

研究

レーザー光走査を用いた共焦点検出型
サブミクロン寸法計測

藤田 宏 夫

シチズン時計(株)技術研究所 〒359 所沢市下富 840

(1991年12月9日受付, 1992年5月8日受理)

Sub-Micron Dimensional Measurement Based on Confocal
Detection Method Using a Laser Beam Scanning

Hiroo FUJITA

Technical Laboratory, Citizen Watch Co., Ltd., 840, Shimotomi, Tokorozawa 359

(Received December 9, 1991; Accepted May 8, 1992)

A new sub-micron dimensional measurement system which is able to detect edges of an object within $\pm 0.02 \mu\text{m}$ accuracy is described. A galvano mirror coarsely deflect a beam at $0.1 \mu\text{m}$ step within a wide distance so as to determine the measuring position on the object, an acousto optic deflector finely deflect a beam at $0.01 \mu\text{m}$ step within a fine distance for detecting a reflected intensity precisely. The reflected beam from the object is detected with a slit-type light receiver at confocal and stationary position relative to the deflection. The edge of the object can be detected from the peak intensity position derived from the difference signal which is obtained from the subtraction operation of the reflected beam intensity signal. This peak intensity position corresponds to the deflection state where the peak intensity of the spot beam with a Gaussian distribution is irradiating on the edge.

1. はじめに

最近の精密加工技術の進歩により、 $1 \mu\text{m}$ 以下のサブミクロンオーダーの微細パターンが形成されるようになり、パターン寸法を工業計測の場でインライン計測するニーズが高まっている。測定されるパターンが反射率の異なる複数の部材から構成されているとき、反射率の差による反射光強度の変化を検出する方法が多く用いられており、寸法測定のためには反射率が変化する境界であるエッジを正確に検出する必要がある。

従来から一般に用いられてきた微小寸法測定法は、白色光源で照明されたパターンを顕微鏡で高倍率に拡大して CCD センサーで検出し、ビデオ信号を2値化する方法である。それは、パターンからの反射光強度変化の50%の強度レベルである半値強度を検出してビデオ信号を2値化し、半値強度位置をパターンエッジとみなし、半値強度間距離である半値幅からパターン寸法を測定す

る。しかし、寸法が小さくなりサブミクロンに達すると、特にパターン部からの反射光強度変化がブロードになり、2値化法による半値幅は実際の寸法より大きく測定されるとともに、半値幅と寸法が比例しなくなる。これはエッジ位置が正確に検出されないためである。

最近では、微小スポットに集光したレーザー光を音響光学偏向素子(AOD)¹⁾により走査する光学系²⁾、さらには反射光を共焦点方式で検出する共焦点レーザー走査顕微鏡³⁻⁶⁾が多くの分野で用いられている。検出した反射光に対して前述の2値化を行うときは、例えばパターン部のエッジ近傍にゴミなどの異物があるとき、その影響で反射光強度が変調されて半値強度の正しい設定ができず、寸法測定に新たな誤差を生じる場合がある。したがって、サブミクロン寸法を正確に測定するには、2値化法によらない新規なエッジ検出法が必要になる。

そこで、AODによりレーザー光を $0.01 \mu\text{m}$ ステップで精密に走査してパターンからの反射光を共焦点検出

する走査光学系を用い、反射光強度信号の差分処理を行い、レーザー光の強度分布がガウス型である特性を利用して差分信号のピーク強度位置からエッジを $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以内の精度で検出する新規な寸法測定法を開発した。

レーザー光の走査の面から見れば、AOD は回折角度が小さいために微小距離を精密に走査できるという特徴があるが、逆に長い距離の走査ができない。レーザー光の走査にはガルバノミラー (GM) も多く用いられる。GM は走査角度が大きいため広い範囲の走査には適するが、走査分解能、安定度は AOD よりも低い。そこで、同一方向への走査を行う AOD と GM を同一光路中に配置して両者を相補的に駆動することにより、AOD による精密走査の機能を持たせながら走査範囲を拡大する新規なハイブリッド型 1 次元走査光学系を開発した。

以下にハイブリッド型レーザー走査を用いた共焦点検出型の走査光学系の構成、サブミクロン寸法のエッジ検出原理、測定結果について述べる。

2. 共焦点検出型走査光学システムの構成と動作

2.1 1 次元走査光学系の構成

Fig. 1 に寸法測定に用いる走査光学系の構成を示す。He-Ne レーザーから放射される 2mW パワー、633 nm 波長の直線偏光を持つレーザー光を偏光ビームスプリッター (PBS) を透過させ、シリンドリカルレンズ f_1 と凸レンズ f_2 により紙面に平行な面内に広がり、紙面に垂直な面内に集光するシート状ビームに変換して AOD に入射する。シート状ビームを用いるのは、AOD の回折効率を上げるためである。AOD を透過したシート状ビームを凸レンズ f_3 とシリンドリカルレンズ f_4 により再び円形ビームに変換する。なお、シリンドリカルレンズ f_1 と f_4 の屈折作用面は互いに直交方向に設定する。AOD からは角度 θ で回折される回折 1 次光および高次の回折光、非回折光が射出する。凸レンズ f_3 とシ

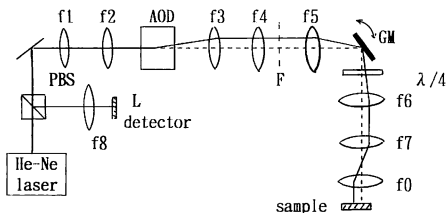


Fig. 1 Schematic diagram of the optical configuration of the hybrid type one dimensional laser beam scanner using an acousto optic deflector (AOD) and a galvano-mirror (GM).

リンドリカルレンズ f_4 の共通焦点位置 F にスリットを設けて不要の回折光をカットし、回折 1 次光のみを通過させて走査ビームとする。この円形状の発散光である回折 1 次光を凸レンズ f_5 でコリメートしてガルバノミラー (GM) で反射させる。GM は反射角度を変えて AOD と同じ方向にビーム走査を行う。GM で反射したビームを $1/4$ 波長板、リレーレンズ f_6, f_7 を介して $NA=0.6$ の対物レンズ f_0 で微小スポット ($\sim 1 \mu\text{m}$) に集光し、パターン面上を 1 次元的に走査する。パターンからの反射光は逆進して再度 AOD に入射するが、ここでも回折 1 次光、非回折光、高次回折光が射出する。PBS で進路を変えた反射光を凸レンズ f_8 で集光し、受光器 L で検出する。

受光器 L は受光面にスリットを直接に貼り付けた構成で、スリットを通して回折 1 次光のみ受光し、他の回折成分のビームはカットする。回折 1 次光を検出すべき反射光とするが、この反射光強度分布における中央部を含む一部の範囲の強度だけを検出する。回折 1 次光はレーザー光源から AOD に入射するビームの光路と等しい光路を逆進するため、反射光の検出位置は走査の定点である。したがって照射ビームがパターン面上のどの位置を走査していても、走査位置にかかわらず、常に反射光強度分布の中央部が受光器 L の一定位置で検出される。

サブミクロン寸法を正確に測定するため、AOD による走査では、照射ビームスポット径の $1/100$ 程度のステップ ($0.01 \mu\text{m}$) で数 μm の範囲を走査して反射光強度変化を精密に検出する。このような微小距離を精度良く走査するため、AOD は Intraaction Corp. 製の ADM-40 を用いた。ADM-40 はキャリア一周波数が $30\sim 50$ MHz の範囲で回折 1 次光の偏向角度が 3.25 mrad 変化する。実際の回折角度の制御 (走査) は電圧がリニアに変化するランプ波信号で行い、 3.25 mrad の回折角度変化を 1 ボルトの電圧信号で制御する。GM もランプ波電圧で駆動し、 10 度の反射角度変化を 10 ボルトの電圧信号で制御する。光学系全体は空気ばね式防振台上に設置して振動による外乱を排除し、反射光強度を安定に検出する。

2.2 ハイブリッド走査

本走査光学系では異なる偏向角度特性を持ち、同一方向に走査する AOD と GM の二つの走査素子を同一の光路中に配置する。いずれか一方の走査素子を駆動しているときは他方の走査素子の動作を停止させておき、互いに相補的な動作を行わせる。このような走査をハイブリッド型走査と称する。

GM によりパターン上を $0.1 \mu\text{m}$ ステップで広い範囲を粗く走査し、パターンの概略形状を測定して精密に測定すべき位置を決定する。このプリスキャン動作中では AOD の走査は停止しておく。次に GM の反射角度を測定位置に応じて設定して走査を停止し、その位置を中心として AOD で $0.01 \mu\text{m}$ ステップの精密な走査を行い、寸法測定のために反射光強度の変化を精密に測定する。GM による走査範囲内であれば、GM の反射角度を任意に設定することにより、その位置を中心として AOD を走査することができ、実質的に AOD の走査範囲を GM の走査範囲にまで拡大することが可能になる。この走査の切り替えは電気信号の制御で行う。このハイブリッド動作は、従来の顕微鏡において対物レンズの倍率を変換することに相当する。ハイブリッド走査により、測定位置合わせに機械的のステージを用いなくてもよく、高速な位置合わせができる。また、ステージ移動に伴う振動の発生が起きないために測定の信頼性が向上する。

AOD と GM の偏向角度の変化を θ , ϕ としたとき、各々により走査される走査距離 L_a , L_g は(1)式で表され、レンズの焦点距離を設定することで測定目的に応じた走査距離を得ることができる。

$$\begin{aligned} L_a &= f_3 \cdot f_6 \cdot f_0 \cdot \theta / (f_5 \cdot f_7) \\ L_g &= f_6 \cdot f_0 \cdot \phi / f_7 \end{aligned} \quad (1)$$

本光学系では、AOD の走査範囲 L_a を $20 \mu\text{m}$, GM の走査範囲 L_g を $200 \mu\text{m}$ に設定した。AOD と GM を駆動するランプ波信号は 12 ビットの D/A コンバータで作成する。AOD は 0.5 mV , GM は 5 mV の電圧ステップで駆動することで、AOD は $0.01 \mu\text{m}$, GM は $0.1 \mu\text{m}$ ステップの走査分解能が得られる。

本光学系ではレーザー光を 2 回 AOD に入射させるため、AOD で走査を行うときは走査の両端付近での回折効率の低下が大きくなり、受光器で検出される反射光の強度低下が大きくなる。そのため、強度低下が少ない走査の中央部付近の 50% 程度の範囲 ($10 \mu\text{m}$) が寸法測定に対して有効な走査範囲になる。GM で走査を行うときは、AOD を回折効率の高い走査の midpoint に設定して走査を停止しているため、レーザー光が 2 回 AOD に入射しても反射光強度の低下は少なくなる。

2.3 反射光の検出と分解能

反射光を検出する受光器 L の位置は、物体面のフーリエ変換面に対する再回折面となり、物体面の幾何学的形状、反射率の差に応じて変化する反射光強度変化が検出される。パターン面に照射されるレーザー光の強度分布

はガウス型分布で、光強度の強いビーム中央部付近が照射されている位置からの反射光強度信号が、パターン形状に関して多くの情報を含んでいる。測定する寸法が照射スポット径以下で、ビームの走査方向 (X 軸) にあり、直交する方向 (Y 軸) には照射スポット径以上の広がりがあるようなパターンからの反射光を、スリットの短軸が X 軸方向にあり、スリットの長軸が Y 軸方向にある構成の受光器で検出する。本光学系では、受光器に入射する反射光のスポット径を $60 \mu\text{m}$ に設定して幅が $25 \mu\text{m}$ のスリットを受光器に貼り付けた構成にし、反射光の中央部の強度を含む 40% 程度の範囲の強度のみを検出する。Y 軸方向の成分は全体を検出する。

集光したレーザー光を走査して反射光を検出する走査型レーザー顕微鏡では、反射光を広がりを持った検出器で受光するときをタイプ 1 (非共焦点検出)、ピンホールを通して点検出器で受光するときをタイプ 2 (共焦点検出) と分類されている⁷⁾。タイプ 1 の場合、照明側の対物レンズ出射瞳が円形開口のとき、瞳関数の Fourier 変換である点像分布関数を h , 物体の振幅反射率を R とすると、反射光強度 $I(x, y)$ は

$$I(x, y) = |h * R|^2 = \{2J_1(v)/v\}^2 \quad (2)$$

で与えられる。 $J_1(v)$ は 1 次のベッセル関数で、 v は開口で規格化した光軸からの距離である。 $*$ は畳み込み積分である。タイプ 2 では、照明側、集光側のそれぞれの点像分布関数を h_1, h_2 として、

$$I(x, y) = |h_1 h_2 * R|^2 = \{2J_1(v)/v\}^4 \quad (3)$$

で表されるため、タイプ 2 はタイプ 1 に比べて像の強度は 2 乗で変化することになり、50% の強度レベルで比較するとおよそ 27% 程度だけ空間分解能が向上する⁷⁾。

ピンホールの代りにスリットを用いた場合、スリット短軸方向ではタイプ 2 に近く、スリット長軸にはタイプ 1 程度の面内分解能を持つことが知られており^{8,9)}、本光学系での検出は共焦点検出と等価とみなせる。タイプ 1 の場合、分解能 $\Delta\epsilon$ は波長を λ として

$$\Delta\epsilon = 0.61\lambda/NA \quad (4)$$

で与えられる³⁾。633 nm 波長で、 $NA=0.6$ の対物レンズの場合は、 $\Delta\epsilon=0.64 \mu\text{m}$ である。これに対して本光学系による共焦点検出では、27% ほど分解能が向上するため、 $\Delta\epsilon=0.47 \mu\text{m}$ 程度である。

3. エッジ検出法

寸法を精密に測定するにはエッジを正確に検出することが必要である。反射率 R_s を持つ基材部 S の間に反射率 R_p のパターン部 P が同一面上にあり ($R_s > R_p$)、その

境界であるエッジを検出する場合のエッジ検出原理を Fig. 2 に示す。ガウス分布を有する照射ビームを図の方向に走査すると、反射光強度はビームが照射されている位置の反射率、ビームの強度分布に応じて変化する。走査の代表的な位置を A~D に示す。A から D までのエッジ付近では、照射ビームスポット径の 1/100 程度の $0.01 \mu\text{m}$ ステップで走査し、各走査位置ごとに反射光強度変化を検出する。A から D までの状態で、照射ビームの強度最大点がエッジに照射されている B、C 状態に対応する反射光強度を検出してエッジを決定する。

パターン P の寸法 g が分解能 $\Delta\epsilon$ 以上であるとき、反射光強度分布の中央部をスリットの中央に入射させれば、特に走査位置 B、C に対しては、反射光強度分布の中央部の左右の領域の強度差が最大になる。したがって、照射ビームが左側から右側に走査されたとき走査位置 B、C で反射光強度の変化率が最大になる。これは照射ビームがガウス型の強度分布を持つことによる。そこで、走査の一周期で検出された反射光強度信号の差分演算を行い、差分強度信号のピーク強度位置を検出してエッジ位置を求める。走査位置 B と C の間を走査したランプ波電圧からパターン寸法 g を測定する。

Fig. 3 にパターンの形状例を示す。パターンは基材部 S の間に、互いに反射率、寸法の異なる 3 種類の部材から形成され、各部材は同一平面上に形成されている。基材部の反射率を 1 に規格化し、部材 A、B、C の反射

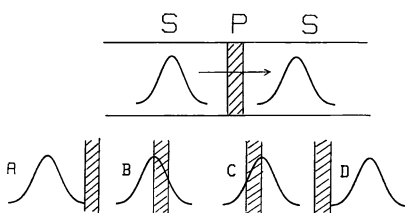


Fig. 2 Principle of edge detection. A fine spot laser beam is deflected from left to right. In many deflection states of a spot beam on the pattern, the deflection states (B) and (C) are detected to determine the edges.

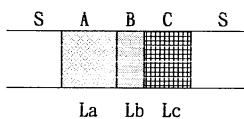


Fig. 3 Schematic pattern shape for measuring the dimension. S is substrate; A, B, and C are portions to be measured. Each portions are constructed on same height on the substrate, they have different reflectivities.

率を $R_a(=2.3)$, $R_b(=0.25)$, $R_c(=2.2)$ で表す。照射ビームのビーム直径 (最大強度の 13.5% の強度間距離) を 1 に規格化し、部材 A, B, C の寸法を $L_a(=0.75)$, $L_b(=0.25)$, $L_c(=0.5)$ で表す。Fig. 3 に示したパターン上をレーザー光が走査したとき得られる反射光強度パターン波形(A)および差分強度パターン波形(B)のシミュレーション例を Fig. 4 に示す。

波形 A, B において、a は反射光の全体を検出した場合 (タイプ 1), b は共焦点検出 (タイプ 2) の場合である。計算は (5) 式に示す 1 次元のガウス分布式を用い、照射ビームの強度分布と、パターンの寸法と反射率の幾何学的関係からの強度変化について求めた。

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/\omega^2) \quad (5)$$

ここで、 I_0 はピーク強度、 ω は強度値がピーク強度の 13.5% となるときのビームスポット半径、 r はビーム広がり X 方向の距離で、 $r=0$ が強度最大点である。計算するビーム径方向の範囲は $-1.5\omega \leq r \leq 1.5\omega$ で、照射ビームを $3\omega + L_a + L_b + L_c$ の範囲で走査し、各走査位置ごとの r 方向の照射ビーム強度分布 $I(r)$ と反射率分布 $R(r)$ に応じた反射光強度で、反射光全体を検出するときの強度 $P(t)$ と、スリット検出するときの強度 $P(s)$ を

$$P(t) = \int_{-t}^t R(r) \cdot I(r) dr \quad (6)$$

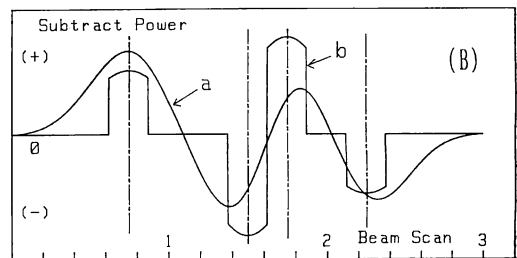
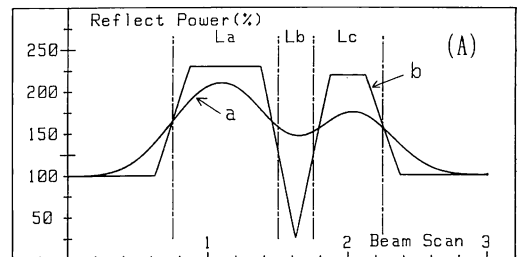


Fig. 4 Simulational waveforms obtained when deflect a beam on the pattern shown in Fig. 3. Waveform (A) are reflected intensity patterns, waveform (B) are difference intensity patterns. In each waveforms, (a) is without slit detection. (b) is with slit detection.

$$P(s) = \int_{-s}^s R(r) \cdot I(r) dr \quad (7)$$

で計算する。ただし、 $t = 1.5\omega$ 、 $s = L_b/2$ である。

反射光強度パターン波形では、基材部での反射光強度を 100% としたときの相対強度、差分強度パターン波形では基材部の強度をゼロとしたときの相対強度で表す。反射光強度パターン波形では、波形 (b) が波形 (a) に比べて各部材間のエッジ付近での強度変化がシャープになり、特に部材 B での強度変化に顕著な差が生じる。差分強度パターン波形では、波形 (a) は基材部と部材 A のエッジを除いて、他のエッジでは差分ピーク強度位置とエッジが一致しない。波形 (b) は差分ピーク強度位置はすべてのエッジと一致する。

4. 測定と結果

スポット径が $1 \mu\text{m}$ のビームを $0.01 \mu\text{m}$ ステップでパターン上で走査し、各走査位置ごとに反射光強度を検出して 10 ビットの A/D 変換を行い、走査の一周期についての反射光強度の変化である反射光強度パターン信号をメモリー回路に記憶する。AOD は $0.01 \mu\text{m}$ ステップ走査の 1 ステップを $5 \mu\text{s}$ で行い、 $10 \mu\text{m}$ の走査で 1 Kワードのデータを 5ms で検出する。次にシフトレジスタ回路を用いて反射光強度パターン信号の差分処理を行う。差分はハードウェアで処理できるため、実質的にリアルタイムで差分強度パターン信号が得られる。

Fig. 5 に寸法 $L_a = 1.12 \mu\text{m}$ 、 $L_b = 0.51 \mu\text{m}$ 、 $L_c = 1.02 \mu\text{m}$ 、反射率 $R_a = 2.2$ 、 $R_b = 0.3$ 、 $R_c = 2.3$ の場合での寸法測定結果を示す。波形 T はスリットを用いないで反射光の全体を検出したとき、波形 S はスリット検出の場合の反射光強度パターン信号、波形 D は波形 S の差分強度パターン信号で、強度レベルは相対値である。各々の波形において下方の波形は AOD を走査するランプ信号で、 400mV の振幅を持ち、レーザー光を $8 \mu\text{m}$ 走査する。波形 T、S を比較すると、波形 S の方が部材 B での反射光強度のディップが大きいとともに、強度変化がシャープになり、スリットによる共焦点検出の効果が大きいことがわかる。実際の測定では、照射ビームの強度分布が理想的なガウス分布から外れていること (レンズ系の収差の影響による)、回折の影響を受けること等で、エッジ付近での立上がり、立下がりの反射光強度変化がシミュレーション波形と比べて若干ブロードになる。差分強度パターン信号波形 D の四つのピーク位置はエッジ位置に対応することが電子顕微鏡による比較で確認できた。差分によるエッジ検出では、半値強度法と異なり差

分ピーク強度付近だけの検出でよいから、パターン内部にゴミ等の異物があってもエッジ検出には影響がない。また、被測定物の各部材の反射率が変動しても、反射光強度の大きさが変化するだけで、差分ピーク強度位置は変化しない。さらに、本測定では反射光強度レベルの検出は行わず、差分強度を検出するために、レーザー光の強度変動に対しても影響を受けない。光学系に対して重要なことは照射ビームの強度分布が時間的に変化しないことであるが、本測定装置では満足されている。

Fig. 6 に寸法が $0.51 \mu\text{m}$ の部材 B の両側のエッジを検出し、エッジ間の寸法 L_b を測定したときの繰り返し安定度の測定結果を示す。AOD を 0.5mV ステップで駆動したとき、差分強度パターン信号のピーク強度位置を直接検出すると、量子化誤差のため $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 以上の測定誤差が生じる。差分強度パターン信号のピーク強度

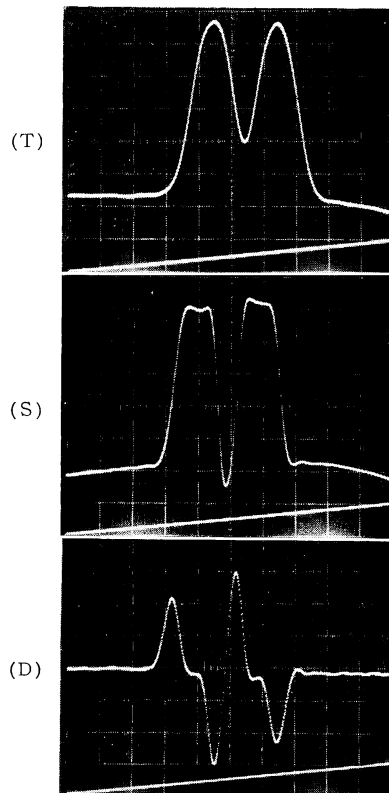


Fig. 5 Measurement waveforms obtained when deflect a beam on the pattern shown in Fig. 3. Waveforms (T) and (S) are reflected patterns, in which (T) is without slit detection, (S) is with slit detection. Waveform (D) is a difference intensity pattern of the waveform (S). In waveform (D), each peak positions correspond to the edges.

付近では2次関数的な強度変化を持つため、差分強度パターン信号のピーク付近のデータを再度数値的に差分演算して直線近似し、近似直線の値の正負の符号が変化する位置を補間してエッジ位置を算出した。100回の測定での繰返し安定度は $\pm 0.005 \mu\text{m}$ が得られた。これはAODの走査再現性が高いことによるもので、AODを駆動するキャリアー信号の周波数変動は、実際の測定時間に対応する数秒程度の短期において、40 MHzに対して $\pm 8 \text{ kHz}$ 以下の変動範囲内で、 $\pm 0.02\%$ である。寸法測定におけるAODの走査では、走査の絶対的位置安定度(同じ走査電圧で同じ位置に走査される)よりも、2点間を走査したときの走査距離が安定していることが重要であるが、本測定装置に使用したAODはこの特性を満足している。

Fig. 7に寸法測定におけるリニアリティーの測定結果を示す。Fig. 3のパターンで部材A、Cがなく、部材Bだけがあるパターンについて、 $0.58 \sim 1 \mu\text{m}$ の範囲の寸法とそのエッジ間をAODで走査したときのランプ波信号の電圧の相関である。パターンの寸法は走査型電子顕微鏡(SEM)で測定した。SEMによる測定も基準とするラテックス粒子に対する相対測定であり、 $0.01 \mu\text{m}$

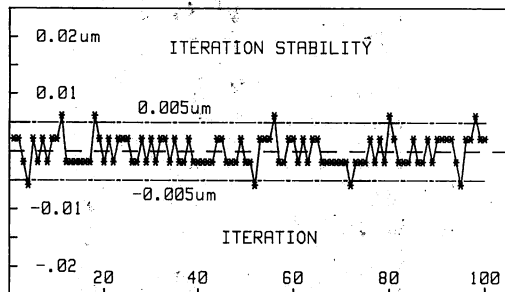


Fig. 6 Result of the iteration stability of the dimensional measurement at the portion (B) shown in Fig. 3.

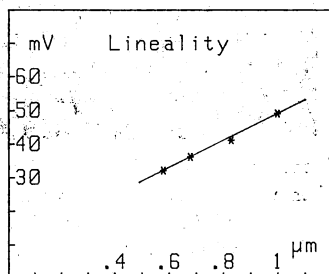


Fig. 7 Measurement of the correlation between dimension and deflection control voltage which deflect a laser beam between the edges.

程度の測定誤差があると思える。寸法とエッジ間の走査電圧は直線で近似でき、各測定値の近似直線からの偏差は $\pm 1 \text{ mV}$ 以内である。AODを走査するランプ波電圧の 1 mV は $0.02 \mu\text{m}$ の走査距離に相当するため、本システムによる測定精度は $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以内であるといえる。

本寸法測定では、測定に必要な走査範囲は $5 \mu\text{m}$ 程度でよく、少なくとも全走査距離の20%程度の範囲で走査のリニアリティー、安定度が高いことが必要であるが、本測定ではAODによる走査は十分に安定化しており、リニアリティー、繰返し安定度ともに $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以内の精度で寸法測定ができる。

5. まとめ

共焦点検出型のサブミクロン寸法測定システムを生産ラインのオンライン測定に実用化した。微小スポットのレーザー光を、 $0.01 \mu\text{m}$ の走査分解能でパターン上を走査し、反射光を走査定点でかつスリット型受光器で共焦点検出する。反射光強度変化を差分処理し、強度変化率のピーク位置を検出することで、エッジをリアルタイム的に $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以内の精度で測定できた。

レーザー光の走査に関しては、AODとGMの2種類の走査素子を用い、GMで広い範囲を粗く走査して測定位置を決定し、AODで寸法測定のための精密な走査をする。この走査により、GMの走査範囲内の任意の位置でAODを走査でき、精密走査のできる範囲を大きく拡大することができ、測定の効率を上げることが可能になった。以上のエッジ検出法とレーザー走査法を組み合わせることにより、実用上の効果の大きい寸法測定機が実現できた。

文 献

- 1) R. Adler: "The interaction between light and sound," IEEE Spectrum, May (1967) 42-54.
- 2) 藤田宏夫: "レーザービーム走査による2次元微小パターン計測", 光学, 20 (1991) 160-161.
- 3) 鈴木達朗, 堀川嘉明: "生物学的研究を目的とした実時間走査型レーザー顕微鏡の開発", レーザ研究, 15 (1987) 636-646.
- 4) 藤井陽一, 尾崎政男: "レーザー顕微鏡", O plus E, No. 119 (1989) 99-105.
- 5) 大出孝博: "レーザ走査顕微鏡の開発", 日経サイエンス, 10月号 (1990) 42-53.
- 6) ゴードン・キノ, ティモシー・コール: "共焦点走査型光学顕微鏡", パリティ, 5, No. 3 (1990) 12-21.
- 7) T. Wilson and C. J. R. Sheppard: *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy* (Academic Press, London, 1983) pp. 37-52.
- 8) 河田 聡: "共焦点レーザ走査蛍光顕微鏡の検出器面積について", 第3回レーザ顕微鏡研究会講演資料集 (1989) pp. 23-28.
- 9) 河田 聡, 南 茂夫: "光学走査顕微鏡", 光学, 18 (1989) 380-391.