電子ビームによる半導体パターン計測*

中山義則**

Inspection and Measurement of ULSI Pattern by Electron-Beam System/Yoshinori NAKAYAMA

Key words: electron-beam, ULSI, metrology, CD, standard reference, SEM

1. はじめに

半導体デバイスの微細化は年々進み、表1に示すように一部のデバイスではすでに100 nmレベルの超微細加工が要求されている¹⁾。この超微細加工では、パターン形成における寸法精度(CD: Critical Dimension)と位置精度(合わせ精度)が重要な管理パラメータであり、2004年の90 nm世代ではCDで3 nm (3 σ)、位置精度で30 nm (3 σ)程度と高精度なプロセス制御が必要となる。特にCD制御では加工寸法の1/10以下が要求されるためにその計測手段としての光学分解能限界がリソグラフィーより早く訪れ、1980年代後半から光学顕微鏡に代わって電子ビームによる計測評価が導入されてきた。この中で半導体パターンの寸法測長では非破壊でウエハ観察を行う必要があるため従来の電子顕微鏡とは異なる概念の低加速専用装置²⁾が開発され、その後高分解能化、処理の高速化・高機能化といった進歩を遂げ、今日の半導体プロセス評価に不可欠なものになっている。

本稿では、半導体デバイスの超微細加工における電子ビーム応用、特にCD制御に用いられる電子ビーム寸法測長についてその現状と今後の課題について述べる。

2. 半導体プロセスにおける電子ビーム応用装置

電子ビームを物質に照射すると図1に示すように、弾性散乱による反射電子と物質との相互作用による二次電子および特性X線が発生する。半導体プロセスに導入されている電子ビーム装置ではこれらの物質との相互作用を応用した描画装置や、相互作用により発生する反射電子、二次

電子および特性X線の検出を応用した検査・評価装置等がある³⁾。

2.1 物質との相互作用応用：電子ビーム描画装置

電子ビーム描画装置では電子ビームとレジスト(高分子樹脂)との相互作用(架橋、分解、触媒生成)によりパターン形成を行う。微細ビームによりナノメートルレベルの描画が可能で、ビーム偏向によるパターン創生機能を生かし半導体先行研究や光マスク用描画に用いられている⁴⁾。また量産対応スループット向上を目指し、EB用ステンシルマスクを用いたパターン投影型描画装置も開発されている⁵⁾⁶⁾。これらの電子ビーム描画装置ではレーザ干渉計を搭載したステージの移動量とビーム偏向値の校正により高いパターン位置精度を実現し、レーザ干渉計の分解能0.6 nmを用いたビーム校正により描画パターン位置精度10 nm (3 σ)以下を達成した例もある⁷⁾。これに対しCD精度は、マスク開口精度や偏向精度およびビームボケといった装置起因のほかに、レジスト内でのビーム散乱や下地基板材料、化学増幅型レジストにおける酸拡散を含めた現象プロセス等の複合的要素があり、描画後の寸法検査による描画プロセスへのフィードバックにより精度出しが行われる。より解像性の高い高加速電子ビームによりCD精度5 nm (3 σ)程度が得られている。

表1 半導体超微細加工ロードマップ (ITRS 2001より)

年次	2001	2004	2007
	(nm)	(nm)	(nm)
DRAM メモリデザインルール	130	90	65
重ね精度	46	32	23
寸法精度(CD 15%)	15.9	11	8
MPU デバイス			
デザインルール	150	90	65
寸法精度(CD 10%)	5.3	3	2
SoC デバイス			
デザインルール	150	90	65
寸法精度(CD 10%)	7.3	4.3	2.6

* 原稿受付 平成13年12月24日

** (株)日立製作所中央研究所(東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280)
1979年名古屋大学工学研究科前期博士課程応用物理学専攻修了、同年(株)日立製作所に入社。1997年より2000年まで技術研究組合超先端電子技術開発機構に出向。同年復帰し現在に至る。工学博士。研究分野：電子ビーム応用および半導体プロセス。

図1 電子ビームと物質の相互作用

図2 測長SEMによる100-nmパターン測定例(数値はラインパターン測長値、波形は二次電子信号を表す)

材料	δ max	E_1 (kV)	E_2 (kV)
Si	1.1	0.09	0.65
Al	0.95	—	—
W	1.3	0.25	>1.5
SiO ₂	2.9	0.05	2.3
Al ₂ O ₃	4.8	0.02	1.2
BaO-SrO	8	0.06	3.5

図3 入射電子の加速電圧と二次電子発生効率

2.2 散乱電子検出応用：電子ビーム計測装置

電子ビームと物質との相互作用により発生する二次電子や反射電子といった散乱電子は半導体パターンの形状を反映した情報を含んでいる。反射電子は入射電子が試料内で後方に弾性散乱された電子で入射電子と同程度のエネルギーを持っている。このため反射電子を効率的に計測するためには広い散乱断面積をカバーできる検出器が必要になる。これに対し二次電子は試料内で起こる相互作用のうち、非弾性散乱によって生じるオージェ電子等からなるもので、数eV程度のエネルギーのものが主である。このため検出器近傍に強い電場をかけることで効率的に検出器に二次電子を集めることができる。走査型電子顕微鏡や電子ビーム測長装置、電子ビーム欠陥検査装置などによる半導体パターンの寸法測長や欠陥計測⁹⁾には、これらの二次電子や反射電子検出が応用される。

2.3 透過電子応用：透過型電子顕微鏡

試料を薄く削り、高エネルギーの電子ビームを照射したときに物質を透過する際の相互作用には原子オーダの構造情報が含まれる。従って試料破壊検査となるが、半導体デバイスの薄膜界面解析や化合物半導体の超格子構造解析⁹⁾に威力を発揮している。

2.4 特性X線、けい光検出応用：電子ビーム分析装置

入射電子が試料の原子内殻電子を散乱させたりして直接遷移型の電子励起を起こすと、特性X線や強いけい光を発する。これらの電磁波およびオージェ電子の分析により試料の微細構造を知ることができる。特に特性X線やオージェ電子の分光では、元素分析やエネルギー帯構造の分析ができることから、透過電子解析と同様、半導体デバイスの不良解析を中心に活用されている。

3. 電子ビーム測長装置を用いた半導体プロセス評価

前述したように電子ビーム測長装置(通称、測長SEM)は電子ビームを試料上に走査したときに得られる二次電子信号波形からパターンエッジを特定するものである。最新の半導体パターンの最小寸法は図2に示すように

100 nm以下の領域に入ってきており、この微小寸法を高精度に測長するために測長SEMは低収差電子光学系による高精細ビーム化とバイアス電圧印加による二次電子収集効率化等による高分解能化が進み、加速電圧800Vで像分解能3 nmが得られている。このほかArFリソグラフィ用レジスト材料のようなビーム照射によりパターン変形しやすい試料にむけ、500V以下の低加速化やコンタクトホールのような円形パターンの直径算出や、微細なパターンの凹凸であるエッジラフネス算出といった高機能も導入されてきている。

これらの電子ビーム測長技術には以下の技術課題がある。

3.1 試料帯電およびダメージ

電子ビームを用いた半導体プロセス評価では、測定対象が酸化膜や高分子樹脂等の絶縁材料を含むために試料表面での帯電の影響や試料への損傷が問題となる。

帯電とは、負の電荷を有する電子ビームが物質に照射された際に発生する二次電子の量と入射した電子数が一致しない場合に起こる現象である。二次電子信号強度には図3に示すように加速電圧依存性があり、一般に二次電子発生効率が1となる加速電圧値が2つ(E_1 , E_2)ある。ここで二次電子発生効率が1の場合には、入射電子に対して発生する二次電子数が等価であるので帯電の影響のない信号が得られる。これに対し二次電子発生効率が1以上の場合には、試料は電子ビーム照射により正に帯電するが、二次電子の再付着により中和される。二次電子発生効率が1以下の場合には、試料は負に帯電する。負の帯電は中和されることがないので、入射電子の数が増えるほど帯電も大きくなり、入射電子がこの表面電位により曲げられるなど、計測に悪影響を及ぼす。二次電子発生効率および E_1 , E_2 は表に示すように材料により異なる。金属のような導電体では、二次電子発生効率はどの加速電圧領域でも1に近い値をとり、帯電の影響はもたらさない。絶縁物の場合には材料により適正加速電圧が異なるが、帯電の影響の少ない1 kV以下の低加速電圧領域が使われている。

また電子ビームが照射された際にゲート酸化膜中に中性トラップが生成され酸化膜の信頼性を低減する照射ダメージ

図4 寸法標準試料のSEM写真とピッチ校正法

ジやレジストがビーム照射で変形するなどの現象が起こる。これらも電子ビームの加速電圧と電流値に大きく依存するため、素子へのダメージの影響がほとんどない低加速電圧の電子ビームを用いるほか、画像メモリを用いて必要時以外はビームを試料に照射しないなどの工夫がなされている。

3.2 測長アルゴリズム

測長SEMでの二次電子信号波形からのパターンエッジ検出には、①一定の信号強度との交点を用いるスライスレベル法、②二次電子信号波形の一次微分の最大値を用いる最大傾斜法、③二次電子信号波形の最大値を用いるピーク検出法、④パターンの部分波形を直線で近似しグラウンド部との交点を用いる直線近似法、などのアルゴリズムやそれらの組み合わせが適用されている。またこれらのほかにシミュレータを用いた波形解析なども開発されてきている¹⁰⁾¹¹⁾。しかしながら二次電子信号からパターンエッジを特定する測長アルゴリズムは理論的に確立していない。それは前述したように加速電圧、ビーム電流、ビームボケ、下地材料、パターン材料およびその表面状態、真空度等の二次電子信号波形決定要素と断面形状との対応が系統的にできないことに起因している。従って各ユーザは測定パターンの測長SEMでの測長値と断面形状との対応から、経験的に測長アルゴリズムパラメータを決定している。

3.3 絶対寸法校正

測長SEMにおいてその絶対寸法を保証するためには標準試料を用いた校正が必要である。測長SEM用標準試料として、①微細である、②帯電しない、③安定で高コントラストの二次電子信号が得られる、④絶対寸法値が何らかの手段で保証されている、などの条件があげられる。

これらを満足する標準試料としては、レーザ干渉露光法と異方性湿式エッチングにより作製した(110)Si基板上の微細回折格子¹²⁾が最適である。この試料は、図4に示すように垂直断面で深溝の回折格子であることから高コントラストでコンタミネーション付着や帯電の影響が少ない

二次電子信号波形が得られること、また図4に示すようにレーザ光による回折角測定から求められるピッチ寸法が絶対寸法として1nm以下の高精度で保証されるといった特徴がある。この標準試料を測長SEM校正に用いることにより、ひとつの測長機の定期的管理から異なる生産拠点での複数台装置間校正まで高精度な寸法管理が可能となる。

4. 今後の課題

これまで述べてきたように、半導体デバイス用超微細加工ではナノメートルレベルの高精度パターンニングおよび評価技術が不可欠であり、今後もその要求精度はより厳しいものになっていく。これに応えるために電子ビーム装置は測長SEMを中心に威力を発揮しており、今後も高分解能化や高機能化が期待される。特にこれからの半導体デバイスでは絶対寸法への要求がさらに高まることが予想され、より普遍的なパターンエッジ特定アルゴリズムの開発が必要になる。

参考文献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors 2001 Edition, ed. International SEMATECH.
- 2) T. Ohtaka, S. Saito, T. Furuya and O. Yamada: Hitachi S-6000 field emission CD-measurement SEM, SPIE, **565**, (1985) 205.
- 3) Y. Usami and I. Kawata: Semiconductor inspection system for yield enhancement, Solid State Phenomena, **78~79**, (2001) 149.
- 4) A. Fujii, K. Mizuno, T. Nakahara, S. Asai, Y. Kadowaki, H. Shimada, H. Touda, K. Iizumi, H. Takahashi, K. Oonuki, T. Kawahara, K. Kawasaki, K. Nagata and H. Satoh: Advanced e-beam reticle writing system for next-generation reticle fabrication, SPIE, **4409**, (2001) 258.
- 5) Y. Nakayama, S. Okazaki, N. Saitou and H. Wakabayashi: Electron-beam cell projection lithography: a new high-throughput electron-beam direct-writing technology using a specially tailored Si aperture, J. Vac. Sci. Technol., **B 8**, 6, (1990) 1836.
- 6) S. D. Golladay, H. C. Pfeiffer, J. D. Rockrohr and W. Stickel: PREVAIL alpha system: status and design considerations, J. Vac. Sci. Technol., **B 18**, 6, (2000) 3072.
- 7) Y. Nakayama, H. Aoyama, S. Tsuboi, H. Watanabe, Y. Kikuchi, M. Ezaki, Y. Matsui, T. Morosawa, K. Saito, S. Ohki and T. Matsuda: Delineation performance of advanced 100 kV EB writer on x-ray membrane mask, SPIE, **3997**, (2000) 105.
- 8) H. Nishiyama, M. Nozoe, K. Aramaki, O. Watanabe and Y. Ikeda: Open-contact failure of via holes by using voltage contrast, SPIE, **4344**, (2001) 12.
- 9) H. Kakibayashi and F. Nagata: Simulation studies of a composition analysis by thickness-fringe (CAT) in an electron microscope image of GaAs/Al_xGa_{1-x}As superstructure, Jpn. J. Appl. Phys., **25**, (1986) 1644.
- 10) L. Grella, G. Lorusso, T. C. Chuang and D. L. Adler: Three-dimensional simulation of SEM imaging and charging, SPIE, **4344**, (2001) 267.
- 11) Y. U. Ko, D. C. Joy and N. T. Sullivan: Secondary-electron image profiles using bias voltage technique in deep contact hole, *ibid.*, 37.
- 12) Y. Nakayama and K. Toyoda: New submicron dimension reference for electron-beam metrology system, SPIE, **2196**, (1994) 74.