

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007 年 ～ 2009 年

課題番号：19360062

研究課題名（和文）分光ミューラー行列偏光計によるナノ形状計測

研究課題名（英文）Nano-profilometry by spectroscopic Mueller matrix polarimeter

研究代表者

大谷 幸利（OTANI YUKITOSHI）

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号：10233165

研究成果の概要（和文）： 分光ミューラー行列偏光計によるナノ形状計測法を提案した。一般に光は回折限界があるため波長以下の空間的な形状計測は困難である。ここではナノ形状による偏光状態の変化を検出することで波長以下の形状計測を可能とした。偏光情報の波長特性を高精度に実時間でかつその場評価法の確立とナノ構造を偏光計測結果と RCWA の数値解析と比較することによって従来にない光による超高精度なナノメートルオーダーの形状計測システムの開発した。

研究成果の概要（英文）： A spectroscopic Mueller matrix polarimeter which is based on a scatterometry technique is proposed to evaluate the surface profiles of nanostructures. In general, it is difficult to image surface profile structures that are smaller than the wavelength. The surface profiles of nanostructures can be measured by detecting polarization properties based on Mueller matrices. A nanostructure profile is determined from the Mueller matrix which expresses all the polarization properties of the sample by experimental measurements and calculated values using rigorous coupled-wave analysis (RCWA).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2008 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超精密計測，ナノ形状，偏光解析，ミューラー行列

1. 研究開始当初の背景

精密加工技術の向上に呼応してナノメートルオーダーの三次元加工が行われるようになってきた。ここでの主たる計測技術は、原

子間力顕微鏡（AFM）であり、ナノメートルオーダーの分解能を持つが、計測領域が数百 μm と狭いこと、1 点ごとに計測を行うために計測時間を要するという問題点である。こ

の計測法に対して古くから試みられている光学的手法を用いた計測法は回折による限界があり、特に、空間分解能を波長以下に向上させることは困難であった。

このような中で、半導体製造分野においてナノ構造を捉えるために、入射光や反射光に偏光変調を与えて分光検出するレフレクトメトリやエリプソメトリを用いたスカトロメトリが提案されている。これはレーザや白色光を用いてサンプルのナノ構造を捉えることができるという画期的な手法であるが、2次元断面内にある1次元の周期構造のみに解析可能であった。つまり、加工計測のように任意のナノ3次元形状の計測には適用が不可能である。

我々は、すべての偏光状態を標記できるミューラー行列に注目した。特に、偏光解消に着目したスカトロメトリは世界中で取り組んでいる研究グループはまったく見当たらなかった。そこで我々は、ナノ構造からの反射散乱光の偏光状態をミューラーマトリクスから実時間で計測法を開発することは、十分意義があることであるだけでなく、計測分野の発展に寄与できると考え本研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

分光ミューラー行列偏光計によるナノ形状計測を目的とした。一般的に光は回折限界があるため波長以下の空間的な形状計測は困難である。特に、波長以下の構造になると高次の回折光が発生しない。しかしながら、ナノ形状による生じる散乱光の偏光状態が変化することが知られている。そこで、我々は、偏光情報、具体的に、複屈折、旋光、二色性、円二色性、偏光解消の波長特性を高精度に実時間でかつその場評価を可能とする分光ミューラー行列偏光計を新規に構築する。さらにこの反射光の偏光状態から実験的に得た偏光情報と、ナノ構造によって生じる反射散乱光を厳密結合波解析 (RCWA) または時間領域差分法 (FDTD) によって数値解析を行うことによって偏光形状計測の指標を求めることを試みた。さらに、偏光特性の波長依存性、つまり複屈折分散と偏光解消を計測することにより、従来にない光による超高精度なナノメートルオーダーの形状計測システムの開発を目指した。

3. 研究の方法

図1に示すようにサンプルのナノ構造を捉えるために、入射光や反射光に偏光変調を与えて分光ミューラー行列を計測する。このためまず、ライン型分光ミューラー行列偏光計を構築した。これは図2に示すような二重位相子回転型による反射型ミューラー行列偏光計である。ここでは偏光情報、つまり、複屈折、

旋光、二色性、円二色性、偏光解消の波長特性を高精度に実時間でかつその場評価を可能とするためライン型(1軸)分光器を検出器として導入した。これはグリズムと言われる回折格子を2つのプリズムの間に挟み込むことで線形的に分光情報を得る。また、入射光をスリットに通すことで、スリット方向にx軸空間座標、y方向は波長情報となる。これを高解像度のCCDカメラによって検出することでライン型分光器となる。

サンプルによって生じる反射散乱光からサンプルの分光ミューラー行列を計測すると同時に、このナノ構造によって生じる反射散乱光を厳密結合波解析 (RCWA) または時間領域差分法 (FDTD) によって数値解析を行うことによって、両者のマッチングからナノ形状を求めるものである。

ここでは、さらにサンプルによる偏光計測の指標を求めることも重要なテーマとした。以上をもとに、偏光特性の波長依存性、つまり複屈折分散と偏光解消を計測することにより、従来にない光による超高精度なナノメートルオーダーの形状計測システムの開発した。

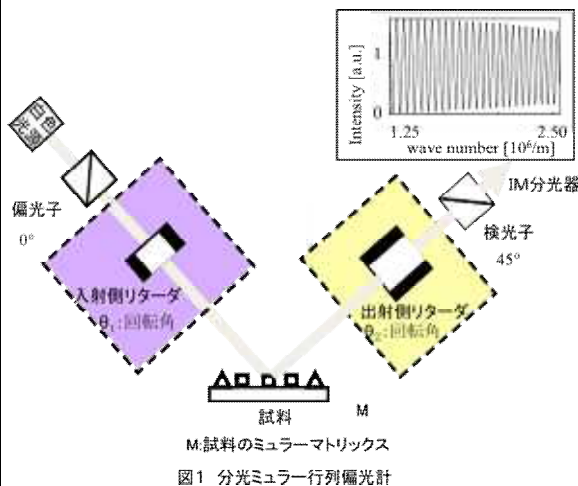


図1 分光ミューラー行列偏光計

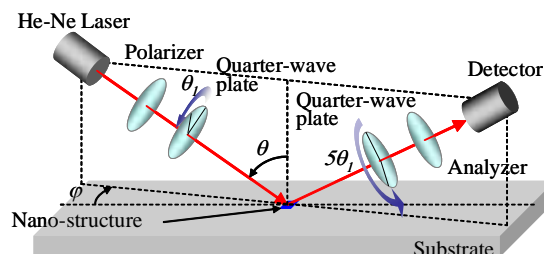


図2 二重位相子回転型ミューラー行列偏光計

4. 研究成果

図3に研究で構築した3次元ナノ構造計測のためにライン型分光ミューラー行列偏光計システムを示す。サンプルは回転と2軸のテイルト補正が可能なステージに設置される。

ミューラー行列偏光計は入射側と出射側のアームに取り付けられ、これらはモータによって入射角を調整することができる。サンプルのもつ傾きは計測精度に大きく影響するため、サンプル丈夫に取り付けられた変位系によって傾き補正される。白色光源にはハロゲンランプを用いて光ファイバーによって計測系に導かれる。入射側は光ファイバーからの光をコリメートするためのレンズ系とグラントムソンプリズムによる偏光子、水晶製の位相子（四分の一波長板）がおのの電動回転ステージに取り付けられている。出射側も順に、位相子、検光子およびライン型分光器が設置されている。これらはすべて外部からコンピュータによって自動制御されている。また、計測システムの初期キャリブレーションをするためにアームは水平に並べることができる。これによってサンプルの内状態（つまり空気）でミューラー行列（結果として対角行列になる）を求め、位相子の方位ズレおよび位相誤差の波長ごとの補正を可能としている。

計測結果は入射角、サンプルの X 軸方向の位置データ、ミューラー行列の 15 要素の波長依存性という膨大なデータを処理することになる。ミューラー行列からデコンポジションのアルゴリズムにより偏光情報、つまり、複屈折、旋光、二色性、円二色性、偏光解消特性を分離することができる。

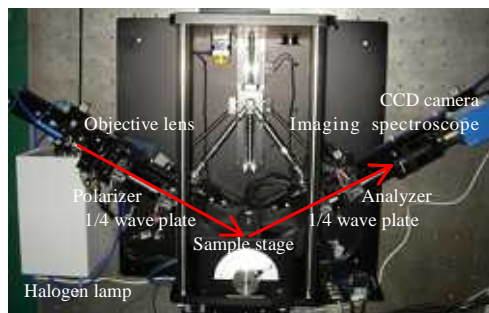
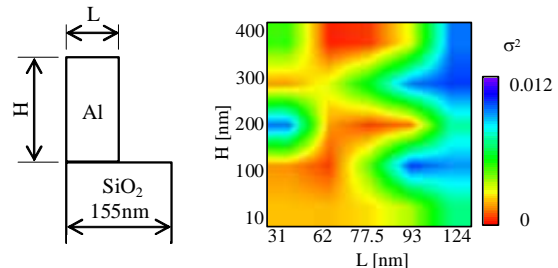


図3 分光ミューラー行列偏光計システム

実際に実験した結果を図4に示す。図4(a)はワイヤーグリッド偏光子表面の微細周期構造をライブラリ法によって形状推定した結果である。アルミワイヤ部を矩形状の形状と仮定し、横の長さをL、高さをHとして、周期は155nmとしてRCWAにて計算した。2つの形状パラメータLとHとして変化させた。Lは設計値77.5nmを基準として、31nm、62nm、93nm、124nmとし、Hは設計値200nmを基準として、10nm、100nm、300nm、400nmの値とし、これらの組み合わせた合計25個のそれぞれ形状の異なる解析モデルを作成した。解析条件は、波長480nmから680nm、入射角60°、

入射方位を0°で回折光の次数を±10次まで考慮して計算した。実際に、25個の解析モデルのミューラー行列計測結果の実測値について、標本分散の値を用いて評価した。²は0を示す赤から、最大値0.012の青となった。この標本分散がもっとも小さい値となるとき、その解析モデルの形状パラメータから形状を推定した。比較結果を図4(b)に示す。数値解析値と比較した結果、ワイヤーグリッド偏光子の形状をH=400nm、L=62nmと評価できた。



(a) Profile parameters (b) Result of standard deviation of wire-grid polarizer

図4 ワイヤーグリッド偏光子の形状計測結果

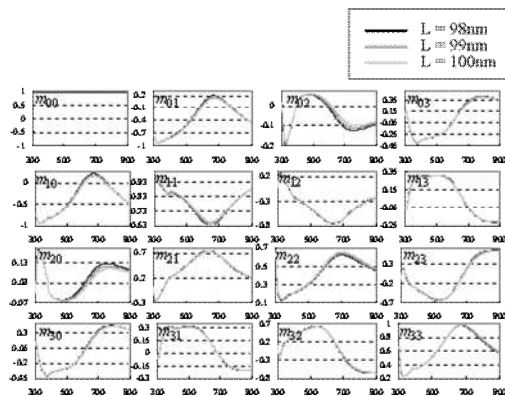


図5 SiO₂基板上的CrとCr₂O₃の1200nm周期構造のミューラー行列計測結果

最後にこの計測システムの分解能を見積もるためSiO₂基板上的1200nmのCrとCr₂O₃の周期構造をミューラー行列計測した。図5にRCWAを用いて求めたミューラー行列を示す。図中のm₀₀~m₃₃までの16個の要素がミューラー行列の要素であり、横軸は波長300~900nm縦軸がミューラー行列の要素の値±1を示す。200nmのSiO₂の周期構造の長さLが98、99、100nmの3つのモデルを作成し、長さLが1nmずつ変化した際に入射角60°、入射方位-45°のときの結果を示す。構造の変化に対して600~700nm付近で要素の変化が大きい。つまり、1nmの分解能を得るためには、ミューラー行列の要素として0.03必要である。つまり、現状のシステムの精度0.01であるた

め、十分対応可能である。

このように様々な条件での計測、解析により構造とミュラー行列の関係を捉えることは高感度な形状検出に有効であることがわかった。

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)

[雑誌論文](計1件)

Y.Otani, T.Kuwagaito, Y.Mizutani : Surface profile detection with nanostructures using a Mueller matrix polarimeter, Proc.SPIE Vol.7063, pp.70630Y(2008). (査読あり)

[学会発表](計7件)

Y.Otani:(Invited paper)Mueller matrix polarimeter for nano-structure measurement, CLEO/PR 2009, 2009年9月1日 中国・上海.

大谷幸利 : 分光偏光変調による分光偏光・複屈折イメージング, 第56回応用物理学関連連合関係講演会シンポジウム偏光計測の基礎と応用最前線, 2009年3月30日,筑波大学.

Y.Otani, T.Wakayama : Two-dimensional measurement of birefringence dispersion, 2008 SEM Fall Conference Celebrating, the 60th Birthday of Holography, 2008年10月28日, Springfield, MA,USA.

Y M.Chujo, Y.Otani, N.Umeda ; Spectroscopic Mueller matrix polarimeter by two liquid crystal polarization modulator, 米国光学会 Frontiers in Optics, 2008年10月19日 Rochester, USA.

大谷幸利: ミュラー行列による微細周期構造の光学特性の評価, 応用物理学会春季大会, 2008年3月29日, 日本大学理工学部・千葉.

大谷幸利 : ライン型分光ミュラー行列偏光計の開発, 応用物理学会 春季大会, 2008年3月29日, 日本大学理工学部・千葉.

大谷幸利 : ナノ構造評価のためのミュラー行列偏光計, 精密工学会 春季大会 2008年3月18日, 明治大学・神奈川.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.opt.utsunomiya-u.ac.jp/otan>
[i/](http://www.opt.utsunomiya-u.ac.jp/otani/)

6. 研究組織

(1)研究代表者

大谷 幸利 (OTANI YUKITOSHI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号 : 10233165

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

梅田 倫弘 (UMEDA NORIHIRO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

研究者番号 : 60111803

(H19 : 研究分担者)

水谷 康弘 (MIZUTANI YASUHIRO)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・講師

研究者番号 : 40374152

(H19 : 研究分担者)