ナノパーティクル測定機による シリコンウエハ面のナノ欠陥計測*

佐々木都至** 安 弘*** 森 勇藏† 片岡俊彦†
遠藤勝義† 山内和人† 井上晴行†

Measurement of Nanodefects on Si Wafer Surface
Using System for Measuring Particle Diameter by Light-Scattering Method

Satoshi SASAKI, Hiroshi AN, Yuzo MORI, Tosihiko KATAOKA, Katsuyoshi ENDO, Kazuto YAMAUCHI and Haruyuki INOUE

A system measuring for nanoparticles on a silicon (Si) wafer using a light-scattering method was developed previously. The present research aims at developing a new method for measuring a scratch width of the nanometer (nm) order on a Si wafer using the developed system. In this method, the measurement of the width of a scratch was attempted by detecting the amount of scattered light obtained from the scratch and calculating the spherical volume of a particle which would approximately replace the unit volume of the scratch having a concave shape. The measurement of a nanoscratch on a Si wafer surface, where the scratch was created using an atomic force microscope (AFM) needle, was carried out using the present measuring system and an AFM. As a result, the use of this measuring system has enabled the measurement of the scratch width with a high accuracy. The measurement of scratch width on the surface of a bare Si wafer has been attempted using this measuring system. Consequently, it has been verified that this measuring system is applicable for the detection of scratch widths of nm order on a Si wafer.

Key words: nano-scratch, nanoparticles, Si wafer, light-scattering method, nanometer, nanoscratch, AFM, scratch width

1. 緒 言

これまでの研究では、シリコン(Si)ウエハ上のパーティクルをナノメータ(nm)オーダーで測定できるナノパーティクル測定機を開発したが、さらに本測定機を用いた超精密加工面のスクラッチやマイクロラフネスなど表面ナノ構造に対する測定法の開発を行っている^{1)~5)}。

デザインルールが0.1 μ mに突入したULSI半導体技術において、Siウエハ面上のナノパーティクルやナノ欠陥の検出が不可欠となるが、さらにマイクロラフネスまで含めたSiウエハ表面性状を評価できる測定機の開発も求められている。現在、表面性状をnmオーダーはもちろん原子オーダーレベルで測定できるものにSTMやAFMなどのSPM(走査型プローブ顕微鏡)があるが、測定領域は狭くない。一方、開発した光散乱法を用いる本測定機は、一度に数十mm²以上の測定領域をnmオーダーの分解能を維持しながらパーティクルを測定することができるものである。また、Siウエハ表面の平均粗さが0.1nm以下の完全表面であれば、本測定法によって原子オーダーのパーティクルやナノ欠陥まで検出できるものであることを示し、平均粗さが0.7nm程度である通常のSiウエハであれば、直径15nmまでのパーティクルを計測できるものであることも実証した。さらに、標準微粒子(PSL)を用いた校正と実際にベアSiウエハのパーティクル測定により、本ナノパーティクル測定機の有用性を示した^{6)~8)}。

そこで、今回は開発した本ナノパーティクル測定機を用いて、Siウエハ面の微細欠陥の一つであるスクラッチの溝幅をnmオーダーで測定できるナノ欠陥測定法を考案した。そのため、まず仮想パーティクルからの散乱光強度とスクラッチ溝幅との関係を数値シミュレーションで求めてその実証を図った。

さらに、ダイヤモンドコートをしたAFM探針を用いて、Siウエハ上にnmオーダーのスクラッチ形状を創成し、これに対してAFMと本測定機による比較測定を行い、本計測法の実証を図った。その結果、本測定機が精度良くnmオーダーのスクラッチ幅を計測できることを実証した。また、スクラッチ幅の検出限界はSiウエハ表面のマイクロラフネスに依存するが、一般的な加工仕上げ面のSiウエハ面上ではスポット光の直径が2 μ mならば幅3nmまでのスクラッチを検出できることを示した。さらに、パターン未形成のベアSiウエハ表面を測定して溝幅がnmオーダーのスクラッチの存在を示すことができた。

以上、本ナノパーティクル測定機はnmオーダーのパーティクル測定のみではなく、nmオーダーの横分解能を維持してmmオーダーの領域において、スクラッチも検出できる測定機であることを実証し、さらに表面ナノ構造測定機としての可能性も示すことができたので報告する。

2. 粒径測定システム

2.1 検出原理

Fig.1 Configuration of measuring system for nano-particles

* 原稿受付 平成14年1月7日

** 学生会員 大阪電気通信大学大学院(寝屋川市初町18-8)

*** 正会員 大阪電気通信大学工学部

† 正会員 大阪大学大学院(吹田市山田丘2-1)

図1に本測定機のシステム図を示す。収束レーザスポットをSiウエハ表面上に斜めから照射してXYの2方向に走査させ、表面上にナノパーティクルやナノ欠陥が存在すれば、極微弱な散乱光が発生する。この全散乱光を楕円面鏡と放物面鏡で集光し、光電子増倍管(PMT)により散乱光強度に応じた積分電圧波形として検出し、その最大波高値からパーティクルの直径やスクラッチ幅などのナノ構造のサイズを求めるものである^{2)~6)}。

2.2 検出電圧信号に対する信号処理

本測定機により得られた検出電圧波形に対するバンドパスフィルタを用いた信号処理についてはすでに報告している⁸⁾。図2に示すようなパーティクルやスクラッチが存在するSiウエハ表面上において、斜め45度で入射させたレーザスポットを走査すると、散乱光より光電子増倍管出力回路で得られる電圧波形は図3(a)のような形で出力される。検出電圧波形はパーティクルやスクラッチ形状による信号成分とSiウエハ粗面に応じて生じる散乱光によるノイズ成分、さらに迷光による直流電圧成分が重畳した形で出力される。この重畳された出力電圧信号に対し、レーザスポット径をしきい値としたローパスフィルタ的な量子化を用いたコンピュータデジタル信号処理を適用することにより、図3(b)に示すようにパーティクルとスクラッチ形状の信号成分のみを分離抽出することができる。パーティクルの場合は、波高値 V_p より単一パーティクルの粒径をnmオーダーで計測することができ、また波高値 V_s よりスクラッチ幅を計測することができ、

Fig.2 Scanning direction of laser light on Si wafer surface

(a) PMT signal of the scattered light

(b) Signal of particle2 and scratch separated from other signal

Fig.3 PMT signal of the scattered light and signal separation using band-pass filter

3. スクラッチ形状計測法

3.1 スクラッチ形状と散乱光強度

本測定機の検出原理で用いているレーリー光散乱強度は粒径の6乗に比例するので、パーティクルの体積に大きく依存する。ここで、同体積の凸形状と凹形状から発生する散乱光強度は同等であると考え、スクラッチの凹形状の体積による散乱光強度を求めることができる。スクラッチ形状とは、図4に示すような直径 R_s の球によって創成された深さ h_s 、幅 d_s 、全長 L の溝形状と仮定して、以下のようにスクラッチ形状からの散乱光強度を求める。スクラッチ形状の円弧を創成する球体の曲率半径 R_s は、幅 d_s と深さ h_s より次式で求められる。

$$R_s = \frac{4h_s^2 + d_s^2}{8h_s} \quad (1)$$

このとき、図4に示すスクラッチ形状の半月状断面面積 S_s は、次式で求められる。

$$S_s = \frac{R_s^2}{2} \left[2\sin^{-1}\left(\frac{d_s}{2R_s}\right) - \sin\left\{2\sin^{-1}\left(\frac{d_s}{2R_s}\right)\right\} \right] \quad (2)$$

Fig.4 Principle of the measurement of a scratch on Si wafer surface

そこで、図4に示すように、スクラッチ形状を長手方向にスクラッチ幅 d_s で区切ることにより得られる半月断面長方体の体積を図5に示すような単位体積 V_s とすれば、 V_s は式(2)を用いて

$$V_s = S_s \cdot d_s = 2R_s^3 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d_s}{2R_s}\right) - \frac{d_s}{2R_s} \sqrt{1 - \left(\frac{d_s}{2R_s}\right)^2} \right] \quad (3)$$

として求められる。ここで、図5に示すように単位体積 V_s を、これと同等な体積 V_s をもつ直径 d_{sv} の仮想球形パーティクルに近似して置き換える。

Fig.5 A unit volume corresponding to a virtual particle

この単一の仮想パーティクルの直径 d_{sv} は、

$$d_{sv} = \left(\frac{6}{\pi} V_s \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

として求められる。ここで、単一のパーティクルからの散乱光強度を求める式(1)を用いれば、粒径 d_{sv} の仮想パーティクルの散乱光強度 I_s が次式で求められる。

$$I_s = \frac{2}{3\pi} \cdot \lambda^2 \cdot I_0 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{sv}}{\lambda} \right)^6 \cdot \left| \frac{\hat{n}^2 - 1}{\hat{n}^2 + 2} \right| \quad (5)$$

ここで、 λ をレーザ波長、 I_0 をレーザスポット中心の光強度、 $\hat{n}$ を複素屈折率とする。この I_s を半月断面単一スクラッチからの散乱光強度と近似すれば、溝幅 d_s 、長さ L のスクラッチ形状は、図5に示すように擬似的にスクラッチを溝幅 d_s で区切ってできる単位体積 V_s と同等の体積をもち直径が d_{sv} の仮想パーティクルが、図6に示すような直線状に連続して並んだものとして考えることができる。このようなスクラッチ形状を直径 D のレーザスポットで照射してスクラッチ長手方向と垂直のX方向に走査すると、図3(b)に示したような単一パーティクルと同様な検出波形が得られる。

Fig.6 Principle of the measurement for a scratch and light intensity in a laser spot

図6に示すようにスクラッチがレーザスポットの任意の位置で照射されているとき、レーザ中心強度を I_0 として均一照射の状態 I_2 に対するガウシアン分布の状態 I_1 の比 t_s は

$$t_s = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(r) dr}{\int_{-\infty}^{\infty} I(0) \cdot 2w} = 0.591 \quad (6)$$

となり、定数として求められる。ここで、 w は振幅が半径方向にガウス分布するときの $1/e$ になる幅であり、 $2w$ をビームウェストという。また、 r はレーザスポット中心から半径方向の距離である。また、レーザスポット内に含まれる仮想パーティクルの数 n_s は、スクラッチ形状の幅 d_s と、レーザスポット径 D より、 $n_s = D/d_s$ として求められる。したがって、スクラッチ形状からの全散乱光強度 I_{ss} は

$$I_{ss} = n_s \cdot t_s \cdot I_s = \frac{D}{d_s} \cdot 0.591 \cdot \frac{2}{3\pi} \cdot \lambda^2 \cdot I_0 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{sv}}{\lambda} \right)^6 \cdot \left| \frac{\hat{n}^2 - 1}{\hat{n}^2 + 2} \right| \quad (7)$$

で求めることができる。

Fig.7 Relation between scattered light intensity and width of a scratch

ここで、上式を用いてスクラッチ形状の深さ h_s を幅 d_s の10%~50%として、幅 d_s と全散乱光強度 I_{ss} の関係を求めて図7に示す。この曲線図よりスクラッチから得られた散乱光強度 I_{ss} を検出すればスクラッチ幅を求めることができ、これが光散乱を用いたナノスクラッチ計測法の原理である。幅10nm程度ならば $10^{-9}W$ 程度で本測定機でも検出が十分可能であることを示している。図7に示すように、深さ h_s が幅 d_s の10~50%において、散乱光強度は深さ h_s にはあまり依存せず、主に幅 d_s の変化に大きく依存していることを示すことができた。

3.2 スクラッチ幅の検出限界

さて、本測定機におけるスクラッチ幅の検出限界は、パーティクルの測定と同様に、被測定面のマイクロラフネスに大きく依存する。すなわち、スクラッチからの散乱光強度を信号成分 S とし、またレーザスポット内のマイクロラフネスに応じて生じる散乱光強度をノイズ成分 N とすれば、これら強度が同程度の $S/N=1$ となる溝幅が検出限界と考えられる。そこで、被測定面のマイクロラフネスによる散乱光強度 I_{sr} とスクラッチからの散乱光強度 I_{ss} との関係を求め、 $I_{ss}=I_{sr}$ と同じ強度になる位置すなわち $S/N=1$ の点をプロットして求めた結果を図8に示す。散乱光強度はスポット径に依存しないことを確認しているが、スポット径が大きくなると被測定面のマイクロラフネスによるノイズ成分 N が増加して S/N が低下し、スクラッチ検出感度が低下する。すなわち、スポット径が小さい程 S/N が良いことを示す。たとえば、理論的には原子的に完全平坦な表面であれば、原子オーダーの直線状の欠陥を検出可能であるが、平均粗さ R_a 0.5nm程度の一般的な加工仕上げ面Siウエハであれば図8に示すように、スポット径が $2\mu m$ であれば、幅3nmが検出限界であることを示している。ただし、本測定機ではスポット径をパーティクル測定を考慮して $8\mu m$ としたので、スクラッチ幅の検出限界は8nmである。

Fig.8 Relation between a detectable scratch width and micro-roughness

3.3 スクラッチの創成と測定

本測定機によるスクラッチ測定法を検証するために、AFM探針を用いて、実際にnmオーダーのスクラッチ形状をSiウエハ面上に創成し、これを本測定機とAFMにより測定して比較した。AFM探針はnmオーダーの曲率半径をもちダイヤモンドコートを施されたものである。AFMによる測定結果を図9に三次元的に表示し、その平面図を図10に示した。また、A-B間とC-D間の2箇所での断面図を図11(a)と(b)に示す。

Fig.9 Measured result for a scratch shaped using AFM

Fig.10 Measured result for a scratch shaped using AFM

Fig.11 AFM signal of a scratch

図 9 と図 10 に示すように、創成したスクラッチ形状は幅 59nm~65nm と幅 10~35nm 程度の二筋のスクラッチが存在していることを示している。ここで、図 11 に示した幅の大きいスクラッチを d_{s1} 、幅の小さいものを d_{s2} とし、さらに A-B 間、C-D 間近傍の 6 箇所における断面図により 1.28μm 四方における太いスクラッチの溝幅 d_{s1} のばらつきは 55nm~75nm 程度であり、平均は 64.4nm である。また細い溝幅 d_{s2} は 10nm~35nm であり、平均は 24.2nm である。このスクラッチ形状に対して光散乱法を用いた本ナノパーティクル測定機により 2000μm × 2000μm の領域で測定し、3 次的に表示したものを図 12 に示す。

Fig.12 Measured results for a scratch obtained using this measuring system

ただし、創成した nm オーダのスクラッチを、数μm 程度の測定領域しかもたない AFM で探索して検出することは非常に困難を要した。しかし、一度に数十 mm 四方の領域を計測できる光散乱法を用いた本ナノパーティクル測定機の場合、このナノスクラッチを容易に検出することができることを示した。

図 12 に表示されている 4 本のスクラッチの幅は 63~65nm で、その平均は 63.9nm であり、AFM で計測した図 11(b)で示すスクラッチ幅 d_{s1} と同等であることを示している。ここで、本測定機の縦分解能は nm オーダであるが、横分解能はスポット径に依存しているためミクロンオーダである。そこで、図 10 に示したように、数 nm 離れた位置に 2 本のスクラッチ形状が並んでいるものは、一つのものとして検出される。すなわち、本計測原理ではスクラッチ形状が同時にレーザスポット内に数本存在していた場合、散乱光強度の合計された値として出力される。しかし、スクラッチ形状からの散乱光強度は、式(7)に示すようにスクラッチ幅の 5 乗に比例するため、それぞれのスクラッチ幅の比 d_{s2}/d_{s1} が 0.5 以下であれば、図 13 に示すようにそれぞれの散乱光強度の比 I_{ss2}/I_{ss1} は 0.03 以下となり、大きな幅のスクラッチの値として検出されると見なすことができる。

Fig.13 The dependence of I_{ss2}/I_{ss1} on d_{s2}/d_{s1}

ここで実際に検出した散乱光強度を比較すると、図 11(b)に示す C-D 間にある $d_{s1}=65nm$ のスクラッチから発生する散乱光強度は 20μW、 $d_{s2}=24nm$ のスクラッチから発生する散乱光強度は 2nW となるため、散乱光強度においては 10000 倍程度の差があり、検出される散乱光は d_{s1} からの散乱光強度と近似できる。したがって、図 12 に示す 4 本の検出スクラッチ信号は太い溝幅 d_{s1} を 64.5nm と精度良く検出していることを示し、本測定機によりナノスクラッチを測定することができることを示した。

3.4 Si ウエハのスクラッチ測定

Fig.14 Measured surface profile of a sample with scratches

実際に、パターン未形成のベア Si ウエハを本測定機で測定した。図 14 に本測定 2000 μm ×2000 μm の領域を測定した結果を示し、さらに異なる Si ウエハ面の領域 5000 μm ×5000 μm を測定した結果を図 15 に示す。図 14 に示すように、ミリメートルオーダの測定領域で 10nm 以下のスクラッチを検出して、その存在を示すことができた。さらに、図 15 においては、幅 10nm 程度のスクラッチの検出と同時に直径 52nm のパーティクルも検出できていることを示している。なお、5mm×5mm 領域に対する測定時間は現在 7 時間程度であるが、まだ十分短縮できるものである。

Fig.15 Measured surface profile of a same sample obtained from the scattered light with various incident light direction (5000 μm ×5000 μm)

3.5 スクラッチ測定の方位依存性

本ナノパーティクル測定機を用いたスクラッチ測定における、スクラッチからの散乱光強度はレーザスポットの入射方向と走査方向に依存する。図 16(a)に示すように、スクラッチ長手方向に対してレーザスポット光の入射方向が垂直で、かつ走査方向も垂直の場合にスクラッチからの散乱光強度 I_{ss} が最大となる。また、図 16(f)に示すように入射と走査の方向がスクラッチと平行するときその強度が最小となる。これは本測定法の原理が、スポット光内を通過するパーティクルおよびスクラッチから散乱光強度の変化量を検出することに大きく起因するからである。したがって、スクラッチの長手方向に垂直でもスポット光を長手方向に走査する図 16(b)の場合、またその逆の図 16(e)の場合は走査スポット内にスクラッチが存在したままで散乱光強度の変化が生じなくなり、直流信号成分のみとなるからである。

Fig.16 Laser scanning direction and scratch direction

図 14 と図 15 に示したスクラッチの測定結果は、図 16(a)のようにレーザスポット光の入射方向と走査方向が同じで、この方向と長手方向が垂直のスクラッチのみが検出されたことを示している。したがって、入射および走査方向を変化させれば長手方向の異なるスクラッチが検出できる。そのような Si ウエハのスクラッチの存在については、井上らの報告がある⁹⁾。ここで、入射方向と走査方向を同じ方向とし、入射方向を 0°~22deg まで変化させスクラッチの入射方向の依存性を検証した。

Fig.17 Measured result for scratch using this system

図 17 にレーザ入射方向を 0~22deg まで変化させて測定した結果を示す。また、図 18 にそれぞれの測定結果からスクラッチ線図を求めて重ね合わせた図を示す。図 17 と 18 に示すように、0~22deg の間に明らかに検出されたスクラッチは 7 本(図中①~⑦で示す)であるが、途中で現れたり消滅したりしている様子を示すことができた。

Fig.18 Overlapped image of the scratch signals in Fig.18(a)-(d)

図 17, 図 18 に示すように、レーザの入射方向および走査方向を変化させると、スクラッチの散乱光強度が変化して検出されるスクラッチ数変動すること示している。ここで、レーザ入射方向と走査方向を図 17(a)の場合として、レーザ入射と走査方向に対するスクラッチからの散乱光強度の変化計測した結果を図 19 に示す。

Fig.19 Dependence of the detected scattered light from scratches on laser incidence direction

図 19 に示した Scratch1 は、図 17 で示したスクラッチのうちの一つであるが、0deg のときレーザの入射方向および走査方向がスクラッチと垂直の状態を示し、垂直から 10deg ずれると散乱光強度は 63%程度まで減少している。また、Scratch2 は 8deg においてレーザ入射方向に対して垂直となり散乱光強度は最大となることを示しており、10deg 変化する毎に 50%減少していることを示している。以上、本測定法によるスクラッチ測定ではレーザの入射方向、およびその走査方向の依存性があることを示した。

4. 結 言

これまでに開発した光散乱法を用いたナノパーティクル測定機を利用して、超精密加工表面上のナノ欠陥であるスクラッチ形状計測法の開発を試み、以下のような結果を得た。

(1) 半月断面形状のスクラッチを仮想球体パーティクルの連続体と仮定し、レーザスポット径内のスクラッチの散乱光

強度を簡略的に求める関係式を導出し、スクラッチからの散乱光強度から、その幅を nm オーダで検出できる測定法を考案した。

- (2) 検出可能スクラッチ幅は、計算結果よりレーザスポット径が 2 μ m なら 3nm で、またスポット径が 8 μ m である現システムなら 8nm であることを示した。
- (3) ダイヤモンドコートをした AFM 探針を用いて、パターン未形成のベア Si ウエハ上に nm オーダのスクラッチ形状を創成し、本ナノパーティクル測定機と AFM により比較測定して、本測定機の実証を行った。
- (4) その結果、本ナノパーティクル測定機で計測した溝幅は AFM による計測値と同じ平均溝幅であることを示した。
- (5) これにより、本測定機は 2 本のスクラッチが照射レーザスポット径以上離れていれば、その幅を nm オーダで精度良く測定できることを示した。
- (6) パターン未形成のベア Si ウエハを本測定機で測定し、直径 51nm のパーティクルと同時に幅 9~11nm のスクラッチを検出した。
- (7) パーティクルやスクラッチに対して、nm オーダの感度を保持しながら、数十 nm の領域を測定できるシステムであることを示した。

以上、本測定機はパーティクルだけでなく、超精密加工面におけるナノメートルオーダの凹凸や欠陥を含むナノ構造も測定できるものであることを示すことができた。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(COE 形成基礎研究費 08CE2004)の援助を受けて行われたことを記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 森勇蔵, 安 弘, 遠藤勝義, 山内和人, 杉山和久, 土屋八郎, 井出廠: 光散乱法による nm オーダの粒径測定法の開発, 精密工学会誌, **54**, 11(1988)2132.
- 2) 森勇蔵, 安 弘, 遠藤勝義, 山内和人, 井出廠: 光散乱法による nm オーダの粒径測定法の開発 (第 2 報) -シリコンウエハ表面付着微粒子の測定-, 精密工学会誌, **56**, 10(1990)1847.
- 3) 森勇蔵, 安 弘, 片岡俊彦, 遠藤勝義, 稲垣耕司, 山内和人, 山村和也, 福池敬重: 光散乱法による nm オーダの粒径測定法の開発 (第 3 報) -標準微粒子による粒径測定法の評価-, 精密工学会誌, **59**, 7(1993)1121.
- 4) 安 弘, 森 勇蔵, 片岡俊彦, 遠藤勝義, 山内和人, 稲垣耕司, 山村和也, 井上晴行, 佐野泰久: 光散乱法による nm オーダの粒径測定法の開発 (第 4 報) -光電子増倍管出力特性の定式化とダイナミックレンジの改善法-, 精密工学会誌, **62**, 8(1996)1198.
- 5) 安 弘, 佐々木都至, 森 勇蔵, 片岡俊彦, 遠藤勝義, 井上晴行, 山内和人: 光散乱法による nm オーダの粒径測定法の開発 (第 5 報) -Si ウエハ表面に対する洗浄前後でのパーティクル測定による表面評価-, 精密工学会誌, **65**, 10(1999)1435.
- 6) Satoshi SASAKI, Hiroshi AN, Yuzo MORI, Toshihiko KATAOKA, Katsuyoshi ENDO, Haruyuki INOUE, and Kazuto YAMAUCHI, and Shigenori MIZUHARA: Evaluation of Particle on a Si Wafer before and after Cleaning Using a New Laser Particle Counter, Proceedings of the Ninth International Symposium on Semiconductor Manufacturing, September(2000)317.
- 7) Satoshi SASAKI, Hiroshi AN, Yuzo MORI, Toshihiko KATAOKA, Katsuyoshi ENDO, Kazuto YAMAUCHI, and Haruyuki INOUE: Measurement of Nanoparticles and Defects by Laser Light Scattering on Si Wafer Surface with Ellipsoidal Reflector, Proceedings of the COE international Symposium on Ultraprecision Science and Technology for Atomistic Production Engineering -Creation of Perfect Surface-, March(2001)161.
- 8) 佐々木都至, 安 弘, 森勇蔵, 片岡俊彦, 遠藤勝義, 山内和人, 井上晴行: レーザ光散乱法による Si ウエハ表面上のナノパーティクルの計測, 精密工学会誌, **67**, 11(2001)1818.