

新しいエッチングモニタ DIGILEM

Plasma Dry Etch End-point Monitor, DIGILEM

Ramdane Benferhat*

* Jobin Yvon S.A.S.

要 旨

光干渉計が半導体デバイスプロセスにおける強力なエッチング・プロセスモニタとして注目されている。ホリバグループのひとつであるジョバンイボン社のDIGILEMは、レーザ光源、検出器、光照射源、及びCCDカメラを小型の計測ヘッドに収めたコンパクトな干渉計で構成されている。本稿では、DIGILEMの特長であるツインビーム方式開発の背景と、誘導結合型プラズマ(ICP)法によるシリコンの深い異方性エッチングに関するいくつかの実験結果を紹介する。

Abstract

Interferometry is a powerful technique which can be used for endpoint monitoring during layer and trench etching or deposition. The Jobin Yvon S.A.S. DIGILEM is a patented compact interferometer which integrates the laser source, signal detector, illuminator and CCD camera in a compact head. This paper describes the background of the DIGILEM development, and introduce some experimental data on a Inductively Coupled Plasma dedicated to deep anisotropic etching of silicon.

1 はじめに

精密機械、自動車、医療機器などの分野でさまざまなマイクロデバイス(MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems)が使われている。そして、これらの新しいデバイスを作るために、正確で高性能の制御技術が求められている。

ここ数年、シリコン基板のエッチングをコントロールする分野は目覚ましく発展している。微小領域をエッチングする時のエンドポイントの検出には、さまざまな分析方法が適用されている。単波長ないしは多数波長を使う干渉法は、広く用いられている分析法の一つである。使い方が簡単でかつ非破壊分析ができるこの測定法は、測定光のスポットサイズや波長よりはるかに短い寸法の溝をエッチングするような場合によく用いられている。しかし、100 μ m以上の構造を持ったMEMSの場合には、従来のシングルビーム型のような単純な干渉計を適用することができない。言うのは、溝の構造が光ビームの直径(例えば50 μ m)よりも大きい時には、ビーム全体が溝の中にすっぽりと入ってしまい、参照となるべき信号を得ることができなくなるためである。

ホリバグループのひとつであるジョバンイボン社では2本の単色光ビームをサンプルに照射し、それら反射光の干渉強度及び時間を解析することにより、エッチング速度とエンドポイントをリアルタイムに測定できるエッチングモニタDIGILEMを開発した。図1aにDIGILEMのシステム構成、図1bに光学系、図1cにツインスポットビームの模式図を示す。



図 1a システム構成例

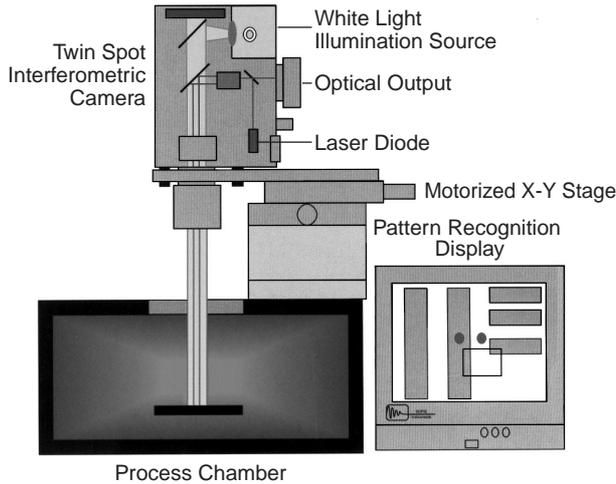


図 1b 光学系

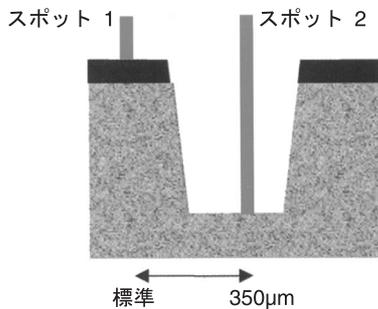


図 1c ツインスポットビーム

2 測定条件の最適化

2.1 エッチングの選択性と信号強度

通常のエッチング条件では、マスク部も一部 $\omega_m \ll \omega$ の速度でエッチングされてしまう。このような場合の干渉強度は、次式のように複雑な時間の関数として表される。

$$I(t) = a + b(\omega_m t) + c(\omega_m t) \cos\left(\frac{4\pi\omega t}{\lambda} - \Delta(\omega_m t)\right)$$

この複雑な式を簡略化するには次のような方法がある。一つは、マスク部に使われている材料が強く吸収する波長を選択することにより、マスク内部の光学的な干渉は除外する方法である。もう一つの方法は、干渉信号を高速デジタル処理することである。専用の最適化された数学的アルゴリズムを利用すると、信号の中から高い周波数成分 ω を抽出することができる。

2.2 マスク層の改質と測定波長

長時間エッチングを行っているとき、プラズマからの輻射でサンプルが熱を持ち、マスク層が化学変化を起こしてしまう可能性がある。こうなるとサンプルの光学的特性が変化してしまい、測定系本来の性能が発揮できなくなる。

高周波成分の振幅は、 $\tan(\theta)$ すなわち $\rho = r_1/r_2$ に強く依存している。エッチングをしている間にマスク層の表面が粗くなってくると、散乱の影響により表面の反射率が落ちる。この結果 $\tan(\theta)$ は小さくなり、測定の検出感度が下がってしまう。ところで、散乱効果は測定光の波長に反比例する。従って、マスク層における表面粗さの問題を解決する一つの法は、プローブ光として近赤外線を用いることである。

2.3 測定ビームの設定と調整

2本の光ビームの位置を正確に決めるために、一組の対物レンズをウォラストン・プリズムの後ろに置いている。二つのビームは対物レンズを介してサンプルの表面に集光し、反射像をCCDカメラで撮影する。X-Yステージと連動させた画像装置によって、ビーム・スポットの位置を高精度で決めることができる。なお、CCDカメラの信号を読み取るフレームグラバや、市販のパターン認識用ソフトを備えた自動機も開発している。

二つのビームのスポットサイズは、チャンバーの上部の窓とサンプル間の距離、及び対物レンズの倍率によって決まる。2本のビーム間の距離はウォラストン・プリズムの偏角によって左右される。窓と試料間の距離を150mmから560mmの範囲で変化させることにより、スポットサイズを25 μ mから60 μ mまで調整することができる(図2)。



図 2 LSIパターンとスポットサイズ

3 測定結果

誘導結合型プラズマ(ICP)法によるシリコンの深い異方性エッチングに関するいくつかの実験を行った。エッチング速度は約 $6\mu\text{m}/\text{min}$ で、レジストに対する選択性は15:1以上であった。ここでは、古典的なエッチング法と、代替法としてボッシュ法の2種類の実験を行った。

3.1 既存のエッチング法

古典的なエッチング方法としては連続エッチングを用いた。プラズマの特性を決めるすべてのパラメータを一定に保ちながら、トータル50分間エッチングした。

図3に最初の5分間の強度変化を示す。

エッチング開始段階のデータを注意深く観察すると、シリコンとマスク部の両方がエッチングされていることがわかる。数学的な解析を行うことにより、エッチングレートは、それぞれ $\omega:6.4\mu\text{m}/\text{min}$ 、 $\omega_m:0.46\mu\text{m}/\text{min}$ であることがわかった。

図3からは、マスク部がエッチングされていることが明確に確認でき、その上、エッチングされた近傍のマスク層が化学変化を起こしていることが推察される。これは長時間、プラズマや高熱にさらされたことが原因と考えられ、これはピーク値が徐々に減少していることから、マスク層の化学変化を読み取ることができる。

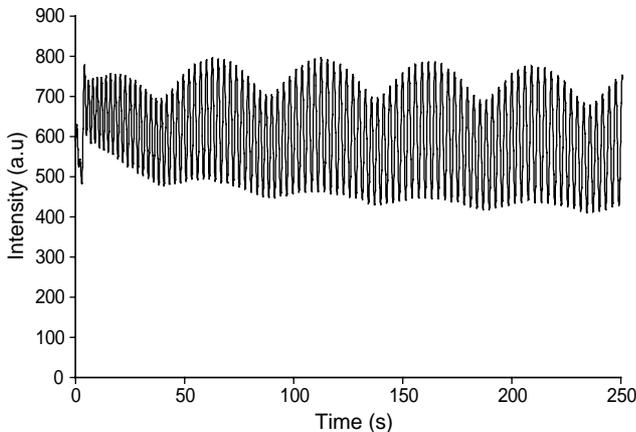


図3 エッチング開始直後(250 ~ 500 秒)の強度変化

[T_0+250 秒, T_0+500 秒]間の強度変化を図4に示す。ここで、 T_0 は運転開始時間である。マスク層内部の光干渉による信号の緩やかな変化が消滅している様子がよくわかる。これはマスクの光学特性が開始6分後に大きく変化したことを意味している。

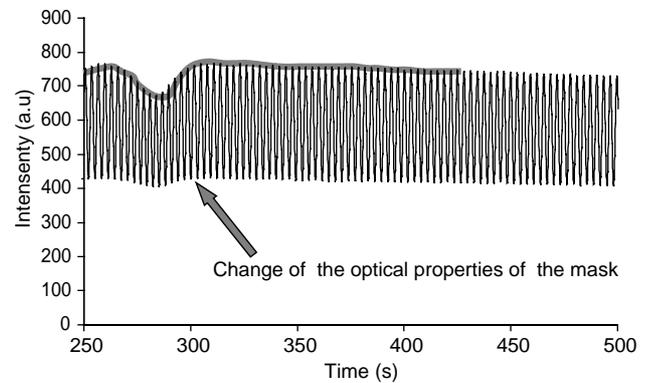


図4 マスクの光学特性の変化(250 ~ 500 秒)

[T_0+1600 秒, T_0+1850 秒]間の強度変化を図5に示す。ここでは変調信号が大きく減衰していることが重要である。高周波の振幅は $\tan(\theta)$ に比例する。異なる時点における $\tan(\theta)$ の値の比をとったものは、反射係数 r_1 の振幅の変化と密接な関係がある。

$$\frac{\tan(\theta)[\text{at } t=400\text{s}]}{\tan(\theta)[\text{at } t=1800\text{s}]} = 10$$

これから明らかなように、バルク状のマスク材料から反射された光の反射係数は、開始後1800秒では、400秒での値に比べて10分の1に減少している。これは時間が経過するとマスク表面が粗くなり、入射光の散乱する割合が大きくなることが原因である。

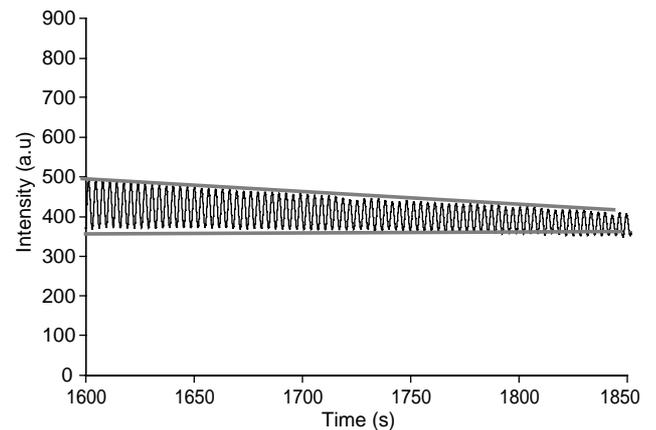


図5 マスクの表面散乱(1600 ~ 1850 秒)

3.2 ボッシュ法

ボッシュ法はパルス状のプラズマを使って、シリコンのエッチングプロセスとポリマー保護膜の堆積を繰り返す方法である。1サイクルで約31秒を要し、うち14秒がシリコンのエッチング、11秒がポリマーの堆積、6秒がポリマーのエッチング(貫通)である。

図6はボッシュ法で25分間エッチングを行った時の検出強度の時間変化を示している。このデータを解析すると、工程中に異なるエッチング・ステップが含まれていることや、マスク層のエッチングによって低周波の信号が表れていることなどが明確にわかる。ボッシュ法では、溝の深さを決定するためには慎重なデータ処理と信号解析が必要となる。つまり、シリコンエッチングがどの段階にあるのかをリアルタイムに識別しなければならない(図7)。本研究では、リアルタイムでのトリガリングによる信号処理とデータ解析によって、エッチングプロセスの確認を実現した。

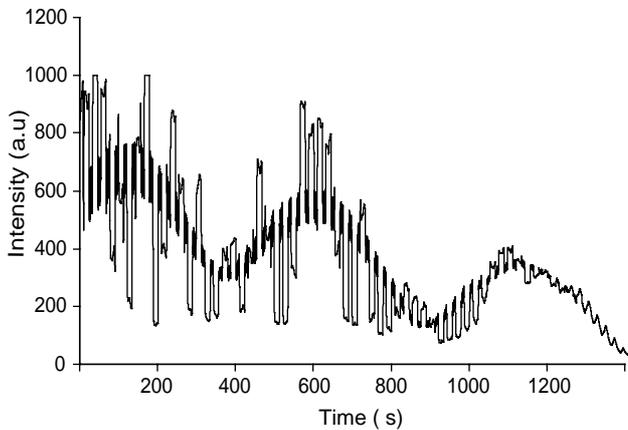


図6 ボッシュ法によるエッチング時の強度変化

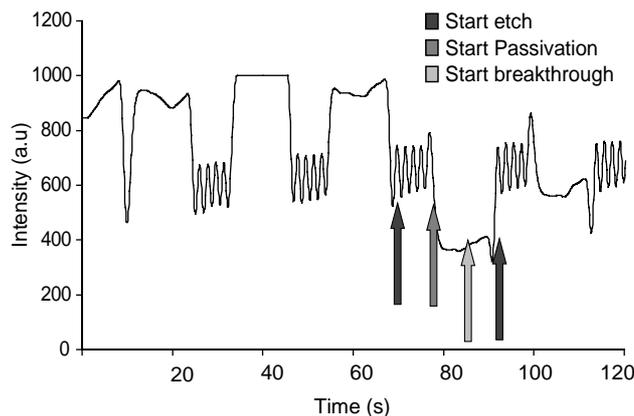


図7 エッチング工程と強度の変極点

図8に、最後の5分間のデータを示すが、マスク層の光学特性が低下しているのが確認できる。



図8 エッチング完了時の強度

4 おわりに

ボッシュ法を用いたシリコンのエッチングにより形成した溝の深さを表1にまとめた。それぞれのプロセスの後、プロフィロメータで溝の深さを実測し、目標値と比較した。

ここで、No.5の試料のみを二つのステップでエッチングを制御した。第一ステップでは、あるゲイン設定とフィルタリングパラメータを用いた。また第二ステップは異なる条件で制御した。なお、設定の切り替えは手動で行った。この結果より、新しいエッチングモニタが、リアルタイムで溝の深さをコントロールする機器として強力なものであることがわかった。

Reference	Controlled target (μm)	Profilometer (μm)	Accuracy (%)
1	48.25	48.50	0.5
2	90	89	1.1
3	120	121	0.9
4	290	289	0.4
5	530	522	1.5

表1 ボッシュ法を用いたエッチング溝の深さ

以上のように、ツインスポットカメラは、2本の光ビームのコヒーレント性と偏光性の長所をうまく活用しており、溝の深さを正確に決定しプロセス制御を正しく行うことができる。



Ramdane Benferhat, Dr.
Managing Director
Thin Film Group
Jobin Yvon S.A.S.

(翻訳 紺野象二郎)