

電子線を用いたウェーハ欠陥検査装置 (EBeye) の開発 (第1報)

—開発の背景と装置の原理 (コンセプト)—

佐竹 徹* 野路 伸治**

Development of an Electron Beam Inspection System (EBeye)

by Tohru SATAKE, & Nobuharu NOJI

Ebara is now developing a novel electron beam inspection system, named EBeye, which features high speed and high resolution inspection for detecting defective microchips. The machine is capable of faster inspection than conventional SEM systems, enabled by the projection electron microscope (PEM) technique. The following introduces and discusses this system.

Keywords: Defect, Inspection, Yield, Projection, Scanning electron microscope, Electron beam, Semiconductor, Process, Bright field, Dark field

1. はじめに

半導体大規模集積回路 (LSI) の微細化は、いくつかの限界説を乗り越えて、現在も着実に進みつつある。国際ロードマップで示されたテクノロジーノードによると、DRAMにおける最小配線ピッチの1/2が、2004年には90 nm、2007年には65 nmとなっており¹⁾、実際のLSI製造もそれに従って進んでいる。LSIは微細化により、集積度が増大し、メモリチップではその記憶容量が1ギガバイト (GB) を超える製品も一般市場に出始めている。また、集積度の増大に伴い、1チップ当たりのサイズも増加している。このため、生産性を向上するために、これまでの直径200 mmに加えて、300 mmウェーハを基準とした量産プロセスも開始されている。このような大きなウェーハのプロセス終了後の価格は極めて高価であり、不良があると損失額も大きなものとなる。このため、LSIチップの歩留まりを良くして、生産性を上げるための、LSI製造プロセスの管理が極めて重要になってきている。その要になっているのが欠陥検査である^{2, 3)}。LSIを使い物にならなくしてしまう欠陥をキラー欠陥と呼んでいる。LSI製造プロセスにおいては、欠陥検査により、いち早くキラー欠陥を見つけ、その原因を調べて

製造プロセスに対策を施し、歩留まりの低下を防ぐことが重要な課題となっている。

欠陥検査装置全体の市場、及び電子顕微鏡方式欠陥検査装置の市場が増大する理由を、前述の微細化を取り上げて、図1に示す。LSIの微細化により電氣的不良が増大し、又、微細な欠陥でもキラー欠陥となるために、キラー欠陥数が増加する。このため、電氣的欠陥を検出でき、かつ微細な欠陥を検出できる電子顕微鏡方式検査装置の必要性が高まっている。更に集積度が上がるために配線層及び製造プロセス数が増加することも、また、プロセス間の相互作用も重なるので、歩留まりが低下する。このため、欠陥検査工程の重要性が増し、欠陥検査装置

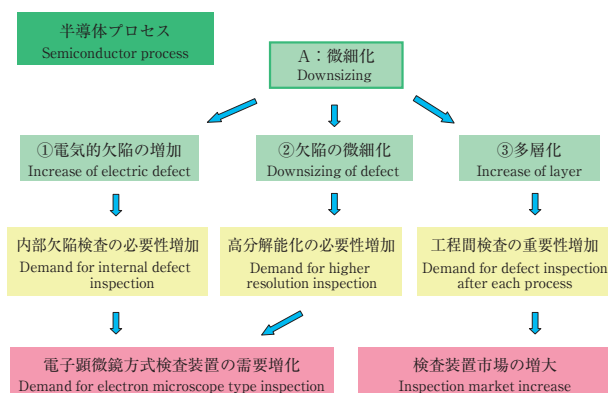


図1 電子顕微鏡方式検査装置開発の背景
Fig. 1 Background of EB inspection system development

* 精密・電子事業本部 検査装置事業部 技術部

** 同 同

全体の市場も拡大する。

ウェーハの大口径化においても、広い面積を均一に加工するのが難しいために、歩留まりが低下し、欠陥検査がより多く必要となっている。以上の理由のほかに、最近の、銅配線、低誘電体膜 (Low-k) 等新材料の導入による歩留まり低下も、欠陥検査装置の需要を増加させている。

従来、欠陥検査は主に光を用いた検査装置により行われてきたが、解像度においては近年の微細な欠陥を見つけるのに不足が生じてきている。このため、より解像度の高い電子顕微鏡方式の検査装置が、約10年前から市場に出てきており^{4, 5)}、2003年の売上比率が全検査装置売上の10%を占めるまでに伸びてきている⁶⁾。

しかし、電子顕微鏡方式検査装置は検査速度が、光方式に比べて約一桁遅いことが大きな課題となっている⁷⁾。この方法に対して約一桁速く、光と同等の検査速度を得ることができる電子線を用いた欠陥検査装置の開発を当社で進めている^{8~11)}。

本報は、開発の背景と装置の原理 (コンセプト)、基礎と構成、性能の三つの内容に分け、数回に分けて報告する予定である。

2. 欠陥検査とは

2-1 検査対象

表は主な欠陥検査方法と検査対象を示す。また、各検査方法が何を信号として検出し、何を出力するかについても示す。暗視野方式は試料表面の凹凸による散乱光を検出し、主にベアウェーハ上の粒子 (ごみ) やきずの有無を検査する。明視野方式は光学顕微鏡方式であり、反射光を信号として検出し、試料表面を拡大して見る方式である。粒子及び配線等の形状異常が検査対象である。例えば、配線の短絡、断線、配線の太り、細り等である。電子顕微鏡方式は、明視野方式と同様に試料表面を拡大して見る方式で、信号は電子である。粒子や形状異常だ

けでなく、内部の導電性不良などの電氣的欠陥も検査対象とする。例えば、誘電体の亀裂による絶縁不良、ソース又はドレインの高濃度ドーブ層とプラグ配線の接触異常、層間配線の導通異常等である。

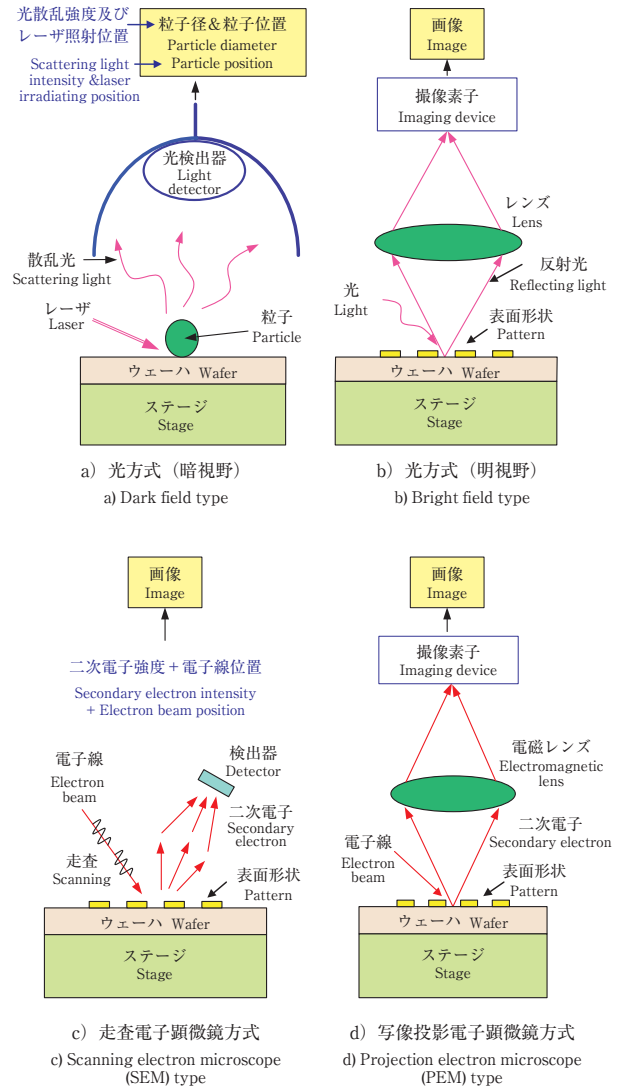


図2 欠陥検査装置の原理
Fig. 2 Principle of defect inspection machine

表 欠陥検査方法
Table Conventional defect inspection method

検査方法 Method	照明 Illumination	検出信号 Detection signal	出力内容 Output	検査対象 Object
光 (暗視野) 方式 Light (dark field)	光 (レーザー) Light (Laser)	散乱光 Scattering light	信号強度 (位置) Signal-intensity (position)	粒子 Particle
光 (明視野) 方式 Light (brightfield)	光 (キセノンランプ) Light (Xe-lamp)	反射光 reflecting light	像 Image	粒子/形状欠陥 Particle/Pattern defect
電子顕微鏡方式 Electron microscope	電子線 Electron beam	二次電子 Secondary electron	像 Image	粒子/形状欠陥/電氣的欠陥 Particle/Pattern defect/Electric defect

2-2 検査方法の原理

図2は検査方法の原理を示す。a) は光を用いた暗視野方式である。細く絞ったレーザー光を試料表面に浅い角度で照射し試料表面の凹凸、すなわち異物やきず等による散乱光を広い角度の検出器で検出する。光散乱強度からこれらの対象物の大きさを求めることができ、対象物の存在場所はビーム照射位置座標から求めることができる。検出できる対象物の大きさは約0.1 μmで、位置精度はレーザー光の直径で決まり、2 μm程度である。高速、高感度であり、主にベアウェーハ表面やパターン形成後のごみの存在を調べる検査に使用されており、異物検査装置とも呼ばれている。b) は光を用いた明視野方式である。試料表面を白色光で照明し、反射光をレンズで拡大して、撮像素子上へ結像し拡大像を得る。拡大の原理は光学顕微鏡と同じである。c) は走査電子顕微鏡 (Scanning electron microscope : SEM) 方式である。この方式は細く絞った電子線を試料表面で走査し、それにより、試料から生じる二次電子量を信号強度として、その電子線の径に相当する画素単位で画像合成するものである。d) は当社が採用している写像投影電子顕微鏡 (Projection electron microscope : PEM) 方式である。広い面に一括して電子線を照射し、そこからの二次電子信号を一括して結像させ、画像取得する方法である。結像の原理は光学顕微鏡と同じであり、違いは、光の代わりに電子を利用することである。PEM方式は光による明視野方式に類似しており、SEM方式は光による暗視野方式に類似しているといえる。欠陥検査速度は、SEM方式が一筆書きの要領で画像を得るのに対して、PEM方式

は一括照射一括撮像のため、SEM方式より速く撮像できる。

2-3 検査装置の性能

検査装置の性能において、分解能と検査速度に注目して各方式を比較した結果を図3に示す。縦軸は検査速度を時間あたりの検査面積で示し、横軸は分解能をnm単位で示す。最上部には参考のために、国際ロードマップのテクノロジーノードとそれが量産ベースで立ち上がる年を示す。EBeye (PEM方式) はSEM方式に比べて、100 nmの分解能では約一桁、50 nmの分解能では約二桁検査速度が大きく、また、明視野方式とは同じ検査速度をもっていることが分かる。

図4はEBeye, SEM方式及び明視野方式の分解能と焦点深度を示す。焦点深度は、凹凸のある試料表面を見るとき、その高低の差を識別できるかどうかを示す重要な指標である。SEM方式はこのなかでもっとも焦点深度が深い。EBeyeはSEM式に比べて一桁焦点深度が浅いが、分解能100 nmにおいて 5×10^4 nm (50 μm) 程度の焦点深度があるので実際のLSI試料表面の構造を検査するのに十分な性能をもっている。一方、明視野方式では分解能が0.2 μmのとき、焦点深度はおおよそ0.2 μm程度であり、この程度の段差があると像がぼけてしまう。たとえば、エッチング後のビア (Via) 底の残さ検出は、導通不良の原因となるので重要な検査対象であるが、明視野方式では事実上これを検査することができない。

2-4 SEM方式検査装置の検査速度限界 (空間電荷効果)

SEM方式の検査装置が市場に出されてから約10年経

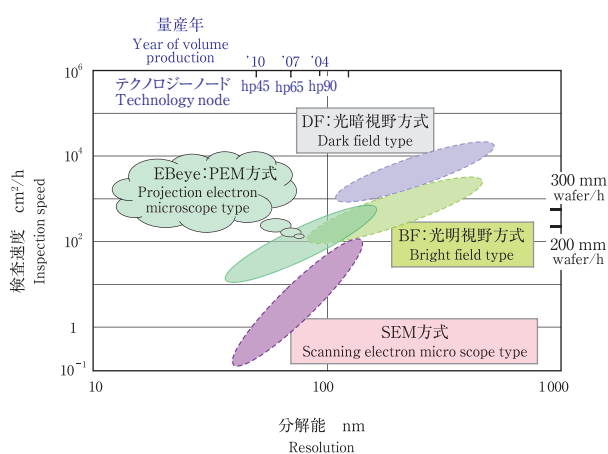


図3 検査装置の検査速度と分解能 (EBeyeの位置)

Fig. 3 Inspection speed vs resolution for inspection machines (bench mark)

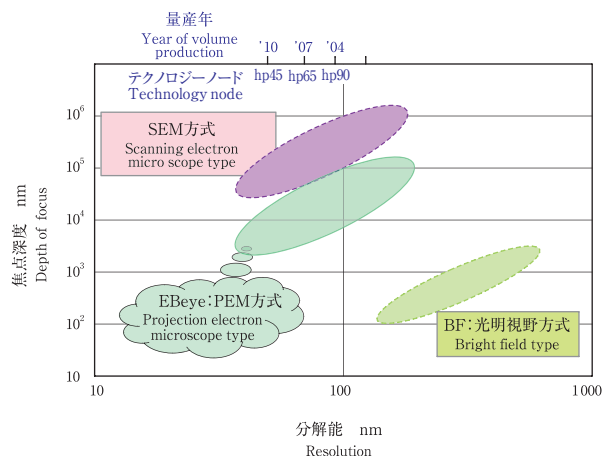


図4 検査装置の検査速度と焦点深度 (EBeyeの位置)

Fig. 4 Depth of focus vs resolution for inspection machines (bench mark)

つにもかかわらず、その検査速度はほとんど向上していない。その理由を以下に述べる。検査画像の質は信号電子量で決まるので、画像の質を落とさずに検査速度を早くするためには、単位時間あたりの信号量を多くする必要がある。このためには、細く絞った電子線の電流をできるだけ多くしなければならない。しかし、同一空間にたくさんの電子があると、それらの負電荷によるクーロン効果により電子同士がお互いに反発しあい、電子線が広がってしまう。この効果を空間電荷効果と呼んでいる。

図5に空間電荷効果を模式的に示す。電子線の直径は分解能に相当するので、この径が広がることは、分解能が悪くなり、したがって像がぼけることを意味する。この像ぼけは空間の電荷密度と、走行距離に比例し、電荷速度の2乗に反比例する。一般的に、像ぼけを式で表すと図5に示す式となる。ここで α は開口角と呼ばれる光学系で決められる値であるが、詳細は割愛する。図5のa)~c)はそれぞれ、低加速電圧の場合、高加速電圧の場合、及び低加速・低電荷密度の場合における電子線の広がり方を定性的に示したものである。加速電圧が低いほど、また、電子密度が高いほど広がりが大きくなる。

以上の理由により、分解能 (すなわち電子線の直径) を決めると、電流の最大値が原理的に限定されてしまい、したがって、最高検査速度が限定されてしまうのである。

SEM方式検査装置の検査速度を制限している理由を、図6で、もう少し詳しく述べる。左側の縦軸は200 mm ウェーハ1枚あたりの検査時間を示し、横軸は試料に照射される電子線の直径100 nmでの電流 (プローブ電流)

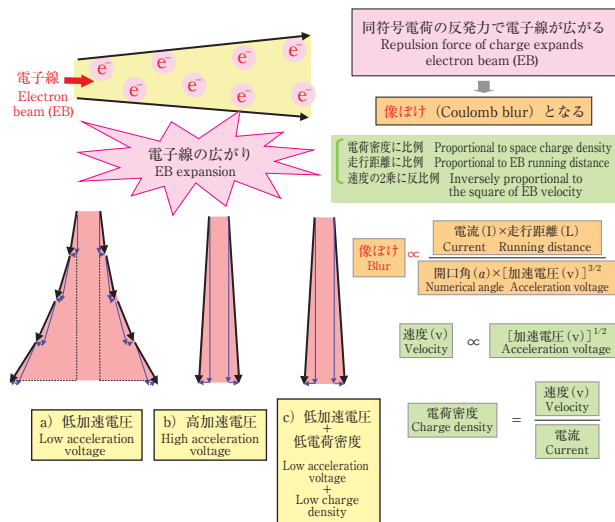


図5 空間電荷効果
Fig. 5 Space charge effect

を nA で示す。また右側の縦軸にはデータの取り込み速度を1秒あたりの処理画素数 (MPPS, Mega pixel per second, $1 \text{ M} = 10^6$) で示している。SEM方式の検査装置において、欠陥検査ができる画質を得るためには、1画素あたり約4000個の電子数が必要である [画質は (電子数)^{1/2}に比例する]。このために必要な電流は、データ取り込み速度100 MPPS, 電子線直径100 nmにおいて200 nA程度である。この電流値が空間電荷効果により原理的に制限される値である。一方、データ取り込み速度の限界は現在の電子技術により制限され、その実用的な値はおおよそ200 MPPSである。したがって、現状のSEM方式の検査速度は電子線の電流値による限界、すなわち空間電荷効果による電流律速になっている。

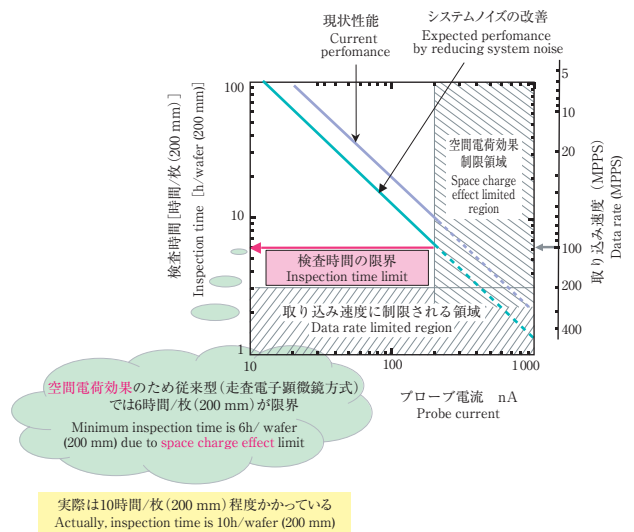


図6 従来EB方式の検査時間の限界
Fig. 6 Inspection time limit of conventional EB inspection machine

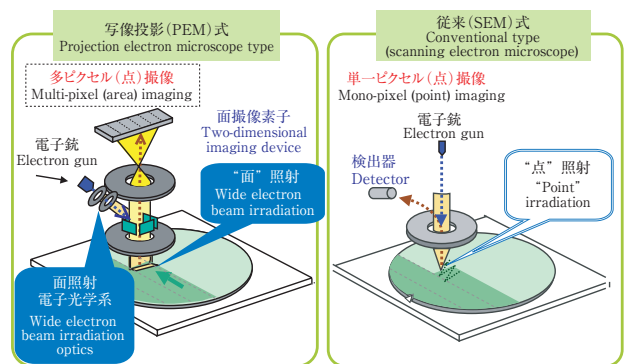


図7 EBeyeのコンセプト1: 面電子ビーム照射
Fig. 7 EBeye concept 1: Wide electron beam irradiation

3. 検査装置 EBeye のコンセプト

図7は検査装置 EBeye のコンセプトを従来方式の SEM 方式と比較して示す。SEM 方式は細く絞った電子線を試料に照射し、走査しながらその一点一点の二次電子強度を検出し、画像を合成する。分解能は電子線の直径で決まり、通常、画素サイズも電子線直径と同じ大きさに選ばれる。例えば 100 nm 線径の電子線では画素サイズも 100 nm となる。今、この画素サイズで 1 cm² 面積を走査することを考える。1 cm² の中には 100 nm の画素が 10¹⁰ 個含まれているので、1 画素を 10 ns (100 MPPS のデータ処理速度に相当する) で走査すると 100 秒かかることになる。したがって 1 時間で走査できる面積は 36 cm² となるが、実際には試料移動における繰り返し往復時の損失があるので 22 cm² 程度になる。この検査速度で 200 mm のウェーハを検査するとすると、約 10 時間を要する。

それに対して EBeye は比較的広い領域を一括して面照射し、その領域からの二次電子信号を二次元に整列した検出器上に結像させて一括して撮像する。この二次元検出器はデジタルカメラに使用されているものと類似のものである。電子線照射領域 (照明領域) は検出器の縦と横の画素数とその画素の大きさで決められ、現在の設計では、画素の大きさが 50 nm の時、照射矩形領域の大きさは 100 μm × 25 μm となる。その内部に含まれる総画素数は約 100 万個となり、この値は SEM 方式に置き換えると、100 万本の電子線を一度に照射することに相当する。

図8は検出器で得られた二次電子の撮像データの処理方法を示す。検出器の主要部である、面撮像素子で受けた二次電子の画像信号を電気信号に変換し、32系列の画像処理ユニットにより並列に (同時に) 処理する。1系列当たり 25 MPPS の処理速度で、全体では 800 MPPS (32系列 × 25 MPPS) となる。実際には同期を取る等のための待ち時間が必要となるので、データの実効処理速度は 600 MPPS となる。この値は従来方式 (SEM 方式) の 100 MPPS の 6 倍である。実際の検査時間は 200 mm ウェーハ 1 枚あたり 1 時間で、SEM 方式に比べて一桁大きい速さを得ることができると考えている。この速さは光方式と同等である。すなわち、PEM 方式の電子線検査装置は、電子線の一括面照射、面撮像素子による一括撮像、及び多系列の同時並列画像処理により、従来の SEM 方式のそれと比べて約一桁速い検査速度を達成することが可能である。このコンセプトに基づいて、EBeye の開発を進めている。

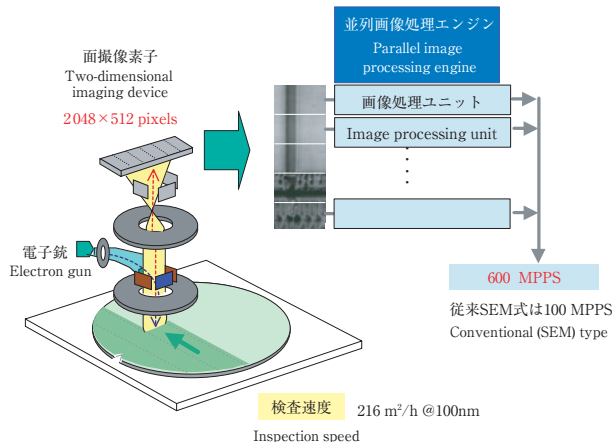


図8 EBeye のコンセプト 2 : 面電子ビーム照射
Fig. 8 EBeye concept 2 : Wide electron beam irradiation



05-90 01/207

写真 EBeye300 外観
Photo Birds-eye view of EBeye300

写真は電子線検査装置 EBeye300 の概観で異なる角度から撮影したものである。試料ウェーハの大きさが 200 mm 及び 300 mm の両方を検査できる装置である。

(以下次号へ続く)

参考文献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors web. (2004).
- 2) 山崎裕一郎：「異物検査装置技術と装置」, 半導体テクノロジー大全, 電子ジャーナル編, 589-592, (2002).
- 3) 山崎裕一郎：「パターン欠陥検査技術と装置」, 半導体テクノロジー大全, 電子ジャーナル編, 605-609, (2002).
- 4) P. Sandland, W. D. Meisburger, D. J. Clark, R. R. Simmons, D. E. A. Smith, L. H. Veneklasen, B. G. Becker, A. D. Brodie, C. H. Chadwick, Z. W. Chen, L. S. Chuu, D. G. Emge, A. A. Desai, H. J. Dohse, A. Dutta, J. D. Greene, L. A. Honfi, J. Y. Jau, J. Taylor, P. A. Wiczorek, and S. C. Wong : "An electron-beam inspection system for x-ray mask production", J. Vac. Sci. Technol. B9 (6), Nov/Dec, 3005-3009, (1991).
- 5) W. D. Meisburger, A. A. Desai, and A. D. Brodie : "Requirements and performance of an electron-beam column designed for x-ray mask inspection", J. Vac. Sci. Technol. B9 (6), Nov/Dec, 3010-3014, (1991).
- 6) 2004年Dataquest調べ
- 7) M. Miyoshi, Y. Yamazaki, T. Nagai, I. Nagahama, and K. Okumura, "Development of a projection imaging electron microscope with electrostatic lenses", J. Vac. Sci. Technol. B17 (6), Nov/Dec, 2799-2802, (1999).
- 8) Y. Yamazaki, I. Nagahama and A. Onishi, "Development of an electron optical system using EB projection optics in reflection mode for EB inspection", Proc. SPIE, Vol.5041, 212-219, (2003).
- 9) 山崎裕一郎, 野路伸治, 三好元介, 奥村 勝弥：「90 nm量産を可能にする欠陥検査技術が登場」, 日経マイクロデバイス, 4月号, 95-31, (2003).
- 10) T. Satake, N. Noji, T. Murakami, M. Tsujimura, I. Nagahama, Y. Yamazaki, and A. Onishi, "Electron beam inspection system for semiconductor wafer based on projection electron microscopy", Proc. SPIE, Vol.5375, 1125-1134, (2004).
- 11) I. Nagahama, A. onishi, y. yamazaki, t. Satake, and N. Noji : "Inspection performances of the electron beam inspection system based on projection electron microscopy", Proc. SPIE, Vol.5375, 921-928, (2004).
- 12) 寺尾健司, 佐竹徹, 野路伸治, 山崎裕一郎, 長濱一郎太, 大西篤志：「写像投影光学系を用いた電子線検査装置の開発」, LSIテストニングシンポジウム予稿集, 295-297, (2003).
- 13) 村上武司, 佐竹徹, 野路伸治, 山崎裕一郎, 長濱一郎太, 大西篤志：「写像投影型電子線装置の開発」, LSIテストニングシンポジウム予稿集, 85-87, (2004).

