サブ μm 領域における線幅標準とその測定[†]

初 澤 毅*・土 井 琢 磨*・豊 田 幸 司*

Sub- μm Linewidth Standards and Their Measurements

Takeshi HATSUZAWA*, Takuma Dori* and Kouji TOYODA*

Trial linewidth standards for the calibration of scanning electron microscopes (SEM's) used in semiconductor production have been manufactured and evaluated. A quantitative investigation of the relationship between peak-to-peak linewidth and cross sectional dimension has been made. The results show that the peak-to-peak values are 7 nm smaller than the values obtained from cross sectional measurements. The edge signal peak shift has been simulated using a newly modified diffusion model and this also gives smaller linewidth than the defined edge distance. Linewidths measured optically have been compared with those measured by an SEM. The optical method gives wider linewidths by some dozens of nanometer. The influence of focusing errors and limit of the measurements have also been investigated.

Key Words: sub- μm linewidth standard, linewidth measurement, modified diffusion model

1. はじめに

半導体生産プロセスなどで使用されている微細パターン測長装置は、半導体の集積度の向上に伴い線幅が微細化するにつれ、生産ラインに必須の検査装置となっている。この装置には、パターンエッジ検出に光を用いる方式と電子ビームを用いる方式があるが、通常前者は $1\mu\text{m}$ 以上、後者はサブ μm 領域の寸法計測に用いられている。これら装置のトレーサビリティは、光学式測長装置では米国標準技術研究所 (NIST) の標準にトレーサブルな市販標準試料により、 $1\mu\text{m}$ 以上の領域で確保されている状態にある。一方、電子ビーム測長装置に使用可能な標準試料としては、電子顕微鏡の倍率校正用の NIST 標準参照試料 484 (SRM 484) があるが、厚みのある形状でシリコンウェハを対象とした測定機では使いにくく、部材の一部に強磁性体 (ニッケル) を使用しているなど、信頼性の面でも問題があった。NIST では引き続き電子顕微鏡の倍率校正を目的とした研究を行い、レーザー干渉計を組み込んだ電子ビーム測長装置を完成し、合せてウェハ状の標

準試料の試作を行っている¹⁾。

このような状況下で筆者らのグループは、半導体工業用のサブ μm 線幅標準の設定を目的とした研究を行い、微細パターンの絶対測長が可能な電子ビーム測長装置²⁾を開発してきた。今回、ここで使用する線幅標準として、サブ μm オーダの線幅をもつシリコンパターンを試作し、上記装置による測定・評価を行うとともに、シミュレーション結果との比較も行った。また、従来から使用されている光学式測定機との測定値の整合性を検討する目的で、サブ μm から $1\mu\text{m}$ オーダにわたる試料も製作し、比較測定を行った。以下、これらについて報告する。

2. 標準試料の製作

線幅標準試料に要求される仕様として、1) 半導体工業でよく用いられる材料を使用すること、2) 良好なエッジ (スロープ) 形状をもつこと、3) 鋭いエッジ信号が得られるように高アスペクト比であることなどを念頭に置いた。そこで、(110) 面をもつシリコンウェハと KOH 溶液を用いた異方性エッチング³⁾に着目し、試料の製作を行った。プロセスは標準的なものである。以下具体的な条件のみを記す。使用したシリコンウェハは厚さ 0.3mm で、3インチ径のものを 12mm 角にスライスし、熱酸化により表面に 400nm 程度の酸化膜をつけた。その後、電子ビーム露光プロセ

[†] 第 51 回応用物理学会学術講演会で発表 (1990・9)

* 計量研究所 つくば市梅園 1-1-4

* National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba

(Received April 26, 1991)

(Revised September 5, 1991)

(a) Standard pattern manufactured by anisotropic etching process

(b) Cleavage plane of the standard pattern

Photo. 1

スによりラインパターンを〈112〉方向に描画し、フッ酸緩衝溶液により酸化膜の穴あけを行い、80°CのKOH、30 wt% イソプロパノール飽和溶液でシリコンの異方性エッチングを行った。ここでのエッチレートは約 1 µm/分であり、パターン高さはエッチング時間により制御した。

Photo. 1(a)に試作したパターンの一例を示す。6種の線幅をもつ孤立ラインパターンとスペースパターンの組からできており、3カ所に測定用のガイドラインを設けてある。一つのチップにはこのようなパターンが写真の上下方向に4カ所、左右方向に2列の合計8カ所描画されている。Photo. 1(b)はパターンの劈開面であり、高さは約 2 µm、角度がほぼ 90°でエッジラフネスの少ない良好な形状が得られていることがわかる。

3. 修正拡散法によるエッジ信号のシミュレーション

前章で作製したシリコンパターンに電子ビームを走査したとき、エッジにおける2次電子信号の挙動を予測するため、修正拡散法によるシミュレーションを行った。エッジ信号を評価する方法としては、モンテカルロ法^{4),5)}、および修正拡散法^{6),7)}を用いる方法がある。前者は、打ち込まれた電子一つ一つにつきエネルギーと散乱方向を追跡していくもので膨大な計算

時間を要するのに対し、後者は2次電子の放出範囲がごく表面に近い部分に限定されることに着目した簡単な方法である。村田らの研究⁶⁾によれば、拡散法による計算結果はモンテカルロ法による結果とよく一致することが証明されており、ここでは解析の簡便さの観点から後者によるシミュレーションを試みた。

一般に、シリコンのように原子番号が小さい物質中に電子を打ち込むと、結晶格子内での挙動は散乱よりも拡散が支配的になり⁶⁾、この領域からの2次電子の脱出範囲は表面から数十 nm 以内であることが知られている⁹⁾。したがって、ビーム打ち込み位置での2次電子脱出表面積を計算すれば、2次電子強度に比例した信号が得られる。拡散法モデルでは Fig. 1(a)に示すように、固体に打ち込まれた電子は表面より1次電子到達距離 Z_r だけ進入するものとして扱う。入射した電子の拡散による2次電子発生中心は表面から Z_d の距離にあり、このときの電子拡散半径 R は、

$$R = Z_r - Z_d \quad (3.1)$$

で表わされる⁶⁾。平面の場合、脱出可能な2次電子は電子打ち込み方向から頂角 2θ

$$\theta = \cos^{-1} \frac{Z_d}{Z_r - Z_d} = \cos^{-1} \frac{Z_d}{R} \quad (3.2)$$

をもつ後方散乱円錐体内で発生し、2次電子脱出表面積はこの円錐の底面積となり、これが2次電子強度に比例する。修正拡散法ではこの考えに基づき、中心が表面から Z_d で半径 R をもつ球体、

$$x^2 + y^2 + (z - Z_d)^2 = R^2 \quad (3.3)$$

(a) Diffusion model of backscattered electron

(b) Simulation of newly modified diffusion method

Fig. 1

の表面形状による切断面積 S を求め、任意の形状をもつ試料上を走査した場合の2次電子強度を計算する⁷⁾。

上述の計算法はビーム径が0の場合であって、ビームが有限径 $2r$ をもつ一様分布の場合、電子拡散領域は横方向にビーム径だけ膨らんだ回転長円体となる。しかし実際のビームはガウシアン分布のような分布関数をもつことが多く、コンボリューション演算を必要とする。このような演算は計算時間を増大させるため、ここでは新たな試みとして Fig. 1(b) のような入射ビームを軸とする回転楕円体

$$\frac{x^2}{(R+r)^2} + \frac{y^2}{(R+r)^2} + \frac{(z-Z_d)^2}{R^2} = 1 \quad (3.4)$$

でビームの強度分布を近似する計算を行った。また、 Z_r, Z_d (μm) は、それぞれ

$$Z_r = \frac{0.115 \times E^{1.35}}{\rho} \quad (3.5)$$

$$Z_d = \frac{40 \times Z_r}{7 \times Z_a} \quad (3.6)$$

で与えた^{4),6)}。ここで E は電子加速電圧 (keV)、 ρ は密度 (g/cm^3)、 Z_a は原子番号である。

Fig. 2 は、加速電圧 1 keV で高さ $2\mu\text{m}$ のシリコンエッジに直径 10 nm の電子ビームを照射したときのシミュレーション結果である。このとき、1次電子到達距離 $Z_r = 49\text{ nm}$ 、2次電子発生中心 $Z_d = 20\text{ nm}$ 、電子拡散半径 $R = 29\text{ nm}$ となり、2次電子ピークの位置は約 12 nm 山側にずれる。このようにして、シミュレーションで得られた2次電子信号波形ピーク位置のパターンエッジからのシフト量 P_s をまとめたのが Fig. 3 である。これより、孤立パターンを測定した場合、信号ピーク間隔はエッジ間隔よりも $2 \times P_s$ nm だけ小さく測定されることが予想される。また、ビーム径が大きくなるにつれピークの位置がパターンの山側にずれ、線幅として小さくなる傾向は、モンテカルロシミュレーションを用いた結果¹⁰⁾とも一致している。

Fig. 2

Fig. 3 Edge peak shift for different beam diameters by the simulation

4. 電子ビームによる測定

4.1 孤立パターンによる線幅表示

レーザー干渉計を組み込んだ電子ビーム測長装置²⁾により、作製したサブ μm の孤立パターンを測定した。試料は断面観察による線幅測定のためのあらかじめ劈開し、上面からの通常の測定は劈開面から約 $1\mu\text{m}$ 離れたところで行った。また、表面の自然酸化膜を除去するため、測定直前に短時間フッ酸緩衝溶液でエッチング処理した。測定条件は、加速電圧 1 keV、ビーム電流 10^{-10} A 台、測定回数 5 回とし、データ点数は 4,096 点、サンプリング間隔 0.8 nm (He-Ne レーザー波長の $1/800$) である。ノイズ成分除去のため、1 サンプル点あたりデータを 10 回サンプリングして平均するとともに、FFT による 20 次の矩形ローパスフィルタリングを用いた。

線幅の定義には、しきい値法、直線回帰法、最大勾配法、peak-to-peak 法などの様々な方法があるが、前 2 者はしきい値の設定、ベースラインの決定などのプロセスに依存するノウハウ的な部分が多く¹¹⁾、また最大勾配法も微分演算を必要とする。そこで、1) 標準にかかわる測定のパラメータはできる限り少ないほうが望ましいという要請、2) シミュレーションとの整合性の検討、3) ピーク間距離を標準寸法現示として使用可能かどうかの検討などの諸条件を考慮し、最も単純なアルゴリズムをもつ peak-to-peak 法を用いた。参照とすべきパターンの線幅真値としては、パターン断面の観測から求めた寸法で代表させることが一般的に行われているので¹¹⁾、ここでもこれにならった。実際には、測長機で劈開面を観測し、パターンの高さが半分の位置を走査、ここで得られる電子ビーム信号からエッジスロープ中央間の断面寸法を測定した。これらの結果を Table 1 に示す。

peak to peak 法による線幅は、断面測定によるエッジ中央間隔よりも平均で 14 nm 小さめに測定されており、ピーク位置はエッジ中央よりも約 7 nm 内側

Table 1 A result of the linewidth measurement by peak to peak definition and cross section observation

unit: μm

Designed linewidth	Linewidth by peak to peak A	Linewidth by cleavage observation B	Difference B-A
0.4	0.411 ± 0.005	0.425	0.014
0.5	0.503 ± 0.005	0.520	0.017
0.6	0.590 ± 0.008	0.598	0.008
0.7	0.693 ± 0.006	0.707	0.014
0.8	0.818 ± 0.004	0.830	0.012
0.9	0.911 ± 0.006	0.918	0.007

に入り込んでいいると考えられる。また、本測長装置の電子ビーム直径公称値 15 nm より予想されるピークシフト量を Fig. 3 より読みとると 14 nm 程度で、実際と 2 倍程度の開きがでた。これについては測定試料のエッジラフネスや測長機の測定精度が関連しているため、ただちにシミュレーションの定量性が悪いとはいえないが、さらにモデルの改善を図っていきたい。また、本件のような急峻なエッジに修正拡散法を適用するに当たっては、電子拡散領域を回転楕円体で完全に定義しきれない部分もあり、これについてもモデルの改善で対処していきたい。

以上の結果より、peak-to-peak 法によるピーク間隔はシミュレーション結果と 10 nm のオーダーで一致し、劈開面より求めた参照寸法とも同士のオーダーで一致することが確認された。実際のパターン形状との対応関係に関しては一層の検討を加える必要があるが、加速電圧や試料電流などの測定条件に対するロバスト性の問題を十分考慮すれば、ピーク間隔による寸法現示が可能であると考えられる。

4.2 ピッチパターンによる線幅現示

孤立パターンによる線幅現示は、パターン幅が小さくなるにつれ Photo. 2 に示すように二つのピーク信号が接近し分離不能となるため、難しくなってくる。この限界を見きわめるため、エッジ信号を Fig. 4 のように三角形で近似して信号の挙動を考察する。線幅 W がエッジ信号の幅 e よりも十分大きいときは二つのめいりょうなピークが観測されるが、 $e \geq W \geq e/2$ になると両方のピークの相互作用が始まり、 $W \leq e/2$ では一つの信号となりピークの分離は不能となる。したがってこの領域では peak-to-peak 法を用いた孤立パターンによる線幅の現示が難しくなり、これによる測長装置の校正はできなくなる。 e の値は測長装置の性能により異なるが、タングステンや LaB_6 電子銃を使用して加速電圧 1 keV でシリコン孤立パターンを観測する場合、通常 0.2~0.1 μm 程度と考えられる。

0.51 μm

0.29 μm

0.20 μm

Photo. 2 Edge signals for different linewidths

Fig. 4 Approximation of edge signals for various line widths

そこで、比較的小さなサブ μm 領域の寸法を校正する方法として、ライン/スペースが規則正しく繰り返されるパターンを用い、これを走査したときのピッチ間

Fig. 5

隔で寸法を現示する方法が用いられる。

正確なピッチパターンをもつ標準試料は、Fig. 5 (a)のようにフォトレジストを塗布したシリコンウェハにレーザーによる干渉縞を投影することにより製作できる¹²⁾。このときのピッチ間隔 p は、レーザー入射角度 ϕ より

$$p = \frac{\lambda}{2 \times \sin \phi} \quad (4.1)$$

で表わされる。パターン製作後の実際のピッチ間隔は試料表面からの回折光の角度により測定する¹²⁾。Fig. 5(b)はこのようにして製作されたシリコンピッチ標準試料であり、回折光角度による測定値 $0.240 \pm 0.001 \mu\text{m}$ に対し、絶対測長装置での測定値は $0.237 \pm 0.004 \mu\text{m}$ ときわめてよく一致し、この試料が $0.3 \mu\text{m}$ 以下の寸法を現示しうる測長標準として優秀であることを示している。

5. 光学的エッジ検出方式との比較

光学式測定機の原理は、Fig. 6 に示すように対物レンズで絞ったビームをパターンに照射し、エッジで散乱される光をフォトディテクタで検出、エッジ信号とするものである¹³⁾。ビームスポット径が光の波長オーダーなのでサブ μm 領域のパターン計測は難しいが、電子ビーム測長装置に比べて真空が必要でなく取扱いが簡便なため、 $1 \mu\text{m}$ 以上のパターン計測によく用いられている。エッジ検出法が電子ビーム方式と異なるため、 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の領域で測定値の整合性の検討などを行ってきたが^{14), 15)}、今回、 μm からサブ μm への

Fig. 6 Principle of optical edge detection

遷移領域での測定特性を調べた。使用した測定機はニコンの LAMPAS M-2 で、この測定機の主要な測定誤差は対物レンズのフォーカスのずれによることが明らかにされている¹⁶⁾。装置の主な仕様を示すと、対物レンズ倍率 50 倍、N. A. は He-Ne レーザー光の波長 $0.6328 \mu\text{m}$ に対して 0.75、走査スポットは SN 比改善のため長円形で¹⁶⁾短径 $1.0 \mu\text{m}$ 、長径 $4.5 \mu\text{m}$ (光強度 $1/e^2$) である。エッジ定義はフォトディテクタのしきい値電圧 0.5 V にて行い、同期検波モードを使用した。また、本測定機は NIST トレーサブルな標準パターンにより校正されており、 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の範囲での平均誤差 40 nm が得られている。

最初の測定では、前節で使ったのと同じパターン高さ $2 \mu\text{m}$ の試料を用いてみたが、焦点深度に比べてパターンの高さが大きく測定値がばらついたうえ、エッジの検出ミスが多く起こった。そこで焦点ずれの影響を調べるため、設計値 $1 \mu\text{m}$ のパターンを用いて焦点の位置を様々に変えて測定を行った。結果を Fig. 7 に示す。これより合焦位置が下に $1 \mu\text{m}$ ずれるにしたがって、約 $0.1 \mu\text{m}$ の割合で測定値が大きくなる傾向がわかる。これは、焦点が下になるほどパターン頂部により合焦前のビームスポットが遮られ、散乱光が返りにくくなることが原因と考えられる。

Fig. 7 Optically measured linewidths for different focuses

Table 2 A comparison of linewidth by EB and optical edge etection

Designed linewidth	Linewidth by optical measurement A	Linewidth by EB measurement B	unit: μm	
			Difference A-B	
0.8	0.84 ± 0.008	0.825 ± 0.006	0.015	
1.0	1.08 ± 0.005	0.979 ± 0.007	0.101	
1.2	1.15 ± 0.005	1.127 ± 0.007	0.023	
1.3	1.33 ± 0.009	1.281 ± 0.002	0.049	
1.4	1.46 ± 0.007	1.423 ± 0.009	0.037	
1.6	1.61 ± 0.009	1.573 ± 0.006	0.037	

そこで焦点ずれの影響を小さくすべく、パターンの高さが焦点深度以内の $0.5 \mu\text{m}$ のものを製作し、測定を行った。この試料は電子ビームでも良好なエッジ信号を発生し、光学式測定機でも焦点ずれを原因とする支障は生じなかった。電子ビームによる peak-to-peak 法との比較結果の一例を Table 2 に示す。 $1 \mu\text{m}$ より大きい領域においては電子ビームによる線幅測定値は光方式よりも数十 nm 程度小さめの値を示すことが明らかにされているが^{14), 15)}、ここでもその傾向が現れている。しかし、 $0.8 \mu\text{m}$ 程度より小さなサブ μm 領域ではエッジの検出がうまく行えない場合が多くあり、測定は困難であった。これは測定対象がビームスポット径に比べて小さいため両側のエッジに同時に光が当たり、一つのエッジと判別されてしまうためと考えられ、光方式の測定限界を示している。この結果より光学式測定機の適用範囲を判断すると、横方向の分解能を決定するビームスポット径に比べてパターン幅が 1.2~2 倍より広い測定対象に適用するのが、測定値の信頼性を確保する観点から妥当なようである。

6. ま と め

サブ μm 領域での線幅標準の設定を行うため、シリコン異方性エッチングによる標準パターンを製作した。また、エッジ信号のシミュレーションを修正拡散法により行い、従来球状であった 2 次電子脱出領域にビーム径および分布を考慮し、回転楕円体を導入した。実際のパターン測定では、peak to peak 法による線幅、断面のスロープ中央間寸法を比較し、エッジ信号との関連を定量的に明らかにするとともに、シミュレーションの有用性も確認した。さらに、孤立パターンによる線幅現示の限界を見極め、これより小さい領域ではピッチパターンによる線幅現示が有効であることを示した。定義方法による線幅の違いについては今後さらに検討していきたい。

従来の光学式測長装置との測定値の整合性を検討するための試料も製作し、電子ビーム測長による値と比較した結果、 $0.8 \mu\text{m}$ 程度までは数十 nm 程度、光方式のほうが大きい値を示すことを明らかにした。これより小さい領域では一般に測定は困難であり、光方式の測定限界がこの付近に存在することを明らかにした。光方式の高分解能化については、今後、測定機の改良、短波長光源の採用、共焦点光学系¹⁷⁾の応用などで対処していきたい。以上の結果を総合して得られる結論は、1) 電子ビーム測長装置用のサブ μm 線幅標準の現示法としてシリコン孤立パターンおよびピッチパターンを用いる方法が有望である、2) 従来からの光方式ではサブ μm 領域の測定困難である、の 2 点である。

今後は上記の結果をふまえ、1) パターン高さが $0.5 \mu\text{m}$ 程度で、2) $1 \mu\text{m}$ より大きい領域で光学式と電子ビーム方式の相互比較が可能、3) サブ μm 領域での電子ビーム用の孤立パターンによる線幅現示が可能、4) $0.3 \mu\text{m}$ 以下のサブ μm 領域でのピッチパターンによる線幅現示が可能などの特長をもつ、使いやすく信頼性の高い標準パターンを製作して、サブ μm 領域の線幅標準を確立していきたい。

シリコン標準パターンの製作技術指導、およびピッチパターンの製作・提供をいただいた日立中央研究所第 3 部、中山義則氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. T. Postek: Scanning Electron Microscope-Based Metrological Electron Microscope System and New Prototype Scanning Electron Microscope Magnification Standard, Scanning Microscopy, **3-4**, 1087/1099 (1989)
- 2) 初澤, 豊田, 谷村: マイクロパターン絶対測長装置の開発, 計測自動制御学会論文集, **26-9**, 983/988 (1990)
- 3) K. E. Bean: Anisotropic Etching of Silicon, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-25-10**, 1185/1193 (1978)
- 4) D. C. Joy: A Model for Calculating Secondary and Backscatterd Electron Yields, Jour. of Microscopy, **147-Pt1**, 51/64 (1987)
- 5) 金井, ほか: SEM 像の理論解析 II, 第 51 回応用物理学会予稿集, **28p-ZF-11**, 511 (1990)
- 6) G. D. Archard: Back Scattering of Electrons, Journal of Appl. Physics, **32-8**, 1505/1509 (1961)
- 7) A. Kuni, et al.: Accurate Length Measuring Machine by the Use of SEM, Microelectronics Measurement Technology Seminar Proceedings, **67/79** (1980)
- 8) K. Murata, et al.: Monte Calro Calculations on Electron Scattering in a Solid Target, JJAP, **10-6**, 678/686 (1971)
- 9) L. L. Lenvison: Scanning Electron Microscopy III, SEM Inc., AMF O'Hare, 925/936 (1982)
- 10) 藤原, ほか: SEM の二次電子信号波形におけるビーム

径の影響, 第50回応用物理学会予稿集, 28P-H-6, 476 (1989)

- 11) M. G. Rosenfield: Analysis of Line Width Measurement Technology Using Low Voltage SEM, SPIE 775, 70/79 (1987)
- 12) Y. Nakayama, et al.: Proposal for a New Sub-micron Dimension Reference for a Electron Beam Metrology System, Jour. Vac. Sci. Tech., **136-6**, 1930/1933 (1988)
- 13) 豊田, 谷村: 微細形状のナノメートル計測技術, 計測と制御, **25-2**, 417/420 (1986)
- 14) 土井, 谷村: 光ビームによる IC パターンの線幅測定, 1989年度精密工学会春季大会予稿集, 547/548 (1989)
- 15) 土井, 谷村: 光ビームによる IC パターンの線幅測定 (II), 1989年度精密工学会秋季大会予稿集, 837/838 (1989)
- 16) 中沢, 谷本, 吉田: レーザによるマイクロパターン測定機, 精密機械, **44-3**, 380/385 (1978)
- 17) 河田, 南: 光学走査顕微鏡, 光学, **18-8**, 380/391 (1989)

土井 琢 磨

1986年, 神戸大学工学部大学院修士課程修了(計測工学専攻). 1987年, 工業技術院計量研究所へ入所. 工学部機械計測研究室所属. 微細形状計測などの研究に従事. 応用物理学会, 精密工学会などの会員.

豊田 幸 司 (正会員)

1967年, 電気通信大学電気通信学部電波工学科卒業. 同年, 工業技術院計量研究所へ入所. 工学部機械計測研究室長. 角度の精密測定, マイクロパターンの測定などの研究に従事. 1991年度計測自動制御学会技術賞受賞. 精密工学会などの会員.

[著 者 紹 介]

初 澤 毅 (正会員)

1983年, 東京工業大学大学院修士課程修了(精密機械システム専攻). 同年, 工業技術院計量研究所へ入所. 工学部機械計測研究室主任研究官. 微細形状計測などの研究に従事. 1991年度計測自動制御学会技術賞受賞. 応用物理学会, 精密工学会などの会員.