

特集 インプロセス・ウェットエッチング計測制御技術の開発*

In-situ Monitoring and Control of Si Wet Etching Process

大谷 篤史

Atsushi OTANI

坂井田 敦資

Atsushi SAKAIDA

阿部 吉次

Yoshitsugu ABE

石原 康生

Yasuo ISHIHARA

We have developed a method for in-situ monitoring of silicon thickness during wet chemical etching. The principle of the measuring technique is near infrared optical interference caused by the reflection on both surfaces of a silicon diaphragm. Wide wavelength variable laser makes it possible to monitor absolute thickness of rough surfaced silicon. Using this system, we were able to automate the etching process and increase productivity of micro electro mechanical sensors.

Key words : In-situ monitoring, Wet chemical etching, Optical interference

1. はじめに

近年カーエレクトロニクス化が進む中、車両状況を計測するセンサが多数活用されている。代表的なセンサとしては圧力センサがあり、小型・高感度化の要請から、回路素子との集積化が可能な半導体センサが用いられている。またこうした半導体センサは加速度測定など車両応用ニーズが拡大していく傾向であり、さらに低コスト化と量産化も求められるようになっていく。Fig. 1に示す圧力センサでは、センシング部であるSiダイヤフラムのたわみをとらえ、ピエゾ抵抗の変化として圧力を検出する。その検出感度はダイヤフラムの厚さと面積に大きく依存するため、センシング部である半導体構造部の高精度で高速な量産加工が不可欠となっている¹⁾。

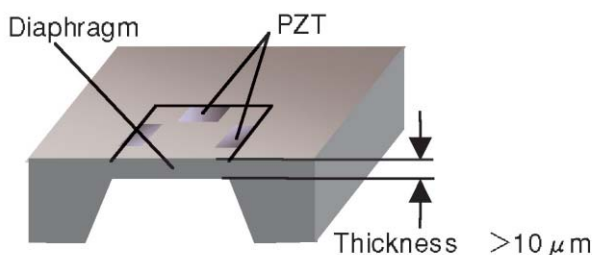


Fig. 1 Structure of the pressure sensor

2. 量産加工の課題

Si構造部の加工には、低コストで加工速度が大きいアルカリ性水溶液による異方性エッチングが広く用いられている²⁾。このウェットエッチングは高温の化学処理であり、現状エッチング時間、液温、濃度を管理して、厚み加工を制御している。よって、高精度な厚みが要求される製品において、粗い加工、仕上げ加工と二段階に工程を分割して生産するなど生産性が低

下する問題が発生している。10 μm程度以下の薄いダイヤフラムを形成する場合、電気化学効果を利用して高精度にエッチングを停止させる加工が実現されている。しかしながら厚みが必要な応用分野も多数存在し、こうしたセンサを加工する場合、電気化学では厚膜を形成する時間が膨大となりやはり生産性が著しく低下する。

こうした背景から、従来よりエッチング中に加工形状を測定する試みを実施されている³⁾。これはSiを透過する近赤外光の干渉を用いてダイヤフラムの厚みを測定し、加工をモニタリングしようとするものである。しかし半導体表面に粗さが生じると干渉光が減衰してモニタリングが不可となる問題があり、生産現場での実用化が困難であった。

本論文では、高速で広帯域に波長が掃引できる赤外レーザ光源を開発し、Si厚み測定に適用することで、Si結晶方位(110)の面粗度が比較的大きい加工面であってもエッチングインプロセス制御を可能にする技術について述べる。

3. 測定原理

波長1 μm以上の近赤外光はSiの透過性が良いため、ダイヤフラム面に照射した場合、Siの表面、裏面からの反射光が干渉する。このとき、反射光強度(以降、干渉信号と記す) $I(\lambda)$ は次の式で表される。

$$I(\lambda) = I_0 + I_0 \cdot \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) \quad (1)$$

ここで、 λ : 入射光の波長、 n : Siの屈折率
 d : Si厚

簡単のためSiの透過、反射率および多重反射の影響は無視している。ここで λ を λ_0 から $\Delta\lambda$ 変化させる

*システム制御情報学会の了解を得て、「第46回自動制御連合講演会講演論文集」(2003.11)より一部加筆転載

と、反射光強度は $1/\lambda$ 軸で正弦波上に変化し、その波長掃引幅内の波数 f は次式で示される。

$$f = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0^2 + \lambda_0 \cdot \Delta \lambda} d \quad (2)$$

よって、 λ_0 、 $\Delta \lambda$ 、 n を既知とし、干渉信号を $1/\lambda$ 軸で周波数解析して f を求めれば、 d の絶対値を測定することができる。

従来、 λ の走査は一樣光を分光することで実現され、波長域で狭い部分を分離するため検出光が微弱となり、Si加工面の面粗度の影響を受けやすかった。これに対し、レーザ光源の発振波長を変化させれば、常に信号強度を確保できる。しかしダイヤモンドのように厚み d が小さい場合、解析可能な波数 f を得るためには(2)式から波長変化量 $\Delta \lambda$ を拡大することが要求される。また加工をモニタする点から速い波長駆動も必要である。このため、高速で広帯域に波長掃引可能な赤外レーザ光源の開発が必要であった。

3.1 波長可変赤外レーザ

エッチング条件、測定対象からレーザ光源への要求値を、速度：波長設定時間 < 1 ms、波長可変量：80nm以上とし、これを満たすレーザ光源を開発した。Fig. 2に構成を示す。半導体レーザの端面に反射防止膜をコーティングし、外部にリング共振器を構成した外部共振器型を基本としている。共振器内には干渉フィルタが挿入されており、このフィルタはビームに対する角度によってFig. 2に示すように透過波長を選択することができる。この結果、共振器のゲインピークがシフトされレーザの発振波長が可変となる。波長掃引を高速化する目的から、フィルタの角度はガルバノ

メータを用いて高速駆動している。Fig. 3に開発レーザの発振波長特性を測定した結果を示す。波長可変量は100nm以上あり目標を満足した。しかし、干渉フィルタの波長選択特性が角度に対して線形でないため発振波長出力もガルバノ駆動に対して非線形になっている。またFig.3に示すように光出力は設定波長で大きく変化している。これは半導体の増幅特性が波長に対して一様でないことと、フィルタのピーク透過量が角度で変化することに起因している。さらに出力には細かい変動が存在しているが、これは反射防止膜の残反射特性の影響で発振モードが安定しないためである。このため波長設定毎の出力の再現性も低い。今回レーザの開発に当たり動作速度を優先させ、出力および波長の高精度制御は実施していない。よって比較的シンプルで安価な波長可変レーザ光源が実現できているが、厚み計測に適用する際には、以上のレーザ発振特性の対策が必要である。

Fig. 3に波長設定の応答性を測定した結果を示す。波長設定時間は0.5ms以下であり、こちらも目標を満足した。ガルバノメータの応答性が無負荷で0.3msであり、応答時間はほとんどガルバノの機械的応答で決定されていると考えられる。

3.2 干渉信号処理法

開発した波長可変赤外レーザを用いてSiダイヤモンドで得られる干渉信号をFig. 4に示す。先述のレーザ発振波長と光出力の不安定性の影響で、干渉信号の振幅、および周波数が変調されている。周波数変調に関しては、Fig. 3に示した発振特性を使って横軸を $1/\lambda$ に変換すれば均一な周波数に修正することができる。ただし等間隔に取得した干渉信号は、この変換で不規

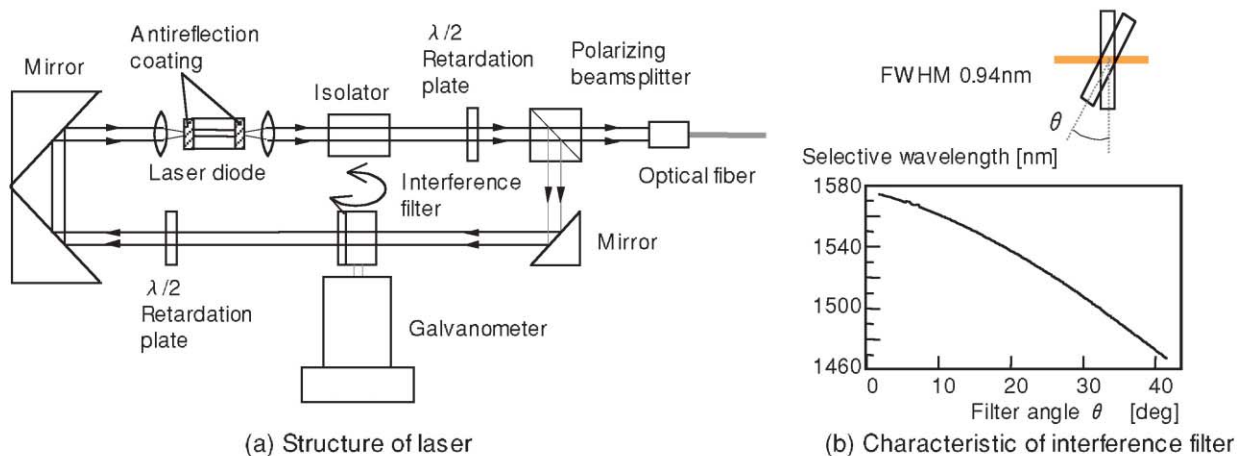


Fig. 2 Wavelength variable infra-red laser

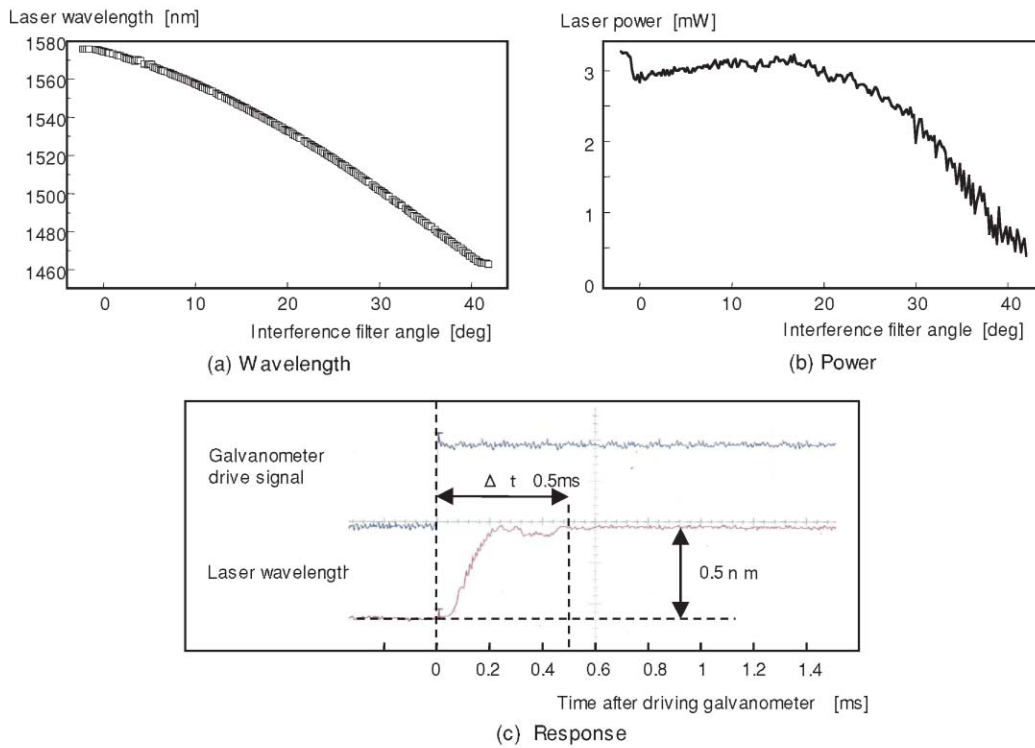


Fig. 3 Characteristic of Wavelength Variable Laser

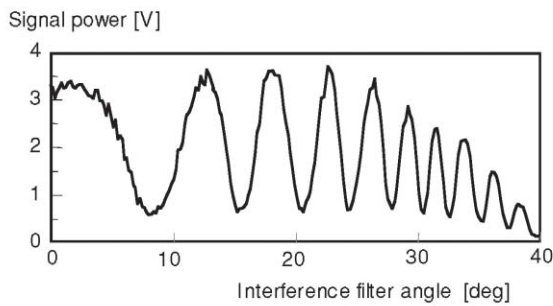


Fig. 4 Optical interference signal of Si diaphragm

則な間隔のデータとなる。不規則間隔のパルス列 $d(\lambda)$ でサンプリングした干渉信号 $I(\lambda)$ のフーリエ変換 $P(f)$ は

$$\begin{aligned}
 P(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} d(\lambda) \cdot I(\lambda) \exp\left\{-j \frac{2\pi f}{\lambda}\right\} d(1/\lambda) \\
 &= D(f) * \pi \delta(f \pm 2nd) \quad (3)
 \end{aligned}$$

と表される。Siの厚みを求めるには $2nd$ となる波数を正確に求める必要があるが、(3) 式のフーリエ変換の結果から、この求めるべきインパルス $\delta(f - 2nd)$ には不規則サンプリングのフーリエ変換 $D(f)$ が重畳されたものになる。開発レーザの干渉フィルタを一定角度毎に駆動し、その際生じる不規則サンプリング列を観測して $D(f)$ を計算した結果を Fig. 5 に示

す。 $D(f)$ は歪んだサイドローブを持つものの、 $f=0$ でのピークを保っている。よってこの関数が重畳される $P(f)$ のピーク点も本来求めるべき波数に一致することになる。

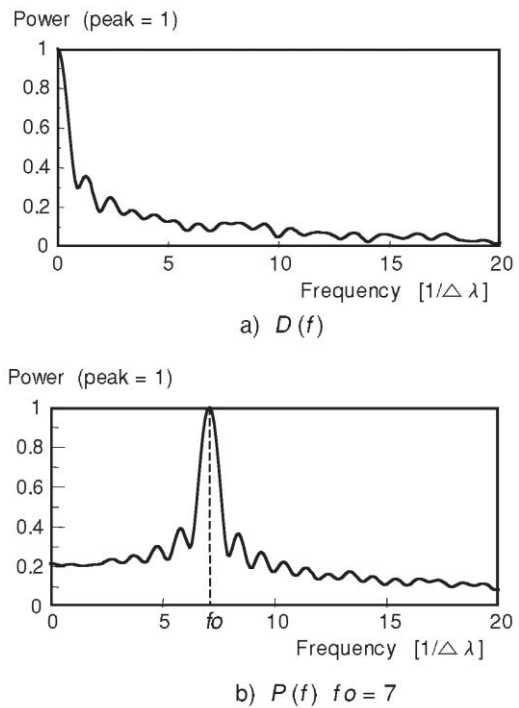


Fig. 5 Fourier spectrum

今回のダイヤフラム干渉信号処理の目的は、単一周波数成分の波数を正確に求めることに限定することができる。よって干渉信号の離散データから $P(f)$ の値を下式で直接計算し、ピーク波数を高分解能に求める処理を今回採用した。

検出した干渉信号を、レーザ波長： $\lambda\kappa$ 、干渉信号強度： $I\kappa$ のデータ列（ $\kappa=1\sim N$ ）としたとき

$$P(f) = \left| \sum_{\kappa=1}^N I\kappa \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi f}{\lambda\kappa}\right\} \right| \quad (3)$$

ただし（4）式は計算量が多いため、初期解を与えてその近傍で $P(f)$ のピークを局所探索することで高速化を図っている。特にエッチングモニタでは、初期解に前回測定時の厚みが使用でき、またエッチレートから厚みを予測することが容易であるため、探索幅をかなり限定することができる。このため高速な信号処理が可能となる。

4. テスト結果

開発したSi厚計測システムの測定精度を評価した結果をFig. 6に示す。エッチングで厚みを変化させたSiダイヤフラムサンプルを複数用意し、既存の各種測定法と比較評価した。今回厚みの真値は、測定点付近でダイヤフラムを破壊し、その断面の厚みをSEMで測定した値としている。

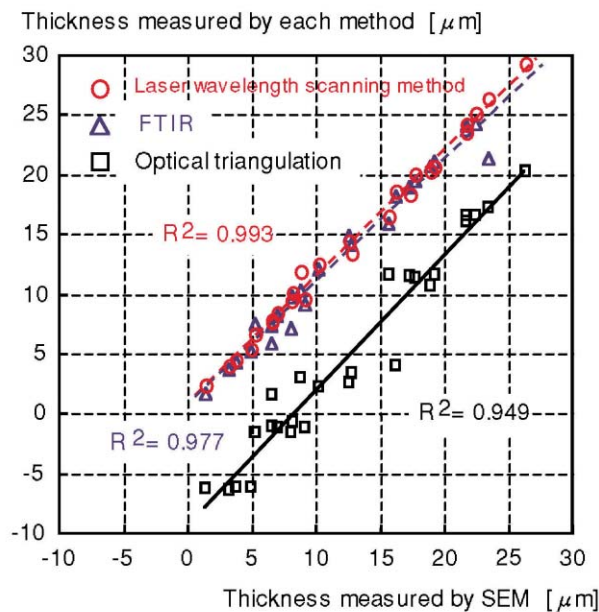


Fig. 6 Measurement result

SEMの値を基準としたときの直線性は、開発した計測システムが最も良い結果となっている。FTIRの測定値と似通っているのは、光干渉を利用している点で原理的に同じ手法であるためと考えられる。一方、光三角測量の値がばらついてるのは、エッチング面の粗さの影響と推測される。同一点のくり返し精度が $0.1\mu\text{m}$ 以下と良好であり、直線性もFTIRと遜色ないことから、本開発法は実用性が高いと判断した。

開発した計測器をウエットエッチング装置⁴⁾に組み込み、インプロセス計測および加工制御のテストを実施した。システムの概要をFig. 7に示す。エッチング制御用のコンピュータによって波長可変赤外レーザ光源は必要なタイミングで駆動され、レーザ出力は光ファイバを通して計測ヘッドに導かれる。計測ヘッドはウエハのエッチング面と反対側に設置されており、測定したいスポットにレーザ光を照射させる。同時に反射光は計測ヘッドで集光され、光ファイバでフォトダイオードに導かれる。電気信号として観測された干渉信号は先に述べた信号処理系で高速、高分解能に周波数解析され、Si厚に換算して出力される。以上の処理により、コンピュータはダイヤフラムの厚みをリアルタイムにモニタし、エッチングレートを管理することができる。また最終的な狙い厚に達した時点で自動的にエッチングを停止させることが可能である。

温度分布の均一性を阻害するなどのエッチング加工への影響を避けるため、計測ヘッドは微小光学系を用いて小型化し、耐化学性、耐熱性も有している。また計測ヘッドの位置は、反射光強度が最大となるように常に自動で制御されている。

Fig. 8にエッチング・インプロセスモニタの観測例を示す。Si表面の粗さ形状が変化するエッチングプロセス全体を通して、リアルタイムにダイヤフラムの絶対厚の計測が可能であることが確認できている。また所定厚での加工停止も制御できており、従来に比べ高精度で生産性に優れた加工工程を実現している。

5. おわりに

ウエットエッチングの加工中に近赤外光の干渉を用いて半導体厚をインプロセス計測する技術を提案した。高速に広波長を掃引するレーザ光源の開発と、ピーク周波数検出に特化した信号処理を組み込むことで、加工面の形状変化に強い高精度な半導体絶対厚測定を可能にした。この技術をエッチング加工機に組み込むことで、加工を自動化し生産性を著しく向上させることができる。

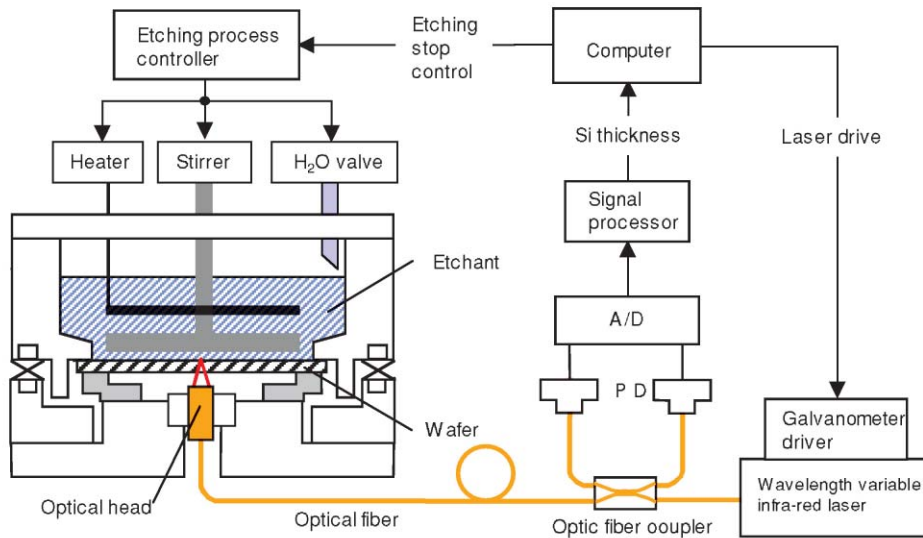


Fig. 7 In-situ monitoring system of Si wet etching

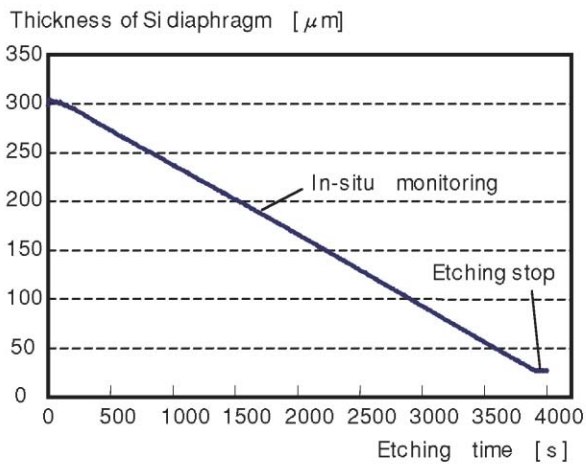
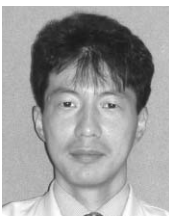


Fig. 8 Example of in-situ monitoring

<参考文献>

- 1) 鈴木, 他: デンソーテクニカルレビュー, Vol. 6, No.2 (2001), p.99.
- 2) 佐藤, 他: 表面技術, Vol.51 (2000), p.755.
- 3) K. Minami et al: IEEE MEMS Work-shop (1994), p.217.
- 4) 阿部, 他: 表面技術協会 第107回講演大会 (2002)

<著 者>



大谷 篤史
(おおたに あつし)
生産技術部
生産全般に関わる計測技術開発に従事



坂井田 敦資
(さかいだ あつし)
工機部
半導体生産装置に関わる設備技術開発に従事



阿部 吉次
(あべ よしつぐ)
生産技術部
電子製品に関連する生産システム開発に従事



石原 康生
(いしはら やすお)
生産技術開発部
半導体薄膜加工の要素技術開発に従事