集積型マイクロ干渉計と走査型電子顕微鏡を用いた 微小線幅の精密測定*

初澤 毅** 豊田幸司** 谷村吉久** 奈良 誠***
豊永修司*** 原 信也*** 岩崎裕隆*** 近藤一彦***

Precise Measurements of Micro-linewidths by using a Micro-Interferometer and a Scanning Electron Microscope

Takeshi Hatsuzawa, Kouji Toyoda, Yoshihisa Tanimura

Makoto Nara, Syuuji Toyonaga, Shin-ya Hara, Hirotaka Iwasaki and Kazuhiko Kondou

A small interferometer for the use of precise scanning electron microscopy has been developed. Optical components and a piezo-driven mechanical scanner are integrated on a small disk of 130mm in diameter. The device is small enough to be installed in the vacuum chamber of regular scanning electron microscopes (SEMs), and enables absolute linewidth measurements based on laser wavelength. The performance of the system is evaluated and compared to those of an absolute linewidth measurement system we have developed before. The results show good agreement of a couple of nanometers in the sub-micrometer linewidth measurements. This system can be applied to various types of microscopes such as scanning probing microscopes (SPMs), and useful as an important device for calibration service in the precise micro-length measurement.

Key words: linewidth measurement, micro-interferometer, optical path multiplication, scanning electron microscope, traceability, linewidth standard.

1. はじめに

走査型電子顕微鏡 (SEM) は表面の微細な凹凸情報の観察手段として広く用いられており、半導体集積回路の製作工程ではこの装置を専用機化した電子ビーム測長装置が生産ライン用検査装置として多数導入されている。これらの装置は基本的にメーカーの標準との比較測定を行うものであり、電子回路のパターン線幅などを測定した場合、装置ごとの器差による測定値のばらつきを生じるため、統一された校正方法や標準参照試料などが必要となる。国際的には、米国国立標準研究所 (NIST) で電子顕微鏡の倍率校正を目的とした一連の研究がなされており^{1)~3)}、校正用の参照試料も出されているが、サブ μm を対象としておらず半導体測長装置での使用も前提としていない。最近では ISO-9000 シリーズの普及にともない、メーカー各社における標準に対するトレーサビリティの確立も急務となっている。

このような状況のもとで筆者らのグループは、絶対測定のできる電子ビーム測長装置⁴⁾およびシリコン製標準参照試料などの開発⁵⁾に取り組んできた。しかしこの装置は特殊な仕様・構成であり、一般ユーザが社内標準として備えられる装置ではなかった。また、標準試料もユーザ自身の仕様にあったものを個別に作製・供給することは難しく、従来から行われている参照試料と成績書による標準供給手法を実行することは困難である。そこで、これに代わる方法として、長さの基準となるスケールを登載した測定装置そのものを普及し、標準の供給を図る手法が考えられる。長さ測定に関しては、レーザ干渉計を採用することにより 1m の定義⁶⁾に即した絶対測長が行えるため、測定対象物に合わせた干渉測長システムの開発が重要となる。この方針に基づき、ユーザ自身が手持ちの SEM によって線幅などの絶対測定が行えるように、

光路長増倍型ファイバ結合レーザ干渉計とピエゾ駆動方式の平行ばねテーブルを小型の円板上に集積したマイクロ干渉計を開発した。本装置により、ユーザサイドで正確なスケールに基づく長さ情報を得ることができ、微小長さ測定の信頼性を向上することができる。

本論文では、マイクロ干渉計の構造と動作原理、干渉計の性能評価、従来より使用している絶対測長装置との比較測定結果等について示す。

2. 集積型マイクロ干渉計の構造と動作原理

本干渉計は図 1 に示すように、干渉計の測定軸方向に試料の 1 次元微動走査を行うピエゾ素子駆動の微動テーブルと一体構造で構成されている。全体は汎用 SEM の真空試料室に設置可能なように、直径 130mm で厚さが 9.5mm のステンレス (SUS303 相当) 円形基板上にまとめた。

Fig. 1 Outlook of the micro-interferometer with a mechanical scanner

* 原稿受付 平成 5 年 12 月 9 日

** 正会員 計量研究所 (つくば市梅園 1-1-4)

*** (株) ニコン 中央研究所 (東京都品川区西大井 1-6-3)

Fig. 2 Construction of the mechanical scanner

Table 1 Mechanical performance of the scanner in a travelling length of $8\mu\text{m}$ (in unit of second)

Piezo-voltage	Pitching	Yawing	Rolling
Up	0.34	0.60	0.52
Down	0.32	0.63	0.53

2.1 微動テーブル

微動テーブルは図2に示すような平行ばねによる支持方式⁷⁾⁸⁾である。ばね部分は、放電加工機(EDM)により基板に直接溝入れを行うことにより構成し、量産の際に組立による性能のばらつきが生じないように配慮した。基板側面にはピエゾ素子を入る丸穴が設けてあり、スチールボールを介してテーブル部分に接触させ、押しねじで予圧を与えている。ピエゾ素子にはPI社製の $10\mu\text{m}$ のストローク(直流1000V印加時)のものを用いているが、実際の最大テーブル移動量は約 $8\mu\text{m}$ である。

本テーブルの運動性能は測定精度に直接かかわってくるので、光電オートコリメータを用いてピッチング、ヨーイング、ローリングの評価を行った。表1は、試作したテーブル2個について、ピエゾ印加電圧を昇降させたときの2回の測定結果の平均値を示す。長さ測定の際、テーブルの走査運動に起因する最大の誤差要因はヨーイングであるが、 $0.6\text{秒}(3 \times 10^{-5}\text{rad})$ 程度に抑えられており、本テーブルの使用範囲である数 μm の走査では十分な性能を持っていることを確認した。ピッチング、ローリングについても同等のオーダーに納まっているが、これらの上下動成分は焦点深度の深いSEMにおける測定では実際に問題になることは少ない。

テーブルの共振周波数は、ばね部分を片持ちはりとして数値解析を行った結果、約 1.7kHz が得られ、本テーブルの使用範囲では十分な帯域を有することを設計上確認した。

2.2 レーザ干渉計

走査テーブルの走査量を測定するための干渉光学系の配置を図3に示す。光学要素は基板上に設けられたピンと、貫通穴に裏から流し込んだ接着剤により固定されている。

干渉計の動作原理は、これまでに開発してきた光路長増倍型差動干渉計⁹⁾、およびマイクロ干渉計¹⁰⁾¹¹⁾の原理を組み合わせたものである。偏波面保存ファイバによりテーブル上に導入されたHe-Neレーザ光は、コリメータレンズで 3mm の直径に整形された後、偏光ビームスプリッタ系列によりテーブルの左右に対向するように2分割される。各光路にはビーム位置の微調要素として、ビームデビエータ(ビーム位置のシフト用)、およびDプリズム(ビームに振れ角を与える)を設置した。これらの光学要素を通過した後、図4に示すように、テーブル上のプリズムとこれに向かい合わせにされたプリズムの間で5回往復して同一の光路を

No.	Component	No.	Component
1	Fiber connector	6	Right-angle prism
2	Collimator	7	Wedge-prism
3	Beam splitter	8	Moving prism
4	Polarized beam splitter	9	Half-wave plate
5	Beam deviator	10	Quarter-wave plate

Fig. 3 Optical components of the interferometer

Fig. 4 Multiple optical path between two prisms

通った後、図3の上方に設けられた干渉信号の検出系へと向かう。このような多重往復とプリズムの差動配置により、光学的に10倍の分解能改善を図ることができた。

検出系では $\lambda/2$ 板と $\lambda/4$ 板を組み合わせたプリズム系により干渉じまの周期が 90° ずつずれた4相の信号が得られ、それぞれフォトダイオードで検出する。この信号はプリアンプで増幅後、信号処理回路で互いの位相が 180° 異なるもの同志を加算し、振幅が2倍で直流成分のない2相の信号に合成してノイズの低減を図った¹¹⁾。これをカウンタの入力信号として使い、電気的な分割により40倍の分解能改善を図っている。従って、ここまでの干渉計分解能は、

$$\begin{array}{ccccc}
 \lambda/2 & & 1/40 & & 1/2 \\
 \text{干渉計の} & \times & \text{電子回路} & \times & \text{差動配置} \\
 \text{基本分解能} & & \text{による改善} & & \text{による改善} \\
 & & 1/5 & & \lambda/800 \\
 & \times & \text{光路長増倍} & = & \text{干渉計の} \\
 & & \text{による改善} & & \text{全分解能}
 \end{array}$$

のように表される。カウンタからの出力信号は 90° ずれた2相の信号として出力され、これをコンピュータに取り込む際にさらに2倍しているため、システムとしてのトータルの分解能は $\lambda/1600$ (He-Neレーザの波長で約 0.4nm)である。

Table 2 Results of the cross-check between two interferometer systems

HP 5528A system		Micro-system		Difference μm	Sample times
Average μm	S.D.(σ) nm	Average μm	S.D.(σ) nm		
0.98	88	1.03	0	-0.05	4
2.04	59	2.02	7	0.02	9
3.04	38	3.05	14	-0.01	4
3.97	53	3.96	4	0.01	6
5.04	68	5.00	7	0.04	5
6.13	35	6.16	4	-0.03	7
7.07	71	7.09	4	-0.02	5
7.93	30	7.97	8	-0.04	5
8.35	59	8.33	7	0.02	5

2.3 干渉計の安定性と性能評価

本干渉計のレーザ光源は直線偏光タイプの一般的な市販品(ユニフェイズ社製)であるが、発振波長をよう素安定化 He-Ne レーザ(ニコン社製)を基準器として校正した。12 時間にわたる波長安定度の測定結果は 10^{-6} オーダであり、十分な安定性を持つことを確認した。フォトダイオードからカウンタに至る電気系の安定性についての評価も行い、6 時間で約 1mV の電圧変化が観測されたが、カウンタの値に変化を与えることはなかった。

SEM の真空試料室に設置した状態で、本干渉計の安定性の評価を行った結果を図 5 に示す。従来の経験から干渉計のドリフトには温度の影響が大きいことが分かっている⁹⁾、ここでは SEM の直上に設置されている HEPA フィルタの運転台数を変えてクリーンルーム室温を変化させることにより、SEM 試料室周辺温度に変動を与えている。運転開始後 3 時間程度までは 5nm/h 程度の急激な変化をしており、これが立ち上げ時間と考えられる。この後、温度ステップを与えると約 12 時間後に安定しており、これが本系の熱的な安定時間と考えられる。再度、逆方向の温度ステップを与えた部分ではドリフト方向が反転しており、本干渉計の主要なドリフト原因は温度に起因することが確認された。実際の測定は十数秒以内で完了するので、これらのドリフトは実用上問題ない範囲にある。

レーザ干渉計の測定性能を評価するため、市販の代表的なレーザ干渉測長システムである HP 社の 5528A を用いて、大気中での相互比較を行った。この測長システムは電子ビーム絶対測長装置⁴⁾の主軸干渉計として使用しており、これまでの測定における事実上の原器となっている。測定は干渉計のテーブル上にコーナキューブを乗せ、ピエゾ素子を約 1 μm ずつ駆動することによ

Fig. 5 Thermal drift of the micro-interferometer

り相互の値を読みとった。表 2 にこの結果を示す。HP 側の標準偏差が大きいのは、これはマイクロ干渉計に比べて大気中でのレーザ光路が長く、空気の揺らぎを受けているためと考えられる。また、HP 側は測長システムオリジナルの分解能 $\lambda/40$ の測定であり、光路長増倍差動配置を用いていないため、不利な条件下での測定である。さらに同一の軸上での測定ではないため、アップの誤差が生じている可能性がある。しかし、HP 側の標準偏差の値を物理的な光路長増倍数である 10 で割ると、マイクロ干渉計の標準偏差と同等のオーダになるため、両者の指示値には著しい違いが生じているわけではないことが分かる。

以上、一連の評価の結果から、本干渉計は微小寸法の測定システムとして十分な性能を持っていることを確認した。

3. 電子ビーム測長装置としての応用

本干渉計を汎用の SEM 真空試料室に設置し、試料の機械的走査が可能な電子ビーム測長装置を構成した。通常の電子ビーム測長装置では電子ビームをプローブとして試料上をラスタ走査し、このときに得られる 2 次電子強度を用いて画像を構成してパターンの寸法情報を読みとっている。しかし、この画像は電子ビームの走査速度、すなわち掃引電圧が基準であるため、長さのディメンションとは直接対応していない。そこで、電子ビーム絶対測長装置⁴⁾では電子ビームを一点に留め置き、試料を機械的に走査する。この時、走査量をレーザ干渉計で正確に測定していれば、走査により得られる 2 次電子強度分布に光のスケールが当たることになり、長さの基準に基づいた計測が可能である。現在、長さの基準は光速で定義⁶⁾されているが、実用上は各種の安定化レーザの波長で代用される。そこで、本干渉計のように基準レーザで波長を校正し、波長やその安定度が保証された測定系を用いると、長さの基準にトレーサブルである測定が可能となる。

マイクロ干渉計を SEM 真空試料室に設置した様子を図 6 に示す。試料室真空隔壁には光ファイバ、フォトダイオードとピエゾ素子を駆動するための電線を引き通すフランジが設けられている。測定系はパソコンによるクロズドループ系で構成されており、ソフトウェアサーボによりテーブルの位置決めを行うとともに、2 次電子強度をサンプリングする。1 走査あたりの測定時間は従来と同等の条件を用いた場合(サンプリング間隔 $\lambda/800$, 4096 点)、これまでの測長装置⁴⁾の 40 秒に比べて約 1/4 の 11 秒を実現しており、高速化が図られるとともにビーム走査に伴う試料の汚染を低減できた。また、参照試料を用いてサブ μm の線幅を測定した場合の標準偏差は、加速電圧 5kV の場合約 5nm が得

Fig. 6 Micro-interferometer installed in the SEM

Fig. 7 Silicon standard micro-linewidth reference

Table 3 Measurement conditions of the two systems

	Absolute EB measurement system	Micro-interferometer system
Sampling interval	$\lambda/800$ 0.8nm	$\lambda/1600$ 0.4nm
Sampled data	4096	4096
Scan length	3.24 μ m	1.62 μ m
Scan time	40s	6s
Iteration	5 times	5 times
EB gun	LaB ₆	Tungsten
Acc. voltage	1kV	2kV
Probe current	5×10^{-12} A	10^{-11} A
Working distance	6mm	25mm
Detector position	above the lens	below the lens

られており、従来の装置⁵⁾の6nmとほぼ同等の性能が得られた。

測定の確からしさを評価するため、図7に示すシリコン製標準参照試料⁵⁾を用いて、電子ビーム絶対測長装置とマイクロ干渉計による測定系で比較測定を行った。はじめに絶対測長装置で測定を行い、このときに試料についた走査のコンタミネーションを測定位置のマークとして用い、汎用SEMでの測定を行った。この結果、測定位置はパターン長手方向でほぼ同一(約0.2 μ m以内)に納まった。測定条件の比較を表3に示す。本来これらの条件は完全に同一にして測定すべきであるが、汎用SEMと専用測長装置の電子光学系(レンズ系、2次電子検出器位置など)が異なるため、今回用いた汎用SEM(日本電子製JSM-840A)では1kVの加速電圧において明りょうな信号が得られず、2kVの加速電圧を用いた。

サブ μ mの線幅測定結果の相互比較を表4に示す。両者の測定値は10nmのけたで一致するとともに相互の標準偏差の範囲内に納まっており、条件の異なる系にしては測定におけるロバスト性が保たれていると判断できる。マイクロ干渉計による測定の平均的な標準偏差が多少大きいのは、電子銃がタングステン製であり、絶対測長装置の電子源よりもサイズが大きく、ビーム径が太い¹²⁾ことが理由と考えられる。これに関しては、電子銃をLaB₆に交換することや、作動距離をより短くしてレンズの収差を低減するなどの対策があげられる。

以上、一連の実測結果からマイクロ干渉計を用いた汎用SEM

Table 4 Comparison of the measurements using the silicon micro-steps

	Absolute EB measurement system	Micro-interferometer system
Position	Average + S.D. (μ m) + (nm)	Average + S.D. (μ m) + (nm)
1	0.498 $\pm$ 3.3	0.500 $\pm$ 10.3
2	0.649 $\pm$ 6.5	0.647 $\pm$ 13.1
3	0.734 $\pm$ 7.6	0.733 $\pm$ 7.3
4	0.816 $\pm$ 5.8	0.818 $\pm$ 7.9
S.D.average	5.8nm	9.7nm

での測定は、絶対測長装置を用いてこれまでに行ってきた測定と同等の信頼性があることが確かめられた。

4. む す び

微小寸法計測の信頼性向上のため、ユーザ側で長さの絶対測定が可能な走査テーブル付きの集積型マイクロ干渉計を開発し、汎用SEMでのシリコン試料の線幅測定によりその性能を確認した。本干渉計は、小型で光学軸のアライメントが不要、熱源であるレーザ光源の影響が無い、真空環境への影響が少ない、高速・高分解能で正確な計測が行えるなどの優れた特長を有する。また本装置はSEMの応用のみならず、光学顕微鏡、SPM等への応用も可能であり、これらの装置に正確なスケールを提供する装置であると位置づけられる。さらに仕様の変更により、より大きな走査量にも対応可能である。今後、さらなる微小長さ計測の信頼性向上のためには、絶対的な標準スケールを登載したこの種の計測デバイスの開発が重要である。

参考文献

- 1) M.T.Postek: Scanning Electron Microscope-based Metrological Electron Microscope System and New Prototype Scanning Electron Microscope Magnification Standards, Scanning Electron Microscopy, 3,4,(1989) 1086.
- 2) M.T.Postek: Submicrometer Dimensional Metrology in the Scanning Electron Microscope, SPIE, 775,(1987) 166.
- 3) D.Nyyssonen and M.T.Postek: SEM-based System for Calibration of Linewidth SRMs for IC Industry, SPIE, 565,(1985) 180.
- 4) 初澤 毅, 豊田幸司, 谷村吉久: 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 (1990) 983.
- 5) 初澤 毅, 土井琢磨, 豊田幸司: サブ μ m領域における線幅標準とその測定, 計測自動制御学会論文集,28,1 (1992) 3.
- 6) News from BIPM, Metrologia, 20,(1984) 25.
- 7) 坂野憲幾, 谷村吉久, 荒武崇幸: 板ばねを利用した微動テーブルの性能, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1987) 487.
- 8) K.Toyoda and Y.Tanimura: Micro-scanning Table Realizing Smooth Motion to a Few Nanometer, Bull. Jpn.Soc.Prec.Eng., 22,1,(1988) 64.
- 9) 谷村吉久: 光路差増倍の差動式レーザ干渉計, 精密機械,48,12 (1982) 1573.
- 10) 谷村吉久, 黒沢俊郎: 光ファイバと結合した小型レーザ干渉計, 精密工学会誌,55,12 (1989) 2157.
- 11) 黒沢俊郎, 清水 徹, 菊池孝志, 谷村吉久: 汎用型光ファイバ結合レーザ干渉測長機, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1988) 2157.
- 12) 外村 彰編: 電子顕微鏡技術, 丸善, (1989) 121.