

# 電子線を用いたウェーハ欠陥検査装置 (EBeye) の開発 (第2報)

寺尾 健二\* 狩俣 努\*\* 曾布川 拓司\*\*

## Development of an Electron Beam Inspection System (EBeye)

by Kenji TERAO, Tsutomu KARIMATA, & Hiroshi SOBUKAWA

Ebara's EBeye300, a semi-conductor wafer inspection system, applying projection electron microscope technology, is currently undergoing development. A previous report on the same system discussed that the inspection speed of this system could in principle be 3 - 6 times faster than that of a conventional electron beam inspection system (applying scanning electron microscope technology). An actual EBeye300 system based on this design concept was made and used in inspection performance tests on test wafers. The following introduces the geometry of this system, the performance of each component, and performance test results.

**Keywords:** Defect, Inspection, Semiconductor, Electron beam, Projection, Scanning electron microscope, Pixel size, Yield management, Voltage contrast

### 1. はじめに

第1報で、電子線を用いたウェーハ欠陥検査装置 (EBeye) のコンセプト (図1) と原理について概説した<sup>1)</sup>。

本報では、そのコンセプトに基づいて開発した EBeye300 (写真1) について、装置構成と基本性能、及び欠陥検査の実例を報告する。

### 2. 装置構成

EBeye300は、電子線によってウェーハ表面の拡大像を生成する電子光学系、電子の像を撮影して装置内に取り込む電子線検出器、取り込んだ像から半導体回路の欠陥を検出する画像処理エンジン、ウェーハの搬送やウェーハを高精度に位置決めしながら移動させるXYステージ等の機構系から構成される。

次に、これらの主要な構成要素について概説する。

#### 2-1 電子光学系

EBeye300の電子光学系は、電子線を生成する電子銃、電子線の断面形状を制御してウェーハ面上に電子線を垂直入射させる照明光学系、入射した電子のエネルギーに

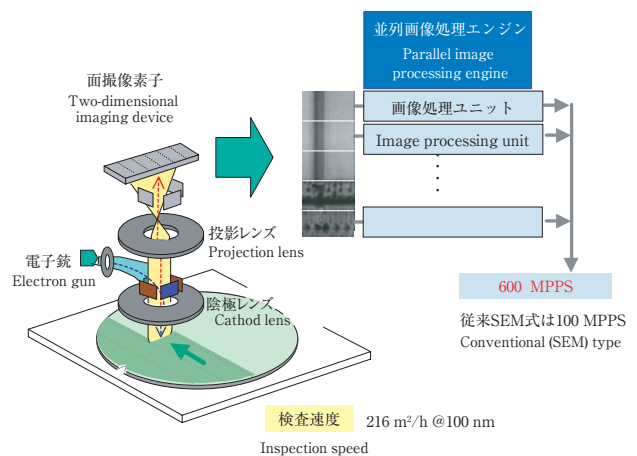


図1 EBeyeのコンセプト：並列画像処理  
Fig. 1 EBeye concept : Parallel image processing



写真1 EBeye300外観  
Photo 1 Appearance of EBeye300

\* 精密・電子事業カンパニー 検査装置事業部 ソリューション事業室

\*\* 同 同 システム技術室  
設計グループ

\*\* 同 同 同

よりウェーハ面上から放出される2次電子を検出器に拡大投影する写像投影光学系の3要素によって構成される。これらは光学顕微鏡における光源、照明光学系、拡大光学系に相当する。ただし、光学顕微鏡が光を光学レンズで制御しているのに対して、EBeye300は電子線を電界と磁界によって制御する。

電子銃には、熱電子放出型の六ホウ化ランタン (LaB<sub>6</sub>) を用いている。図2に示すように、カソード (陰極) に電流を流して1800 K程度に加熱し、アノード (陽極) との間に強電界を形成することによって、カソード表面から電子が飛び出す。ウェーネルト電極はカソードからの電子放出をコントロールする役目を果たす。

照明光学系は、電子線を写像光学系の交点まで導く役割を担っている。

電子線のサイズと形状の変更は、電子の軌道に沿って多段に配置された四極子レンズによって行う。四極子レンズは円周方向に4分割された円弧状の電極からなっている。対向する電極を正に印加するとその方向に電子線が引き伸ばされ、負に印加すると縮められる作用を利用している。

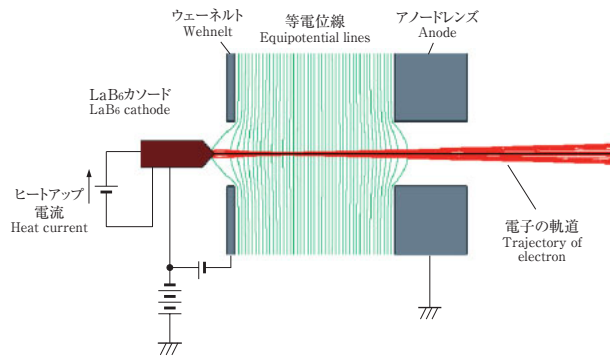


図2 電子銃の構成  
Fig. 2 Schematic concept of the electron gun

照明光学系と写像光学系の交点では、斜め上から入射した照明電子はウェーハに垂直に入射するように曲げられ、ウェーハから放出された2次電子は検出器方向へ直進する。このビーム分離機能をウীন・フィルタが担っている (図3)。

ウীন・フィルタは、電子の進行方向に対して電界と磁界が直交するように電極と磁極が配置されている。電界は、電子の進行方向にかかわらず同じ方向に力を及ぼす。一方、磁界による力はフレミング左手の法則に従うため、電子の進行方向によって作用する向きが変わる。ウীন・フィルタに斜め上から入射してくる電子に対しては、電界と磁界による力がどちらも同じ向きに働くため、電子はウェーハに対して垂直方向に入射するように曲げられるのに対して、ウীন・フィルタに下から入射してくる電子に対しては、電界と磁界による力が打ち消しあう方向に働くため電子は直進するのである。

写像光学系は、電界によるレンズ作用を利用した静電レンズと静電偏向器により構成される。

静電レンズの基本構成はアインツェルレンズと呼ばれる。これは、中心に貫通穴が開いた円板状電極を平行に3段並べ、両端の電極を接地電位にして、中央の電極に正又は負の電位を印加したものである (図4)。これらの電極が形成する電界によって図4に示すように電子の軌道が曲げられレンズ作用が発生する。

静電偏向器は円周方向に8分割された円筒状の電極から成っており、各電極に適切な電圧を印加することによって電子線を偏向させることができる。偏向器は、電子線が各レンズ群の中心を通るように軌道を調整することに用いられる。

写像光学系は、この構成を組み合わせたレンズ群により、ウェーハ表面から放出された2次電子を引出し、検出器の表面に拡大して結像させる。ズームレンズによって3倍のズーム比を確保できるように設計されている。

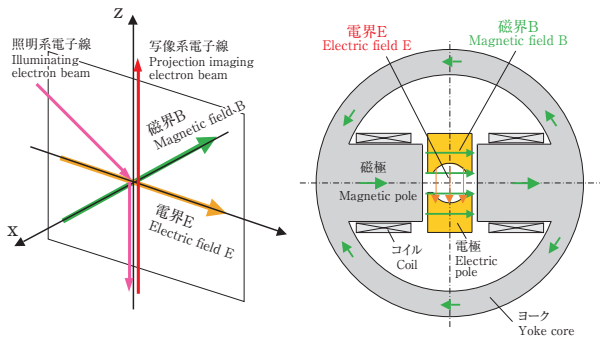


図3 ウীন・フィルタの原理と基本構造  
Fig. 3 Principle and fundamental structure of wien filter

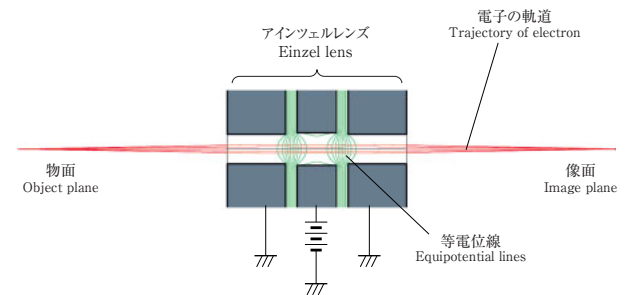


図4 アインツェルレンズの基本構造  
Fig. 4 Basic concept of the lens

写像投影光学系にとって重要なことは、ウェーハ表面の微細なデバイス構造がしっかりと解像できる像質を達成することである。そのため視野全体にわたって収差が低く抑えられるように静電レンズの各電極形状や電圧、レンズ群の配置を設計する。そして設計した性能を実現するには、実際の電極の加工精度、組立精度、印加電圧を高精度に保つことが重要である。

## 2-2 電子線検出器

電子線の検出器は、MCP (Micro Channel Plate)、蛍光面、ラインスキャンカメラからなる。

MCPは直径数 $\mu\text{m}$ の穴が蜂の巣状に開いた厚さ1 mm以下の薄いガラス板であり、その両面に形成された電極に電圧を印加する。MCPに電子が入射すると、穴の内壁に衝突する度に2次電子を放出して電子数を増やしなが、印加された電圧により電子は出口に導かれる。これによって電子数が数百から数千倍に増倍される。

MCPにより増倍された電子は、蛍光面に衝突し光を発生する。光は、ラインスキャンカメラの受光素子に到達し撮像される。

ラインスキャンカメラはCCD (Charge Coupled Device) と同様に受光面に届いた光を画素単位で電荷に変換し蓄積することによって像形成を行う素子であるが、CCDが静止物を撮像するのに対して、ラインスキャンカメラは一定速度で移動する物を撮像する。これによって、XYステージに置かれたウェーハを連続的に移動 (スキャン) させながら撮像することが可能となり、動いては止まって撮像することを繰り返す、いわゆるステップ&リピート方式に比べて短時間で撮像することができる。

ラインスキャンカメラの動作は、基本的にはコピー機やファクシミリで用いられている画像読取機構と全く同じである。像を一定速度で移動させ、一列に並んだ画素で順次光の信号を電気信号に変換していく。

EBeye300で用いられているラインスキャンカメラは、TDI (Time Delay Integration) と呼ばれる方式で、高感度な撮像が可能である。

TDI方式のラインスキャンカメラ (以下TDIカメラと呼ぶ) の受光面には格子状に画素が並んでおり、各画素に入射した光の量に応じた電気信号が得られる。各画素で得られた信号は、像送り方向の隣の段に一定の周期で送られ、更なるその画素に入射した光の量に応じた信号が加算される。これを段数分だけ繰り返す、最終段まで加算されるとその段の信号が画像に追加される。そして一定周期後には次に最終段に来た信号が同様に画像に追加される。このようにして帯状の画像が連続的に構成され

ていく。TDIカメラは、このように画像信号を蓄積して段数分の加算画像を得ているため、高感度な撮像が可能となる。

## 2-3 機構系

電子線を照射する空間は真空であるため、EBeye300はウェーハの真空搬送機構と真空中で動作するXYステージを有している (図5)。

### 2-3-1 ウェーハ搬送系

ウェーハ搬送系は、大気搬送機構と真空搬送機構からなる。

大気搬送機構は、ウェーハキャリアをセットするロードポート、ロードポートから真空搬送機構までウェーハを搬送する大気搬送ロボット、ウェーハの向きと位置を揃えるプリアラライナ、及び搬送空間を清浄に保つためのファンフィルタユニットによって構成される。

ロードポートは300 mmウェーハのキャリア (FOUP) 専用のものであるが、FOUPの中にアダプタを挿入することによって200 mmウェーハをセットすることができるようになっている。FOUPがロードポートに搭載されると、装置はウェーハサイズを自動認識してウェーハの搬送を行う。

EBeye300は、このようにして200 mmウェーハと300 mmウェーハのどちらも自由に搬送することができる、いわゆるブリッジツールである。

プリアラライナによって向きと位置を合わせたウェーハは、真空搬送機構に搬送される。

真空搬送機構は、大気搬送ロボットから渡されたウェーハをメインチャンバ (以下、MC) 内のXYステージまで搬送する役割を担っており、ウェーハが大気と真空を行き来する際の隔壁の役割を果たすロードロックチャンバ (以下、LC) と、搬送ロボットを内蔵したトランス

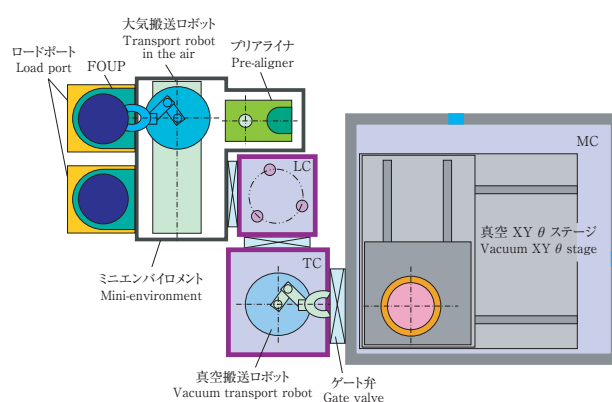


図5 搬送系平面図

Fig. 5 Top view of the wafer transport system



ファーチャンバ (以下, TC) によって構成される。

LCはドライポンプによる粗引き後ターボ分子ポンプに切り換えて $10^{-3}$ Pa以下まで排気される。次にTC間のゲート弁が開き, 真空ロボットがウェーハをハンドに載せてMCに搬送する。MCにウェーハを運び入れる際はLC間のゲート弁を閉じてからMC間のゲート弁を開けるようにして, MC内の真空度が劣化しないようにしており, MCの真空度は $5 \times 10^{-5}$ Pa以下に保たれている。

ウェーハ搬送系には搬送を失敗しない信頼性と共にウェーハを清浄に保つことが求められる。

大気搬送機構においては, ウェーハをファンフィルタユニットが作り出す清浄なダウンフローエアのミニエンバイロメントの中でウェーハを扱うことでダストの付着を防いでいる。またダウンフローの空間は導電性材料で覆うことによって静電気の発生を防ぎダストの滞留を防止している (図6)。

また真空搬送機構においては, 真空中に排気する際もしくは真空から大気圧に戻す (ベントする) 際に気流が生じ, ダストを巻き上げてウェーハを汚染する恐れがある。そのため, 真空排気やベントを行う場合は, 特にその初期に圧力が急激に変動しないように真空配管やガス導入配管のコンダクタンスを絞ったり, ダストを発生する恐れのある摺動部をウェーハの上方に極力設けない等, 種々の工夫を行っている。

これらの施策により, ウェーハを1回往復搬送する間にウェーハ上に付着する $0.2 \mu\text{m}$ 以上のダストの数を0.5個以下に抑制している。

### 2-3-2 XYステージと位置補正制御

MCに入ったウェーハは, 真空搬送ロボットによって

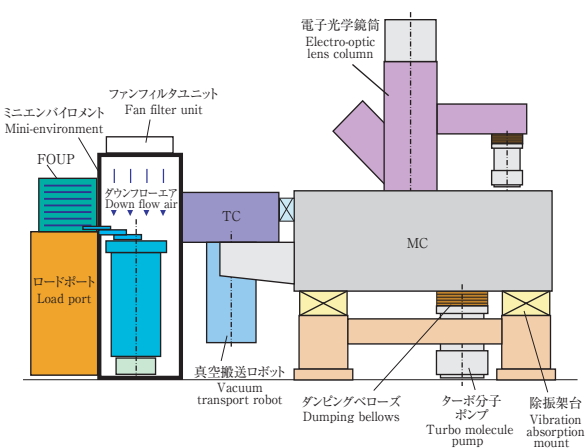


図6 搬送系側面図

Fig. 6 Cross view of the wafer transport system

XYステージ上に運ばれ吸着固定される。

ウェーハの検査は, ウェーハ上に電子線を照射しながらステージを一定速度で移動 (スキャン) することにより, 連続的に帯状に検査画像を撮像して進めていく。ウェーハ端まで移動すると視野幅だけステージを横に移動 (ステップ) させ, 今度は反対方向にステージをスキャンさせる。これを繰り返してウェーハ全面を検査する。

ステージの移動速度は, ウェーハ面上の画素寸法の設定値と検査速度の設定値によって決まる。

検査画像の撮像は, ステージの移動速度と検出器 (TDIカメラ) の画素の送り速度を同期させて行っている。また画素の送り方向に直角な方向, すなわちステージのステップ方向に振動しても像はぼけてしまう。ところがウェーハ面上の画素寸法が最小 $50 \text{ nm}$ であるのに対して, ステージの振動はサブミクロンであり数十倍も大きい。真空用のステージには, 非接触の静圧ガイドを用いるのが容易ではないため, これ以上振動を低減することが困難である。

そこでEBeye300では, ステージの目標位置と実際の位置の差を検出し, その差の分だけ写像光学系に設けられた偏向器によって電子線を振り戻すことによって, 検出器上では画素のずれが生じないように制御している。

### 2-3-3 磁場及び振動対策

装置が設置される空間には静磁場である地磁気のほかに, 様々な機器が発生する変動磁場が存在する。これらの静磁場や変動磁場の中を電子線が通過すると, その軌道は曲げられるので, 像の位置ずれや歪やぼけが生じ, 欠陥の検出性能が劣化する。これを避けるためEBeye300の場合, ウェーハ近傍の磁場を数十nTにしなければならない。このため次の二つの対策を施している。

#### (1) 電子線の経路の磁気遮へい

電子鏡筒とMCの隔壁をパーマロイや鉄のような透磁率の高い材料で製作し磁気遮へい効果をもたせることによって, 電子線の経路に磁場が入り込まないようにしている。

#### (2) 電子ビーム近傍の部材に非磁性材を使用

電子鏡筒の隔壁内部の部材は, ねじ1本に至るまで非磁性材料で構成されており, 電子線に磁場が作用しないようにしている。

EBeye300は, 電子鏡筒の振動によっても像が劣化し欠陥検出性能が落ちる。そこで建物の床振動が鏡筒に伝わらないようにするため, MCをアクティブ除振架台で支持している。また, MCには鏡筒のほかにTCとLCが締結されているが, これらの真空排気を行うターボ分子

ポンプには低振動タイプの磁気浮上型を採用し、ダンピングベローズを介して鏡筒やチャンバと接続している(図6)。

#### 2-4 画像処理エンジン

TDIによって取り込まれた像は画像処理エンジンに送られ、ここで半導体デバイスパターンの欠陥が検出される。

第1報で述べたとおりEBeye300の最高検査速度は600 MPPS (Mega Pixels Per Second) と非常に高速であるため、市販の画像処理ボードでは対応できない。そこでIPE (Image Processing Engine) と呼ばれる専用の欠陥検出ハードウェアを開発し、これをEBeye300の画像処理エンジンとして用いている。

IPEは、被検査デバイスパターンの特徴によって検査アルゴリズムを使い分けることで欠陥検出性能を高めている。

### 3. 基本性能

EBeye300の基本性能を表に示す。

#### 4. 欠陥検査性能の評価

次に、EBeye300を用いて半導体配線工程における配線部の電氣的欠陥検査を電位コントラスト (Voltage contrast, VC) によって検出したときの検査速度の評価結果と、微小な物理欠陥を意図的につくり込んだ感度検証用ウェーハを用いて、90%以上の検出率で検出可能な欠陥の寸法の設定した画素寸法に対する比率を求めて感度評価を行った結果について述べる。

##### 4-1 配線工程での電氣的欠陥検査の検査速度

###### 4-1-1 電氣的欠陥検査について

1 mm角程度の小さな半導体チップでも高度の情報処理が行えるのは、その中に大規模な電気回路が構成されているからである。すなわち、一つのチップに数億個の半導体素子が組み込まれており、それらが複雑に配線されて機能しているからである。したがって、配線に1箇所でも断線や短絡といった不良箇所があると回路が機能しなくなる。一方、半導体回路の集積度が著しく高くなった昨今では、配線が光学的限界を超えるまで細くなっているうえに、3次元的 (多層) に配線接続されているため、欠陥を光学的に見つけ出すことがますます困難となっている<sup>2)</sup>。

そこで、電子線を使った配線の電氣的欠陥検出が注目されるようになった<sup>3)</sup>。これは、電子線を配線に照射すると、断線や短絡といった接続異常によって配線の電圧が変動し、二次電子の放出率が変化する現象<sup>4)</sup>を応用し

表 EBeye300基本性能  
Table Primitive performance of EBeye300

項目 Term	仕様 Specification
検査機能 Fundamentals of inspection	
画素寸法 Pixel size	100 nm, 50 nm
検査速度 Inspection speed	最大600 MPPS (Mega pixels per second) Maximum 600 MPPS
装置機能 Fundamentals of equipment	
ウェーハサイズ Wafer size	200 mm, 300 mm
キャリア Carrier	FOUP
電子光学系 Electro-optic system	
電子銃 Electron gun	LaB <sub>6</sub>
ランディングエネルギー Landing energy	0 ~ 3 keV

ている。これを電位コントラスト検査 (以下VC検査) とよんでいる。

電子線を照射すると、写真2のように、不具合箇所の前後で配線のコントラストが急激に変化する場合がある。これがVCである。このようなVCが生じることから、図7のように、3次元的に接続された配線の一部が断線していることが分かる。このように、VC検査では形状的な異常を見つけ出すのではなく、配線の電氣的な異常として直接的に見つけ出すことができる。

また、VC検査は配線ピッチの半値程度の欠陥寸法に対して感度があればよいので、微小欠陥に対する感度性能よりも検査速度が重要視される。したがって、装置の最高速度検証には画素寸法の制限がないVC検査が好適である。



06-74 02/211

写真2 配線の電位コントラスト像  
Photo 2 Voltage contrast image of an interconnect

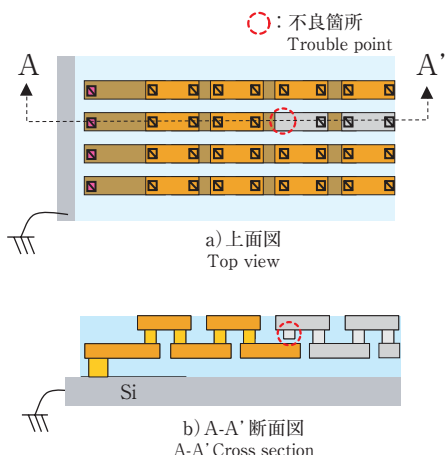


図7 配線コンタクトの断線箇所  
Fig. 7 View of an open interconnect contact

#### 4-1-2 検査条件

今回は、あらかじめ断線と短絡の欠陥が作り込んである機能検証用銅配線テストウェーハを用いて評価を行った。このウェーハパターンの配線ピッチの半値は70 nmで現在の最先端製品の設計寸法と同等である。

電子線の照射エネルギーは、配線材料である銅の二次電子放出効率（二次電子放出量/照射電子量）が最大となる数百eVとした。

画素寸法は配線ピッチの半値より大きい100 nmで行った。

検査速度は、140 MPPS、280 MPPS及び560 MPPSの3種類で同じ箇所を繰り返し検査し、欠陥検出感度の速度比較を行った。

#### 4-1-3 評価結果

検査速度ごとの欠陥検出感度の変化を図8に示す。本装置のほぼ最高速度である560 MPPSの高速検査であっても、感度低下はほとんどなく、140 MPPSでの検査における欠陥検出数の97%のVC欠陥を検出することができた。

### 4-2 微細欠陥の検出性能

#### 4-2-1 評価方法

次に画素寸法を小さくしてより微小な欠陥を検出する高感度検査での感度検証を行った。検証に用いたテストウェーハは、180 nmの配線ピッチ（半値）の酸化膜パターンで、写真3のような欠陥が寸法や場所を十数種類に変えて意図的に作り込んである。同じウェーハを数十回繰り返し検査し、検出された欠陥については寸法を実測し、欠陥の寸法ごとに検出できた回数を求めて感度を評価した。

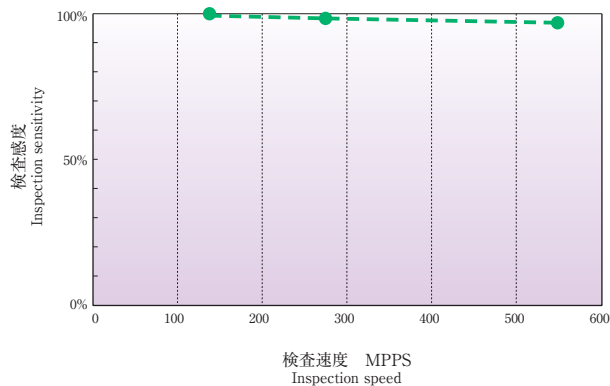
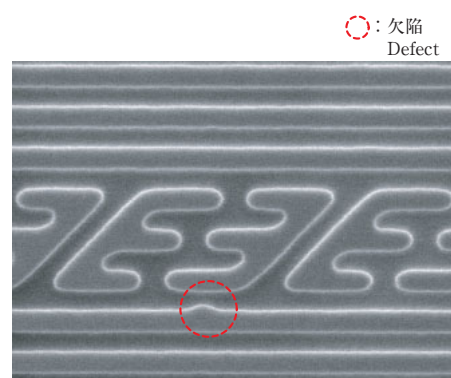


図8 高速検査でのVC欠陥検出感度  
Fig. 8 VC defect sensibility at high inspection speed



06-74 03/211

写真3 微小欠陥の例  
Photo 3 A sample of nano-defect

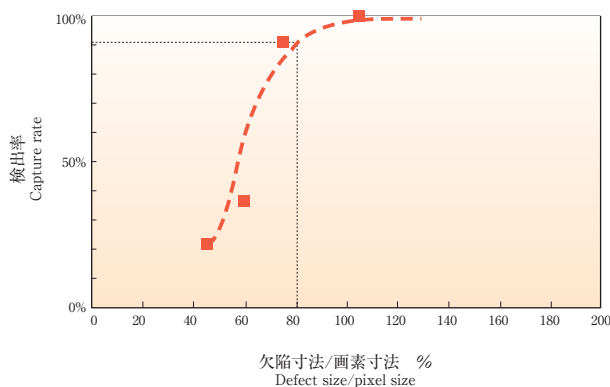


図9 検出可能な欠陥寸法  
Fig. 9 Sensible defect size

#### 4-2-2 評価結果

50 nmの画素寸法でテストウェーハを検査した結果を図9に示す。図9では、各欠陥寸法について検出できた回数を比率で表している。これにより、画素寸法50 nmの検査モードにおいて、画素寸法の80%程度の寸法の

欠陥を90%以上の検出率で検出できる感度があることが分かった。

## 5. おわりに

今回の評価で本装置が以下のことを実証した。

- (1) 500-600 MPPSの高速検査が可能なこと
- (2) 画素寸法の80%の欠陥を90%以上で検出が可能なこと

今後50 nm, 30 nmとますます微細化する半導体の設計寸法に対応するため、画素寸法の更なる微小化と検査性能の向上を進めている。

## 参考文献

- 1) 佐竹徹, 電子線を用いたウェーハ欠陥検査装置 (EBeye) の開発 (第1報), エバラ時報, No.207, 15-20, 2005.
- 2) 加賀徹, 面電子線を活用し速度と制度を両立させた写像光学式欠陥検査装置, 日経マイクロデバイス, 6月号, 124-125, 2005.
- 3) THE INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTOR, Yield Enhancement, 530-531, 2003.
- 4) 裏克己, 電子イオンビームハンドブック (第3版), 839-844, 1998, 東京, 日刊工業.

