

トレンチ深さをリアルタイムに モニタする偏光カメラ

Pascal Amary, Denis Cattelan

要旨

マイクロマシニングの分野では、溝(トレンチ)の深さを正確に計測できるリアルタイムモニタが求められている。ジョバンイボン社では、干渉計を応用したエッチングモニタツイン・スポット干渉計に続き、新しくトレンチ深さを正確にリアルタイムにモニタすることができる偏光カメラを開発した。本稿では、測定原理及びエッチングとパッシベーションを繰り返すボッシュ・プロセスでの実装試験結果を紹介する。

1 はじめに

MEMS (Micro ElectroMechanical Systems) は、マイクロマシニングを使って各種のセンサやデバイスを作る技術として、自動車、医療などの分野で急速に成長している。最近のMEMSでは、微細で深い溝(ディープ・トレンチ)加工が必要となり、より正確で斬新な計測・制御技術が求められている。

ドライ・エッチング・プロセスで広く使われている計測技術の一つに「レーザ干渉測定法」がある。扱いやすく非破壊計測が可能なこの計測方法は、トレンチの加工寸法が測定光の波長に近いとき、トレンチのエッチング・プロセスの評価に適している。

最近のMEMSのトレンチは深い(通常100 μm以上)、単純なレーザ干渉計を適用することができない。そこで、干渉しあう2本の光ビームを使った偏光干渉計が開発されたが、それでもなお他の干渉計と同じように、測定光の波長と同程度の深さのトレンチしか測定することができなかった。

アスペクト比(縦/横比)の大きな溝を加工するためには、通常、エッチングとパッシベーションを繰り返す複雑な工程ボッシュ・プロセス(Bosch process)が使われている。最近、このプロセスの処理時間がますます短くなり、各サイクルで加工されるエッチング深さが測定光の波長よりはるかに短くなっている。つまり、各サイクルの測定精度が十分でなければモニタリングが不可能になっている。

ジョバンイボン社(JY)は、この問題を克服するために、トレンチ深さの絶対値計測に基づく新しい計測器を開発した。この計測器は、複雑なデータ処理が不要で、あらゆるプロセスに適用することができる。

2 偏光干渉計

2.1 偏光干渉計で扱う基本式

ツイン・スポット干渉計の光学系を図1に示す。

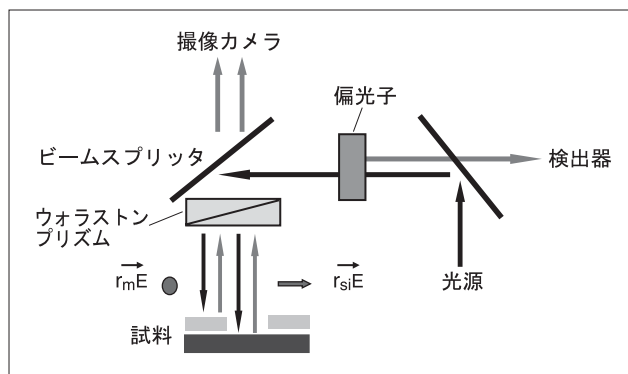


図1 ツイン・スポット干渉計の光学系

レーザ・ダイオードあるいは白色光源から放射された光は、まずグラ・トムソン偏光子(Glan-Thompson polarizer)により直線偏光に変えられる。次にウォラストン・プリズム(Wollaston prism)により2本の直線偏光に分割され、一方は表面1で反射され、もう一方は表面2で反射される。ここで、それぞれの複素反射率を r_1 と r_2 とする。試料によって反射後、2つのビームは、偏光子につながるウォラストン・プリズムにより再び組み合わせられる。

検出器に到達するトータル電磁界 E は式(1)で表される。

$$E = E_0(r_1 \cos P + r_2 \sin Pe^{-i\phi}) \quad \dots\dots(1)$$

ここで $\Phi = 4\pi T_d / \lambda$ はトレンチの深さ T_d によって決まる位相シフトで、 P はウォラストン・プリズムの固有軸に対する偏光子の相対的方位である。複素反射率の比は、エリプソメトリ(偏光解析法)と同様に式(2)のように定義される。

$$\rho = r_1 / r_2 = \tan(\Psi) \exp i \Delta \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで偏光子の相対的方位が 45° と仮定すれば、検出強度は式(3)のようになる。

$$I(t) = E \cdot E^* = E_0^2 r_2^2 (1 + \tan^2 \Psi + \tan \Psi \cdot \cos(\Phi - \Delta)) \quad \dots\dots\dots(3)$$

マスキングされた領域の反射係数 r_1 は、マスク層の厚さと複素光学定数に依存する。マスク層の複素屈折率を N_1 、厚さを d_1 とすると、 $N_1 = n_1 - ik_1$ 、(但し、 n_1 は屈折率、 k_1 は消衰係数)、 $r_1 = f(N_1, \lambda)$ となる。エッチング領域の複素反射係数は、エッチング部の光学的な性質だけに依存する。その結果、 $\tan \Psi$ と Δ はエリプソメトリでモデル化される(N_1, N_2, d_1, λ)の複素関数となる。

2.2 従来のツイン・スポット干渉計

光の強度を連続的に測定する従来のツイン・スポット干渉計(Twin-Spot Interferometer)では、エッチングプロセスにおいて時間的に変化するパラメータは、唯一、位相シフト Φ だけである。 ω をエッチング速度とすると、光強度は、式(4)のように単純な時間の関数として表される。

$$I(t) = a + b \cos(4\pi \omega t / \lambda - \Delta) \quad \dots\dots\dots(4)$$

従って、エッチング速度を求めたりトレンチの深さを正確に決定するためには、出力信号の中から周波数成分 ω を抽出しなければならない。但し、エッチングが非常に高い選択性をもっており、マスク材料が安定で「 Δ が一定であるという」ことが前提条件となる。

2.3 ツイン・スポット偏光計

図2に示すツイン・スポット偏光計(Twin-Spot Polarimeter systems)の光学系は、従来のツイン・スポット干渉計と類似している。

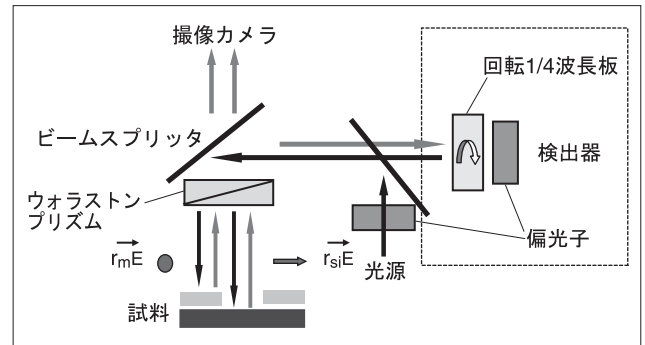


図2 偏光カメラの光学系

主な相違点は、偏光度を周波数 ω_m で変調するデバイスが組み込まれている点である。検出される光強度 $I(t)$ は式(5)のようになる。

$$I(t) = E \cdot E^* = E_0^2 r_2^2 (a + b \sin(\Phi - \Delta) \sin 2\omega_m t + b \cos(\Phi - \Delta) \sin 4\omega_m t + c \cos 4\omega_m t) \quad \dots\dots\dots(5)$$

周波数 ω_m の信号の第2高調波成分と第4高調波成分を検出することにより、式(6)に示す量の直接的な「絶対値測定」が可能になる。

$$\tan(\Phi - \Delta) = H_2 \omega_m / H_4 \omega_m \quad \dots\dots\dots(6)$$

H_2 : 第2高調波のフーリエ係数

H_4 : 第4高調波のフーリエ正弦係数

Φ の時間的変化が ω_m より十分遅いと仮定し、高速でデジタルフーリエ解析すると式(7)が導出される。

$$\Phi = 4\pi \omega t / \lambda = \arctan(H_2 \omega_m / H_4 \omega_m) + \Delta \quad \dots\dots\dots(7)$$

上記と同じような仮定をすると、つまりエッチングプロセスが開始後、ずっと一定に保たれている場合には Δ の値が測定できる。

3 校正及び設定

ツイン・スポット偏光計の校正と設定は、2段階で行われる。第1段階はシステム校正であり、第2段階は2本の光ビームを特定の領域へ設定する操作である。

3.1 校正

2本の光ビーム間の位相シフトを正確に測定するためには、ウォラストン・プリズムに対する偏光子の相対角度や、各種の電子的係数、光学的伝達関数のようなパラメータを決定する必要がある。JYでは偏光に関する研究を積み重ね、正確な校正方法を開発した。

3.2 空間的な位置決め

2本の光ビームの正確な位置決めのために、ウォラストン・プリズムの後に1組の対物レンズを置いている。これらの対物レンズは、2つのビームを試料表面に収束し、反射された光をCCDカメラで撮像する(図3)。このカメラはX-Yステージと連動しており、2本のビームスポットを高い精度で位置決めする。更に、上位機種では、カメラの信号を読み出すためのフレーム・グラバ(frame grabber) と市販のパターン認識用ソフトウェアを利用することもできる。

ビームのスポット・サイズは、チャンバの上部窓と試料間の距離、及び対物レンズの倍率によって変わる。スポット間隔はウォラストン・プリズム角によって変化する。150 μm ないしは560 μm のスポット間隔で、25 μm ないし60 μm のスポット・サイズが達成されている。

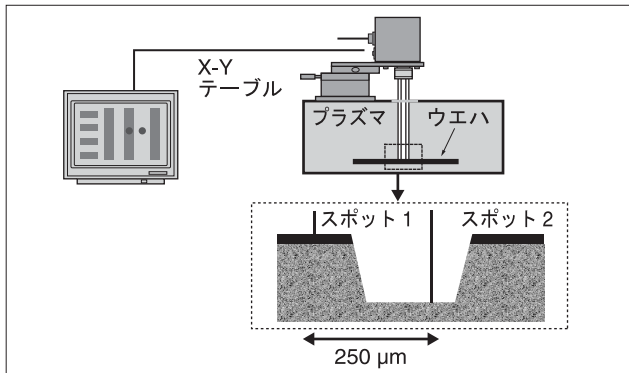


図3 カメラによる測定ビームの位置決め

4 実装試験

4.1 実装試験の概略

ボッシュ・プロセスに続いて、異方性エッチングによりシリコンの深いトレンチを作る誘導結合プラズマで、いくつかの実装試験を行った。ボッシュ・プロセスは、パルス・プラズマを使って、シリコンのエッチングとポリマーのデポジションとを繰り返す工程で、エッチング速度は5 $\mu\text{m}/\text{min}$ で、レジスト層に対する選択率は30:1以上であった。

4.2 ツイン・スポット干渉計を使用する深いトレンチのモニタリング

図4にボッシュ・プロセスを使ってシリコンをエッチングした時の、ツイン・スポット干渉計のリアルタイム出力を示す。プロセスの各段階は明瞭に示されている。

ツイン・スポット干渉計を使ってトレンチの深さを求めるためには、注意深いデータ処理と信号解析が必要である。プロセスが進行している途中に適切なトリガーをかけて信号処理し、データ解析することにより、エッチングの各段階をリアルタイムに識別することが可能となる。

ツイン・スポット干渉計は非常に有効な計測手段ではあるが、パッシベーションとエッチングの時間間隔が十分に長く、干渉縞からエッチング速度が決定できる場合にのみ使用されている。この時間間隔が非常に短くトリガーをかける再現性が悪いと、測定の信頼性が失われることになる。

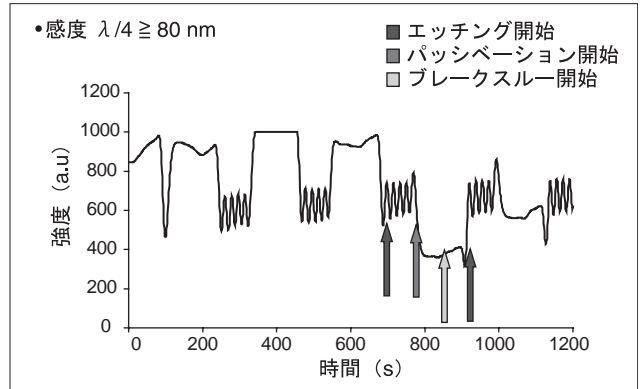


図4 ボッシュ・プロセス実行時のツイン・スポット干渉計の出力信号

4.3 ツイン・スポット偏光計による深いトレンチのモニタリング

フォトレジストとアルミニウムの2種類のマスクを用い、ボッシュ・プロセスを使ってシリコンをエッチングした時の、ツイン・スポット偏光計でリアルタイムに検出したトレンチ深さを、図5(フォトレジスト・マスクを使用)と図6(アルミニウム・マスクを使用)に示す。

この新しい計測方法はトレンチ深さを直接測定できるため、エッチングとパッシベーションとを識別するために特別な信号処理を必要としない。図7と図8に2種類のマスクを使ったボッシュ・プロセスのモニタリングデータを示しているが、エッチングとパッシベーションとが明確に分離しており、本計測方法の感度が高いことがわかる。

このように、ツイン・スポット偏光計は、深いトレンチ、浅いトレンチ共に測定することができ、単層に用いられている位相変調型分光エリプソメータに匹敵する感度を持っている。

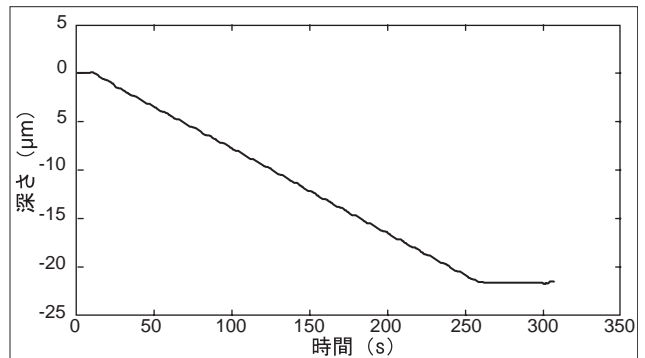


図5 フォトレジスト・マスクを使ってシリコンにトレンチを形成させた時のツイン・スポット偏光計の出力信号

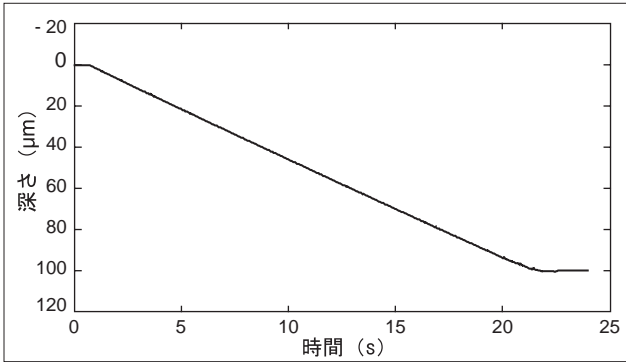


図6 アルミニウム・マスクを使ってシリコンにトレンチを形成させた時のツイン・スポット偏光計の出力信号

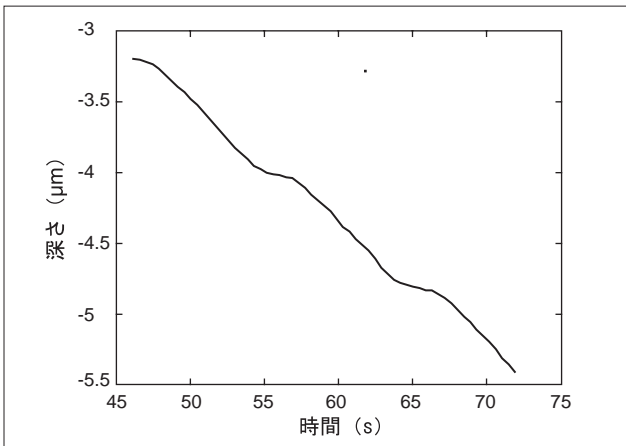


図7 パッシベーション時のツイン・スポット偏光計の出力信号 (フォトリジスト・マスク使用)

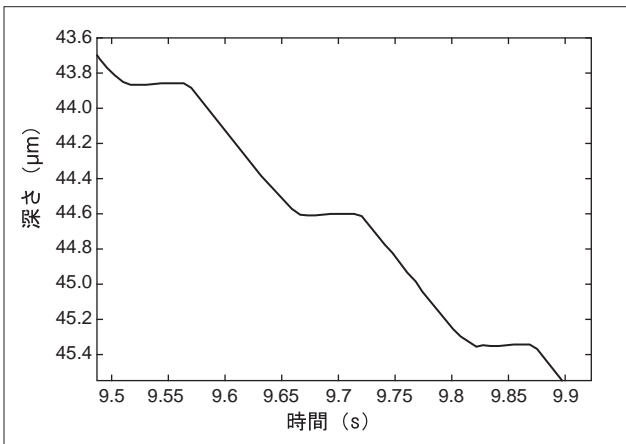


図8 パッシベーション時のツイン・スポット偏光計の出力信号 (アルミニウム・マスク使用)

4.4 実装試験結果

表1は、偏光分析カメラでモニタリングしながら作成したトレンチの深さを評価した結果である。ボッシュ・プロセス完了後に寸法測定装置で測定した値と目標値を比べると、本モニタが高い精度で働いていることがわかる。

表1 トレンチ深さの目標値と実測値の比較

マスク	目標深さ (μm)	寸法測定装置による実測値 (μm)	精度 (%)
フォトリジスト	21.8	21.6	1
アルミニウム	110	109.5	0.5

5 おわりに

MEMS分野で使用される、偏光干渉計をベースとした新しいトレンチ深さのリアルタイムモニタを紹介した。この新しいモニタは、ウオラストン・プリズムを使って2本のコヒーレントで偏光した光ビームを作り、その偏光を変調することで、ビーム間の位相シフトの絶対値を測定することを特徴としている。本法はデバイスの製作プロセスに関係なく、単層膜の厚さと同様の高い精度でトレンチ深さを決定することが可能である。

参考文献

- [1] M.Born, E.Wolf, Principles of Optics, Edition6, Pergamon Press, 1980
- [2] R.M.A Azzam and N.M.Bashara, Ellipsometry and Polarized light, North Holland publishing company, 1979
- [3] David S.Kliger, James W.Lewis, Cora E.Randall, Polarised Light in Optics&Spectroscopy, Academic Press, 1990
- [4] J.Canteloup, J-Cl.Common, Colloque International sur des Procèdes Plasma, 1993
- [5] Jerry Stefani, Stephanie Watts Butler, J.Electrochemical Society, 141, No.5, 1995
- [6] B.Drevillon, Progress in Crystal Growth and Characterisation of Materials 27, No1
- [7] Gabriel G.Barna, 'Dry Etch Processes and Sensors' Solid State Technology, Vol.37, No1, 1994
- [8] Z.Knittel, Optics of Thin Films, J.Wiley&Sons, 1976



Dr. Pascal Amary

Jobin Yvon S.A.S
Thin Film Division
Manager of R&D team



Denis Cattelan

Jobin Yvon S.A.S
Thin Film Division
Project manager (R&D)