電子ビームを用いた半導体プロセス評価装置 --S-8000シリーズ--

Evaluation Equipment for Semiconductor Process Using Electron Beam

大高 正'	* Tadashi	Ôtaka	橋本	卜信義*	Nobuyoshi	Hashimoto
笹田勝弘	* Katsuhir	o Sasada	森	弘義*	Hiroyoshi	Mori



S-8820形電子線測長装置

高分解能,高精度測定,高スループットを実現したクォータミクロン時代に対応する電子線測長装置により,縮小投影露光装置,エッチング 装置で加工した微細パターンを高精度に測定することができる。

半導体デバイスの製造ラインは、デザインルール 0.5 µmの本格的な量産態勢に入り、さらに0.35 µm デバイスの量産化を迎えようとしている。このよう なデバイスの微細化および三次元化に伴い、パター ンの微細加工に高い精度と技術が要求されるととも に、加工した形状を高い分解能で観察し、高精度に 寸法測定する高度な評価技術も必要不可欠になって きた。さらに、増大する設備投資を抑制するために、 従来日立製作所は、この評価装置としてSEM(走 査電子顕微鏡)を基に電子線測長装置を製品化(S-6000シリーズ)してきた。今回、いっそうの性能向上 を図り、クォータミクロン時代に対応可能な電子線 測長装置を開発した。この装置では、電子光学系、 電子源、ウェーハ搬送機構を新たに開発し、像の高 分解能化、寸法測定の高精度化、高スループット化 を実現するとともに、ワークステーションを採用し、

評価装置にもトータルスループットの高いことが要 求されるようになった。

* 日立製作所 計測器事業部

操作性を向上することによってインラインに対応で きるようにした。

49

1 はじめに

半導体の製造プロセスは、16 MビットDRAMに代表 される0.5 µmプロセスが量産態勢に入り、現在さらにク ォータミクロンへの量産展開を目指して開発が行われて いる。このようなデバイスの微細化に伴って、縮小投影 露光装置、エッチング装置などの加工装置に高度な微細 加工技術が要求される一方で、微細に加工されたパター ンを観察し、形状寸法を測定してプロセス条件を設定す る電子線測長装置^{1),2)}に対して、より高度な評価技術³⁾が 求められるようになってきた。

デバイスの設計寸法と,電子線測長装置に要求される 分解能(二次電子像分解能),および測長精度の関係を 図1に示す。次世代の量産プロセスである0.35 µmプロ セスでは,分解能で 5 nm,測長再現精度で 5 ~ 6 nmが要 求される。また,次世代に対応するために,以下の項目 についても要求を満たす必要がある。 表 | S-8000シリーズの主な仕様 ウェーハのサイズに応じて2機種をラインアップしている。

機種	S-8820	S-8620		
ウェーハサイズ	6,8インチ	5,6インチ		
二次電子像分解能	5 nm(加速電圧800 V)			
測長再現精度	5 nm(10回測定 3 σ)			
スループット	毎時20枚(ウェーハ面内5点測定)			
加速電圧	700~1	,300 V		
像 倍 率	$ imes$ I,000 \sim $ imes$ I50,000			
電 子 源	SEチ	ップ		
制 御 部	ワークスラ	テーション		

注:略語説明

SE(Schottky Emission)

ここでは、これらの要求事項を実現するために開発した、新型の電子線測長装置「S-8000シリーズ」について述べる。

2 新型シリーズの概要

(1) 微細化に伴って高いアスペクト比となるコンタクト ホールの観察⁴⁾のため,高分解能であると同時に深い焦 点深度を持つこと。

(2) デバイスの品質向上と管理のために増大する測定点数を短時間に処理するため,高スループットであること。
(3) 生産性の向上,省力化,品質向上,無塵(じん)化のため自動測定が可能であること。



装置形式と分解能 (nm)

S-8000シリーズ電子線測長装置の仕様を表1に示す。

この電子線測長装置は,SEMである鏡体部を基本に, 8インチウェーハ対応の試料室,ロードロック部(真空子 備室),真空排気系,ウェーハ搬送系,制御系,および操 作部から構成されている。

新シリーズでは,前述の課題を解決するために**表2**に 示す開発を行った。その主要点について以下に述べる。

3 新型電子線測長装置の特長

3.1 電子源の安定化

電子銃部の電子源には、SEチップを採用した。SEチップ

表2 新シリーズの開発項目

クォータミクロン時代に対応するため,新シリーズでは表に示す 各項目について開発を行った。

項目			開発内容		
高高	分 精	解	能 度	化 化	高性能スノーケル型対物レンズ リターディング方式 3段収束レンズ系
安		定		化	SEチップ ファラデーカップ内蔵によるプローブ電流制御
高ス	スル・	ーブ	ット	化	新ロードロック機構 リアルタイムオートフォーカス制御
自		動		化	画像処理装置による自動測定 光学顕微鏡によるウェーハアラインメント
操	作	性	向	上	WSによるGUI操作
È:	略語 WS(語説明 Wor	児 ksta	tion)	. GUI(Graphical User Interface)

注:記号説明 → (現在までの推移), → (将来を予測) 図 | デバイスの設計寸法と電子線測長装置に要求される測 長再現精度,および分解能 0.35 µmのプロセスでは,装置に対して分解能で 5 nmが,測長再 現精度で 5 ~ 6 nmが要求されている。

50

は、チップを常時1,800 Kに加熱し、チップの先端に電界 を印加して電子ビームを引き出す電子源である。従来の CFE(Cold Field Emission) チップと比較して,長時間に わたってエミッション電流の安定した、変動のない電子 ビームが得られる特長を持つ。また、CFEチップで必要 な8~10時間ごとのチップ表面の清浄化処理(フラッシ ング)を行う必要がないため,装置の稼動率が向上する利 点がある。

3.2 電子光学系の高分解能化

今回開発した電子光学系の構成を図2に示す。電子ビ ームを小さく収束させるため, 電子光学系には対物レン ズと2段のコンデンサレンズを用い,合計3段のレンズ 収束光学系を採用した。対物レンズには, 下磁極開放型 のスノーケル(Snorkel)レンズを用いた。このレンズは, レンズの軸上磁場分布が下磁極の位置で最大になるよう に設計されており, 焦点距離が小さく, 収差係数の小さ い高性能なレンズである。分解能をさらに向上する手段 として、試料に負の電圧 $-V_R$ を印加し、電子銃から放出 される電子の加速電圧 V_o を増し、試料に $(V_o - V_R)$ の エネルギーの電子を入射するリターディング方式を採用 した。この方式により,低加速電圧の分解能の低下を防 止することができる。この結果,二次電子像の分解能は 加速電圧800 Vで5nmを得た。

スペクト比の高いホールの底面を良好に観察することが 可能になった。

3.3 EクロスB(E×B)フィルタによる検出効率の向上

対物レンズでは, 試料から放出された二次電子は対物 レンズの磁界によって収束されて上方に引き上げられ, 対物レンズの上方に設置された二次電子検出器(SE検出 器)によって検出される。この方式をTTL(Through The Lens) 方式と呼んでいる。従来の方式では、二次電子検出 器の前面に正電圧を印加して二次電子を検出器に導いて いるが、この電界によって入射電子(一次電子)が偏向さ れ、光軸からずれる問題があった。

この問題に対して、今回新たにSE検出器の前に $E \times B$ フィルタを設けた。E×Bフィルタの構造を図3に示す。 同図中の1対の電極によって電界(E)が印加される。こ の電極の正電極側はメッシュ形状になっており、2次電 子はこのメッシュを通り抜けて検出される。一方、磁界 (B)を電界に直交する方向に印加する。入射電子はこの 電界と磁界の力,およびSE検出器の電界の力を受ける が,入射電子に作用する電界と磁界の力を打ち消し合う ように、フィルタの電場と磁場の強さを調整することに より、入射電子の光軸からのずれを防ぐことができる。 また、 試料から発生した二次電子は E×Bフィルタの下 方から飛び込むため,二次電子に電界と磁界の力が同じ 方向に作用する。この力により, 二次電子が強制的に検 出器に導かれる。このE×Bフィルタの採用により,入射 電子に軸ずれを与えることなく, 二次電子を効率的に検 出することが可能になった。

一方, 試料上で発生する二次電子は, リターディング 電圧-V_Rの電界によって追い出されると同時に、試料 に対向に配置された正電圧 V_Fの電極(FCM電極)の電界 によって引き出される効果がある。このため、特に、ア



図2 高分解能電子光学

系の概要 3段レンズ光学系,スノー ケル型対物レンズ,リターディ ング方式の採用により,加速 電圧800 Vで分解能 5 nmの高 性能な電子光学系を実現した。

51

798 日立評論 VOL. 77 No. 11(1995-11)



図3 $E \times B$ フィルタの構成と原理

E×Bフィルタの採用により、入射電子(一次電子)に影響を与えることなく二次電子を効率的に検出することが可能になった。

ステーション

ホルダ

3.4 新ロードロック機構による高スループット化

高スループットを実現するキーポイントに次の二点が ある。

し, 真空内の搬送アームによって測定を終了したウェー ハと交換される。2枚のウェーハを真空中で交換するた め,真空排気とリークに要する時間が削除でき,交換時 間は従来機比で約一に短縮した。

(1) 大気中にあるウェーハを,真空の試料室内に短時間 で搬入し、搬出すること。

(2) 真空のロードロック室で2枚のウェーハの交換を行 うことにより,真空排気とリークに要する時間を省く こと。

今回開発した新ロードロック機構の構造を図4に示す。 ローダ室に1枚のウェーハ分の容量の小型チャンバを設 け,このチャンバを通じてウェーハが大気中と真空中を 移動する機構にした。チャンバの容積は従来機のチャン バの約点で、真空排気に要する時間は10秒以下になり、 高速な真空排気が可能になった。

真空排気後, ウェーハはステーションホルダ上で待機

小型チャンバ 上ぶた ウェーハ ロードロック室 試料室 F TN IT

連続処理時のスループットの測定結果を図5に示す。 これは8インチウェーハ上の測定点を5点測定した結果 である。1枚のウェーハの測定に要する時間は160秒であ り,連続処理モードでのスループットに換算して毎時 22.5枚の結果を得た。

3.5 新オートフォーカス制御による高スループット化

従来オートフォーカスは,対物レンズのコイルに流す 電流を制御してフォーカスを変化させ、像(SEM像)のコ ントラストが最大になる位置を検出して像の焦点合わせ を行っている。しかし、この方法では検出に時間がかか り(従来,約7秒),試料が絶縁体膜の場合は電子線が帯 電してオートフォーカスが不十分となる問題があった。 そのため、S-8000シリーズでは新たに半導体レーザを





ウェーハ

52

1枚の処理時間 160 s

図4 新ロードロック機構の構造 小型チャンバによる高速排気と,真空内で2枚のウェーハを交換 する搬送機構の採用により, 高スループットを実現した。

図5 スループット測定結果(連続処理時) 連続処理時の処理時間が | 枚当たり | 60秒(毎時22.5枚)という結 果を得た。



図6 リアルタイムオートフォーカス制御機構の原理 リアルタイムオートフォーカス制御により,実行時間0.5秒以下 の高速なオートフォーカスが可能になった。

用いたオートフォーカス制御機構を採用した。その構造 を図6に示す。ウェーハ表面の高さが変化すると、レー 角)にレーザ光の入射角度を設定し,薄膜(多層膜)の影響 を受けないようにした。また,微細なパターンの繰り返 し構造や,パターンのエッジでのレーザ光の乱反射によ る測定誤差を防ぐため,測定点の検出信号だけでなく, 測定点の近傍でも検出を行って平均化することにより, 検出精度を向上した。

3.6 測定の自動化

製造工程のインライン化に対応するため,S-8000シリ ーズでは新たに画像処理機能を加え,測定の自動化を行 った。

画像処理機能により、(1)ウェーハの自動アラインメント、(2)測定パターンの自動探索が可能となった。

画像処理機能は、あらかじめ登録した参照画像と測定 画像の画像間マッチングによって測定パターンを抽出 し、測定点の位置決めを行うもので、測定点を0.1µm以内 の精度で位置決めできる。

ザ光の半導体位置検出器に入射する位置が変化するため、検出器の出力に応じて対物レンズのコイルに流す電流を制御することにより、フォーカスの制御を行う。制御に要する時間は従来機比の¹10以下の約0.5秒に短縮した。

オートフォーカスの精度を向上させるため,レーザ光 がレジスト膜や酸化膜の表面では反射せず,膜を透過し てシリコンの下地表面で反射する角度(ブリュースター



*1 Ethernetは、米国 Xerox Corp.の商品名称である。

従来の画像認識では、SEM像が電子線の照射によって 試料が帯電するため、像のコントラストが変化し、測定 パターンを誤認識する問題がある。マッチングによる画 像認識には、像のコントラストを利用したコントラスト 法が用いられていた。しかし、コントラスト法は画像の 検出精度が良い反面、像のコントラストの変化を受けや すく、誤認識しやすい。この対策として、コントラスト の変化に強いエッジ法を採用した。エッジ法は、パター ンの角(エッジ)を強調して検出する方法で、コントラスト トの変化の影響を受けにくい。このため、実際のプロセ スではコントラストの変化のない導電性のメタル配線ウ エーハにはコントラスト法を用い、非導電性の絶縁膜工 程のウェーハにはエッジ法を用いることにより、コント ラストの変化する試料についても自動測定を可能に した。

3.7 操作性の向上

制御系のブロック図を図7に示す。システムのホスト コンピュータにWSを採用し、マウスを用いたGUI操作 によって操作性を向上した。従来機のようにコマンドを キーボードから入力する必要はなく、ウィンドウ画面で 視覚的な操作ができる。

WSは1Gバイトのハードディスクと3.5インチ光磁気 ディスクの大容量外部メモリを備え,数千個単位でユー ザーファイルが登録できるほか,観察したSEM画像の画 像データが保存できる。自動測定後に測定した画像を確 認することも可能である。また,マルチタスク処理機能 によって測定中に次のウェーハの条件を設定したり,

53

*2 RS-2320は、米国電子工業界を中心として、ベル研究所、モデムメーカー、 コンピュータメーカーなどが集まってデータ端末とデータ伝送機器間のイ ンタフェースとして標準化されたものである。

図7 制御系ブロック図 システムのホストコンピュータにWSを採用し,GUI画面によって 操作性を向上した。



(レジスト・ポリシリコン・Si)

(レジスト・ポリシリコン・Si)

0.4 µm ラインパターンとホールパターンの観察例 図 8 分解能の向上により、ラインパターンとホールパターンの像では ともに下地のポリシリコンの構造(粒界)が明瞭(りょう)に観察で きる。

測定した結果の報告書(ワークシート)の作成を並列して 処理することが可能である。さらに将来, FAなどのシス テム化に対応するため,上位コンピュータとの通信が可



自動測定の結果,測長再現精度はラインパターンで3σ=0.00719µm を,ホールパターンで3 σ =0.00855 μ mを得た。

結果を図9に示す。サンプルはシリコンウェーハ上のi線

能なように、Ethernet、SECS*)通信機能を備えている。

応用例 4

ポリシリコン上に形成されたレジスト(PFI-15)のラ インパターンとホールパターンの観察例を図8に示す。 加速電圧は800 Vである。像の分解能の向上により、ライ ン、ホールともに下地のポリシリコンの構造が明瞭に観 察できる。また焦点深度が深いため,段差約1µmのレジ ストの上面と底面が明瞭に観察できる。

このパターンを10回繰り返して測定した再現精度は、 ラインパターンで 3 σ =0.0039 μ m(幅0.442 μ m)であ り、ホールパターンで 3 σ =0.0066 µm(底径0.420 µm) であった。

ラインパターンとホールパターンを全自動で測定した

※)SECS:米国半導体製造装置・材料協会(SEMI)が制定し た半導体製造ラインのプロセスコントロール用ソフトウ ェアの推奨標準規格である。

用レジスト(PFI-15)で,加速電圧は800 Vである。10回 の測定を行った結果, ライン測定は3σ=0.00719 μm, ホ ール測定は $3\sigma = 0.00855 \mu m$ であった。

おわりに 5

ここでは、 クォータミクロン時代に対応する電子線測 長装置「S-8000シリーズ」について述べた。この装置は、 微細化するパターンの寸法を高精度に測定するものとし て、像質の良いことが第一条件である。今回のS-8000シ リーズでは、この基本性能のほかにインラインの測長装 置として必要な、測定の安定化、高スループット化、測 定の自動化,および操作性の向上を実現した。

電子線を用いた測定技術は、クォータミクロン時代に移 行する半導体製造プロセスに対して,品質管理の必須(す) の技術としてますます発展すると思われる。今後も、い っそうの性能向上を目指し,測定技術の開発に取り組ん でいく考えである。

 $\mathbf{54}$

- 大高:走查電子顕微鏡,電子写真, 32, 4, 別刷(1993) 1)古屋,外:電子ビームを用いた半導体プロセス評価装置, 2)日立評論, 73, 9, 867~872(平3-9)
- 3) Mizuno eds. : Precise Linewidth Measurement Using a Scanning Electron Probe, IEICE, Vol. E76-C,

No.4(1993-4)

Sato eds. : An Evaluation Depth of Filed in SEM 4) Image Depending on Accelerating Voltage, Electron Microsc., 43, 141~145(1994)