小特集 半導体製造装置

# 半導体プロセス評価装置

# **Evaluation Equipment for Semiconductor Process**

従来,半導体プロセスの評価に対して,パターンの形状,寸法管理には光学顕微 鏡が用いられてきたが,高集積化によりパターン幅が微細化し,光学的手法では限 界に達している。そこで収束電子ビームを用いたSEMがクローズアップされ,異物 やパターンの欠陥などの外観検査,パターン幅の寸法精度管理に使われるようにな り,プロセス評価用SEMとしてS-806形,パターン寸法管理用としてS-6000形測長 装置を開発した。

また、プロセス中の微量な不純物の元素分析を可能にする分析装置として、イオンマイクロアナライザ(IMA-3形)を開発した。

大 高	正*	Tadashi Ootaka
泉栄	*	Eiichi Izumi
古 屋 寿	宏*	Toshihiro Furuya
石川勝	彦**	Katsuhiko Ishikawa
田村一二	<u>=</u> ***	Hifumi Tamura

# 1 緒 言

半導体プロセスの高密度化を実現する微細加工技術の進歩 は目覚ましく、デバイスのパターン幅は256k DRAM (Dynamic Random Access Memory)の2 $\mu$ mから1~4M ビットでは1.3~0.8 $\mu$ mクラスとサブミクロン加工に達してい る<sup>1</sup>。こうした微細加工技術の中で、プロセス評価の対象とし ては、 してS-806形プロセス評価SEMを、パターンの寸法精度評価用 としてS-6000形電子ビーム測長装置<sup>2)</sup>を開発した。後者の(3)に ついては、各プロセスでの構成材料の不純物などによる微細 な欠陥を高感度で元素分析して解明するIMA-3形イオンマ イクロアナライザ(Ion Microanalyzer:以下、IMAと略す。) を開発した。図1に各プロセス技術と電子・イオンビームを

(1) パターンの欠陥やじんあい(塵埃),残さ(渣)などの形状, 外観の評価

(2) パターンの合わせ精度, 寸法精度などの寸法管理(3) 欠陥部の組成分析による不純物などの材質的な評価 などが挙げられる。

前者の(1),(2)については,従来光学技術を用いた評価法で あったが,パターンの微細化に伴い,光方式では不十分な分 野が現われ始め,これを解決する評価技術として収束電子ビ ームを用いたSEM(Scanning Electron Microscope:走査形 電子顕微鏡)がクローズアップされ,パターンの外観検査用と 用いたプロセス評価装置との関係を示す。薄膜界面や結晶欠陥などの原子レベルでの物性究明に超高分解能透過形電子顕微鏡も用いられるが、ここではSEMとIMAについて述べる。

# 2 電子ビームによるプロセス評価及び測長SEM

LSIに用いられる材料は、SiO<sub>2</sub>(酸化シリコン)、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(窒化 シリコン)などの絶縁物やレジスト材料であり、これらの観察 では電子が材料表面に帯電(チャージアップ)する現象が多く なり、観察、測長を困難にしている。その対策として、電子 ビームの加速電圧を1,000V程度と低くし、入射電子と試料か

37



図1 電子・イオンビーム評価装置とプロセス評価の関係 各プロセスに対応して、各種の評価装置が用いられている。

\* 日立製作所那珂工場 \*\* 日立製作所デバイス開発センタ \*\*\* 日立製作所中央研究所 工学博士

726 日立評論 VOL. 68 No. 9 (1986-9)

ら放出される二次電子がバランスする領域で帯電を防止して いる。プロセス評価装置の必要条件は,非破壊,未処理,高 分解能でかつ電子ビームによる試料損傷を与えないなどであ り,装置の対応としては,大形試料ステージ(6 inウェーハ対 応),低加速・高輝度電子銃による高分解能化,高スループッ ト,低発塵化が必要である。プロセス評価の中で,形態観察 を主体とする装置では,パターンの形状をあらゆる方向から 観察できるように試料の高角度傾斜や回転の機能が必要とさ れ,パターンの寸法管理を目的とする測長SEMでは高精度測 長,高スループット,低発塵,電子線による試料損傷の防止 が重要となり,図2に示すように,その評価目的によって装 置構成が異なる。いずれの場合でも試料への帯電を防止し, 試料損傷を少なくするために低加速電圧下で使用することが 基本であり,低加速電圧で高輝度の電子源が必要になる。

# 3 電界放射形電子銃による低加速電圧・高分解能像

一般に加速電圧を低くすると、分解能が低下する。従来から一般的に用いられてきたLaB<sub>6</sub>(六ホウ化ランタン)やタング ステンフィラメントを陰極とした熱電子では、放出電子のエ ネルギー幅 $\Delta V$ が1~2eVと大きく、低加速電圧でのSEM像 の分解能を低下させる大きな要因となっている。一方、冷陰 極を用いたFEG(Field Emission Gun:電界放射形電子銃)<sup>3)</sup> では、 $\Delta V$ が0.2eVと小さく、エネルギーのそろった電子ビー ムにより高分解能が得られる。表1に電子源の比較を示す。 更に、FEGは熱電子銃に比べて100~1,000倍の輝度、電子源 の大きさは $\frac{1}{1,000}$ (約3nm)と小さく、かつ電子源の寿命が長い ことから保守の点でも有利であり、プロセス評価用SEMには 理想的な電子源である。図3に、加速電圧と分解能の関係を



図3 加速電圧と像分解能の関係 プロセス評価に適した I kVの加速 電圧で, 10~15nmの高分解能がFEでは得られる。

表 | 各電子源の比較 FE(電界放射)電子源は,輝度,電子源径,エネ ルギー幅の点で優れており,また長寿命で,SEMの電子源に最適である。

項	E		電子源	FE形 (電界放射形)	熱 電 子 (LaB6)	熱 電 子 (タングステン)
輝		度(A	/cm <sup>2</sup> ·sr)	10 <sup>9</sup>	107	1 0 <sup>6</sup>
電	子	源	径(nm)	< 10	I 0 <sup>4</sup>	$> 10^{4}$
電子	のエス	ネルギ	-幅(eV)	0.2	I ~ 2	1 ~ 2
寿			命(h)	>1,000	1,000	40
真	2	핟	度(P <sup>a</sup> )	10 <sup>-7</sup>	I 0 <sup>-5</sup>	10-3



示す。加速電圧1kVで15nm以上の分解能が得られ,各プロセスでのウェーハを高分解能で観察,測長が可能になった。また,電子源の輝度が高いことは高速走査(テレビスキャン)でも高分解能像が得られ,CRT(Cathode Ray Tube)上の静止 画像により,すばやい観察と測定ができ,スループットの向上につながっている。

## 4 S-806形プロセス評価SEM

プロセス評価SEMは,前述したように微細パターンの加工 形状やエッチング残渣,あるいは異物などの外観検査を主体 とするものであり、大口径ウェーハ(最大6in)を非破壊で、し かもあらゆる方向から観察する機能が必要になる。特にエッ チング後のパターンの形状を調べるには、ウェーハを高い傾 斜角度で観察したり,あるいはウェーハを任意の方向に回転 させて、観察したい場所を選択しなければならない。このた めS-806形では、コニカル形対物レンズを用いてウェーハを最 大60度まで傾斜する機能をもたせ、X軸、Y軸の移動距離150 mm, 回転360度, Z軸の移動量 5~35mm(ワーキングディス タンス)とした大形試料ステージを採用した。ステージ移動は, コンピュータ制御によるパルスモータ駆動とし、視野の選択 を容易にしている。図4にS-806形の外観を示す。半導体デバ イスのSEM観察では、試料損傷、帯電現象をなくして良好な 観察を行なうために、デバイスの構造材料や加工法の組合せ により最適加速電圧を選ばなければならないが、1kV付近では ほとんどのデバイスに対してチャージアップのない良好な表 面像を観察することができる。図5に1µmのライン・スペー スのレジストパターンの観察例を示す。表2にS-806形の主な

	]	-
●パターン エッチング形状	●パターン寸法	
●残渣	<ul> <li>●線幅測長</li> </ul>	
● 元素分析		

図 2 プロセス評価SEMと測長SEM プロセス評価SEM(S-806形) は観察が主体であり、測長SEM(S-6000形)は、高スループット、高精度測長を 目的とし、評価目的によって装置構成も異なる。

### 半導体プロセス評価装置 727



図 4 S-806形プロセス評価SEMの外観 6 inウェーハまで, パター ンなどをあらゆる方向から観察することができる。



表 2 S-806形プロセス評価SEMの主な仕様 6in対応の大形5軸 ステージが組み込まれている。

	項 目		内容
光学系	分 解	能	6nm(加速電圧25kV) 20nm(加速電圧 l kV)
	加速電	圧	0.5~5 kV(0.1kVステップ):プロセス評価用 5 ~25kV(1 kVステップ):ウェーハ断面評価・ 分解能SEM用)
	電 子	銃	電界放射形電子銃
	ウェーハサイ	ズ	最大 6 in径
ス テ I	ステージ移動量X Z T R	·Υ	150mmストローク 5~35mm(連続) 0~60°(コーセントリック傾斜) 360°(連続)
ジ	ステージ 駆	動	5 軸とも電動機駆動 CPU制御プログラム可
	ウェーハロー	- ド	手動(予備排気室付き)
測	方	式	カーソル手動(画像メモリ付き静止画像測長オプ ション)
長	範	囲	0.5µm~1.5mm
排気系	電 子 試 料	銃 室	IP(イオンポンプ) DP(TMPオプション)

注:略語説明 CPU(中央処理装置), DP(油拡散ポンプ), TMP(ターボ分子ポンプ)

ど)

S-6000形でもS-806形と同様に、低加速電圧で高分解能が得 られる電界放射形電子銃を用いている。図6にS-6000形の外 観を示す。



図5 レジストパターンの観察例 SiO2上のレジストパターンで、パ ターンのエッチング形状がよく観察できる(加速電圧1.2kV, 傾斜角度50度)。

仕様を示す。

## 5 S-6000形電子ビーム測長装置

S-6000形電子ビーム測長装置は,前述したS-806形の外観検 査を主体とした装置に対して, ウェーハやマスクの微細パタ ーンの寸法測長による精度管理を目的としたものである。加 工形状を含む寸法測長は光技術を用いた評価法から,数万倍 に拡大できるSEMの観察技術を利用した電子ビーム測長機が クローズアップされ、デバイスの研究開発、製造工程でのプ ロセス管理などに導入され始めている。 S-6000は製造プロセスライン、すなわちクリーンルーム内 で使用することを前提とし,開発に当たっては以下に示す内 容を考慮した。

高精度・高速測定(ハイスループット) (1)

(2) 電子線による試料損傷の防止

(3) 無処理(無蒸着)試料高分解能·高速観察

(4) 大形試料(6 in ウェーハ・マスク)の全域観察が可能な大 形・高速ステージ

(5) 自動化により容易な操作と高信頼性

(6) 低発塵化による異物付着及び汚染防止(ステージ・ローダ の低発塵機構とドライバキューム)

(7) クリーンルーム内設置への対応(コンパクト化, 耐震性な



#### 図 6 S-6000形電子ビーム測長装置の外観 カセットローダによる自 動搬送方式により、Iウェーハ、5点測定でスループットは8枚/hで処理できる。

728 日立評論 VOL. 68 No. 9 (1986-9)

40

## 5.1 ミニマムドーズシステムによる試料保護

電子ビームによるSEM像観察では、デバイスに電子ビーム を照射することにより試料損傷が生じる。この損傷は、電子 ビームの加速電圧が高いほど、また電子ビームの照射量が多 いほど大きい。電子ビーム照射量(ドーズ量=照射電流(A)× 時間(s))を最小にして、観察及び測定を行なうミニマムドーズ システムを開発した。この構成を図7に示す。ミニマムドー ズシステムは、測定ウェーハを載せている試料ステージ移動 後の測定すべき視野の選択、及び画像メモリへの像信号の取 込みまでの短時間だけ電子線を照射し、測長及び次のチップ へのステージ移動時には、ビームブランキングによって試料 に電子線を照射しない方式であり、従来法と比べ約一けた少 ないドーズ量で測定できる。また、測長は画像メモリによる 再生像を用いて行なうが、画像処理によるSN比改善を図りミ ニマムドーズで良質な画像を得ている。

### 5.2 発塵防止とドライバキューム

LSIの微細化とともに、問題とされる付着異物の粒径も小さ くなり、一般にはパターン寸法の $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{1}{10}$ の粒子を取り除くこ とが必要であると言われている。こうした課題に対し、ウェ ーハ搬送機構やステージ機構などに徹底した低発塵機構を採 用した。また、ウェーハの導入される各真空室のクリーン化 を図るため、ハイドロカーボン分子の少ないターボ分子ポン プによるドライ排気系とした。FEGや電子光学系にはイオン ポンプを使用している。ウェーハ搬送やステージ移動による 一連の測定を実施したとき、異物粒径0.5 $\mu$ m以上の塵埃に対 し、5 inウェーハ上で平均1個程度という結果が得られ、クリ ーン化を達成した。

### 5.3 測長方法と測長例

図8にパターン測長の手順を示す。測定条件入力から測長, 更に測長データの処理と出力までの一連操作は、すべてコン



図7 ミニマムドーズシステムの原理 視野選択から画像メモリ取込みまでの短時間だけ,電子線を照射する方式である。従来方式と比べ,大幅な低ド ーズ量で測定できる。



図8 測定手順とデータ出力例 出力は測長条件(測定日,ウェーハNo.,ロットNo.など),測長結果(生データ,最大値,最小値,平均値,3σなど)が打ち 出される。

ピュータにより指令、処理される。また、各種の条件設定も、 CRT上の画面と対話しながら容易に操作できる。同図(a)に測 定条件入力の一例を示す。ウェーハ上のチップ配列内の黒く 塗りつぶされた5チップが測長用に指定されたチップを表わ しているが、測長点は最大500点まで指定することができる。 寸法測長は数万倍に拡大されたパターンの二次電子像のライ ンプロファイルを信号処理して,パターンのエッジを自動検 出して倍率から演算表示,又はプリンタ出力する。図9にラ インプロファイルによる自動測長例を示す。FEGとテレビジ ョンスキャン像,画像処理技術の組合せにより,数万倍の良 質画像で,高精度な測長ができ,更にパターンの形状からの 良否の判定もできる。図8の手順で実行されたデータはフロ ッピーディスクに収納され、高速にデータ処理されてCRT画 面上に出力したり、プリンタで出力することができる。図8 (b)にデータの出力例を示す。測長再現精度は±0.02µm以内 (3 o), 測長範囲は0.1~200µmである。また, これらの出力 データは外部CPUに通信ポート(RS232C)を介して接続され、 データファイルができるように構成されている。表3にS-6000 形の主な仕様を示す。



## 6 イオンビームによるプロセス評価とIMA

数キロ電子ボルトから数十キロ電子ボルトに加速されたイ オンビームを試料に照射すると、試料から試料構成原子、電 子,光,イオンなどを放出する。この現象をスパッタリング と称している。スパッタリングによって放出するイオンは, 試料構成原子が帯電したものであるから, このイオンを質量 分析することによって試料表面の元素分析をすることができ る。また、スパッタリング現象は、試料表面を刻々削り取っ ていくことであるから,放出イオン強度をトレースすること によって、元素の深さ方向の濃度分布分析をすることができ る。このように試料に一次イオンを照射し、 試料から放出す る二次イオンを分析する表面分析装置をSIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer:二次イオン質量分析装置)と称して いる。SIMSの中で特にミクロン領域の微小部分析のできる装 置をIMAと呼んでいる。プロセス評価用IMAとしては、極微 量の不純物を高感度で分析できること,着目元素に同質量の 妨害イオンが重畳する場合に高分解能で分離分析できること, 高精度の深さ方向分析ができること,絶縁物試料に対しても 安定に分析できること、微小領域を高精度、高感度で分析で きること、スループットが高いことなどが必要である。

7 IMA-3形イオンマイクロアナライザ



図9 ラインプロファイルによる自動測長の例 画面上4万倍(写 真上2万倍)で1µmのライン・スペースを自動測定している(試料はSi3N4上の レジストパターン,加速電圧は800V)。

表3 S-6000形電子ビーム測長機の主な仕様 IkVの加速電圧で 150Å(テレビジョン画像上)の高分解能が得られ,±0.02µmの精度で測長ができる。

項	目	内容
ウェ -	- ハサイズ	6 in, 5 in, 4 in
	方 式	カーソル方式 ラインプロファイル方式(自動測長)
	範囲	0.5~200µm
測 長	精度	± 1 %又は±0.02µmの大きいほうの値
	データ処理	平均値,最大値・最小値などの演算,プリント
		出力可能
	スループット	5枚/h以上
二次電	電子分解能	150Å(15nm):加速電圧 I kV
倍	率	$ imes$ I 00 $\sim$ $ imes$ I 00 , 000
= la dest	移動範囲	X, Y: 0 ~150mm
試 料	駆動	電動機, コンピュータ制御
ステージ	測定位置	コンピュータへのプリセット入力可能 自動可動
吉 应	ウェーハローダ	予備排気室付き
具 空	真空ポンプ	ターボ分子ポンプ,イオンポンプ
排	制御	全自動コンピュータ制御
加速	· を電圧	700~2,000∨(100∨ステップ)

プロセス評価用IMAではウェーハ中の不純物,多層膜及び 界面不純物,不純物の拡散などの分析に用いられるため,分 析感度が高いことが必要となる。IMA-3形ではB, Mg, Al, Ga, Inなど電気陽性元素分析用の $O_2^+$ 一次イオン源と, C, O, Si, S, Seなど電気陰性元素分析用のCs<sup>+</sup>一次イオン源とを装 着し4),更に試料傾斜機構による二次イオンの垂直引出系及び 立体収束二次イオン質量分析計を採用して高感度化を達成し ている。図10にIMA-3形の外観を示す。図11はSi中へドーズ 1.25×10<sup>14</sup> Atoms/cm<sup>2</sup>, エネルギー 170 keVでイオン打込み したAlの深さ方向分析例である。この分析はO2+一次イオンで 行ない、Alの検出限界10<sup>14</sup> Atoms/cm<sup>3</sup>領域が得られている。 Siウェーハのn形ドーパントPを分析する場合,同質量の<sup>30</sup>SiH が重畳し一般の分析ではPの検出限界は下がらない。IMA-3 形は、半径216mmのトロイダル電場と半径200mmの磁場から 成る二重収束形質量分析計を採用し,高分解能化を図ってい る。最高分解能 $M/\Delta M$  1万が得られており、 $^{31}$ Pと $^{30}$ SiHはこ の分解能で完全に分離できる。図12はSi中にドーズ1×10<sup>14</sup>



## 図10 IMA-3形イオンマイクロアナライザの外観 装置は右から IMA本体,ディスプレイユニット,制御データ処理ユニットで構成される。

730 日立評論 VOL. 68 No. 9 (1986-9)

Atoms/cm<sup>2</sup> エネルギー 120 keVでイオン打込みしたPの深さ 方向分析例である。この分析はCs<sup>+</sup>一次イオンを用い高分解能 モードで<sup>30</sup>SiHの妨害を除去しており、Pの検出限界は10<sup>16</sup> Atoms/cm<sup>3</sup>以下である。半導体デバイスではSiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub> N4, PSGなどを保護膜として、また層間及びゲート絶縁材と して用いている。これら絶縁材料の分析では,前述の帯電現 象が問題となる。IMA-3形では、電子線重畳照射法、負イオ ン照射法と二つの帯電防止法を採用している。前者は、試料 の一次イオン照射位置に電子線を重畳照射させ、 電荷中和を 行なっている。後者では、一次イオンとして0-イオンを照射 する。一般に絶縁物材料に十数キロ電子ボルトの一次イオン を照射したときの二次電子放出能は1以上であり、 試料は正 に帯電する。試料近傍にメッシュ電極を配置し試料電位を印 加し, 試料近傍を無電場空間とすると二次電子は試料面に戻 り、自動的に電荷の中和ができる<sup>5)</sup>。図13はアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 上のPSG・NSG多層膜の分析結果を示す。この分析には電子





図13 NSG, PSG及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の分析 絶縁物多層膜でも安定に分析できる。



図II Si中のAIの深さ方向分析 AIの検出限界は10<sup>14</sup> Atoms/cm<sup>3</sup>領域となる。イオン打込元素の深さ方向分析はIMAの最も有効な分析の一つである。



線重畳照射法により電荷中和を行なっている。<sup>28</sup>Si, <sup>31</sup>P, <sup>27</sup>Al のプロファイルが層の存在を証明している。一次イオンの電 流密度を低くした分析では数十オングストロームの多層膜の 評価に,細束一次オンビームでは,デバイス上のミクロンオ ーダの欠陥解析に用いられる。以上のようにIMA-3形は高性 能,多機能評価装置として注目されている。

# 8 結 言

以上,半導体プロセス評価装置として,電界放射形電子銃 を搭載し低加速電圧の電子ビームによって高分解能で試料損 傷の少ない観察評価ができるS-806形プロセス評価装置,± 0.02µmの精度で0.1~200µmの範囲の測長ができるS-6000形 パターン寸法測長装置,及びSi中の1×10<sup>16</sup> Atoms/cm<sup>3</sup>以下 のPの高感度分析や絶縁物分析のできる微量不純物分析評価 用IMA-3形について記述した。今後更に,小形高密度化,高 性能化の傾向にある半導体デバイスのプロセス評価で,これ ら評価装置がますます有効となることが期待される。これら の評価装置が半導体分野の躍進の一助となることを期待している。

### 参考文献

- 1) 渡部,外:半導体プロセス評価専用走査電子顕微鏡,Semiconductor World, 3巻, 10号, プレスジャーナル, 110~118 (1980-10)
- 2) 渡部,外:プロセス評価の電子ビーム検査・測定技術, Semiconductor World, 4巻, 8号, プレスジャーナル, 102 ~114(1985-8)

図12 Si中のPの深さ方向分析 高分解能モードで<sup>30</sup>SiHの妨害を除去して分析したPの分析結果で、10<sup>16</sup>Atoms/cm<sup>3</sup>以下まで検出する。

- 111(1000 0)
- J. F. Hainfeld : Understanding And Using Field Emission Sources, Scanning Electron Microscopy/1977, Vol. 1, IITRI/SEM, 591~595(1977)
- 4) 田村,外:SIMSによるGaAs結晶の評価と課題,電子材料, Vol.24, No.12,工業調査会,35~42(1985-12)
  5) 泉,外:二次イオン質量分析計における絶縁物分析,日本質量 分析学会第28回年会講演要旨集,38~41(1980-6)