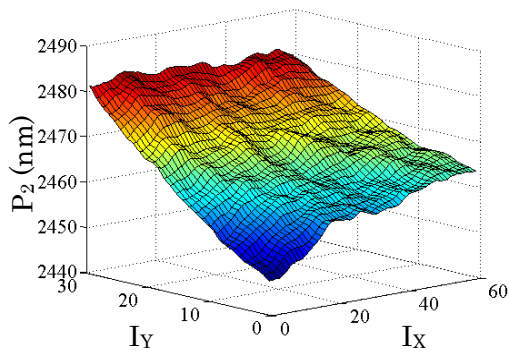
厚さ 500nm 程度の薄膜の形状測定を行うために、ハロゲンランプと音響光学波長可変フィルタ (AOTF) を用いた。波長走査幅の最大値が 240nm 程度の波長走査光源を構成した。

(10) 窒化クロム薄膜（厚さ 100 ナノオーダー）の形状測定

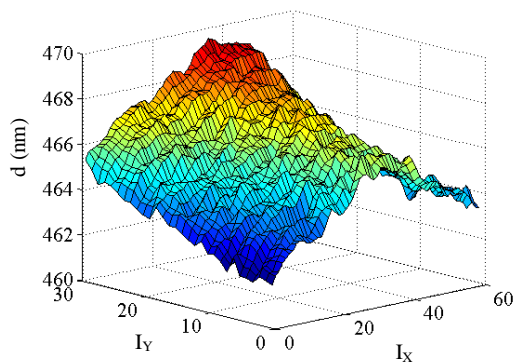
上記(9)の波長走査光源を用い、上記(6)、(7)の成果に基づいて、正弦波状波長走査幅 210nm のもとで、Cr 上にコーティングされ



(a)



(b)



(c)

た厚さ約 $470\mu\text{m}$ と $350\mu\text{m}$ の SiN 薄膜の形状を数 nm の繰り返し精度で求めることができた。厚さ約 $470\mu\text{m}$ の測定結果を上図に示す。測定領域は物体上で $3.56\text{mm}\times 1.78\text{mm}$ であった。表面と裏面のそれぞれの位置 P_1 、 P_2 が図(a)、(b)であり、膜厚分布 d が図(c)である。

(11) インプロセス計測をめざしての今後の展望

生産現場でインプロセス計測に使用できるように、機械的な振動の影響を減少させる機能を付加する。すなわち、時間的に変化する干渉信号の位相 α を検出する。この時間変動を打ち消すように干渉計の光路差をフィードバック制御することによって、機械的な振動の影響を減少させる。その他インプロセス計測に必要な機能の付加を検討する。生産工程での膜形状インプロセス計測への適用として、本計測装置を半導体ウエハ上の SiO_2 膜、あるいは各種フィルム膜などを形成する膜形成加工装置に組み込み、実際の生産現場におけるインプロセス計測に対する本計測装置の特性を明らかにする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① O. Sasaki, "Sinusoidal wavelength-scanning interferometers for shape measurements," Photonics Asia 2007, Advanced Materials and Devices for Sensing and Imaging III, Shanghai China, Proc. SPIE 6829, 682908 (2007).
- ② O. Sasaki, Hirot Ashitate, and T. Suzuki, "Wavelength-scanning interferometry using backpropagation of optical fields for shape measurement of thin plate," IC021, Optical Instruments, Australia, Congress, 284 (2008).
- ③ 上野 浩、佐々木修己、鈴木孝昌: 「白色光源による正弦波状波長走査干渉計を用いた薄膜形状計測」、OPTICS & PHOTONICS JAPAN 2008、講演予稿集, pp. 464-465 (2008).

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
佐々木 修己 (SASAKI OSAMI)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 90018911
- (2) 研究分担者
鈴木 孝昌 (SUZUKI TAKAMASA)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 40206496