

異物・外観検査装置

Automated Visual Inspection Systems for Contaminants and Pattern Defects of LSI Wafers

LSIの微細化が進むに従って、製造工程で発生する異物やパターン欠陥が歩留まり低下の要因に占める割合がますます高くなってきている。しかも検出すべき異物やパターン欠陥の寸法は、すでに目視検査の限界を越えつつある。これに対処するためには、高速で高信頼度の検査装置により、異物や欠陥の発生を定量的に把握して早期に適切な対策を施すことが不可欠である。

日立製作所で最近開発した異物検査装置は、レーザの偏光特性を利用して試料上のパターンと異物を光学的に弁別し、高速検査を可能にしている。またパターン欠陥検査装置は、画像処理技術を用いることにより、多層パターンの複雑な背景の中から微小な欠陥を検出しており、異物だけでなくプロセス不良によって生ずる種々の欠陥を高信頼度で検査できるものである。これらの検査装置を併用して活用することにより、高い歩留まりと信頼性を確保している。

窪田仁志* *Hitoshi Kubota*
小泉光義* *Mitsuyoshi Koizumi*
谷口雄三** *Yûzô Taniguchi*

1 緒 言

LSIの微細化が進み、パターン線幅はすでにサブミクロンに達している。これに伴い製造過程で発生する異物やパターンの欠陥(汚れ、形状不良など)に起因する歩留まり低下が、ますます著しくなっている。このため、これら異物の発塵(じん)状況のモニタやパターン欠陥の検査は、新製品の立ち上げ、および量産時の高歩留まり確保にきわめて重要である。

現在、異物検査装置は数社から市販されている¹⁾が、その多くは鏡面ウェーハを対象としているものである。しかし、微細化が進むに従って、よりきめの細かい検査、すなわち実際のプロセスを通過したウェーハについてラインの管理を行う必要が生じてきている。このためには、パターンの形成されたウェーハの異物検査が不可欠である。

またパターン欠陥検査は、従来、顕微鏡を用いた目視検査に頼っていたが、欠陥の大きさもハーフミクロンとなってきたため、もはや目視検査では困難な状況になりつつある。特に、露光工程で使用されるレジストパターンの検査では、 $\frac{1}{4}\mu\text{m}$ に近い欠陥検出が要求されている。またウェーハパターン形成工程では、検査対象が多層パターンとなり自動検査が不可欠な状況にある。最近このため、これらパターン欠陥検査の自動化に関する発表がいくつかなされている^{2)~6)}。また、数社から自動検査装置が発表されており⁷⁾、初期工程(1~2

層パターン)の自動検査ができるようになりつつある。

本稿では、日立製作所で最近開発した検査装置について、その検出原理、性能、特長などを紹介する。

2 外観・異物不良の現状

パターン線幅と欠陥寸法の関係を図1に示す。4MビットDRAMに代表されるサブミクロンLSIでは、パターン付きウェーハ上異物の大きさはパターン線幅と同程度、またウェーハのパターン欠陥寸法は、パターン線幅のほぼ $\frac{1}{2}$ が要求されている。さらに、全チップが不良になるのを防止するため、パターンを焼き付ける原版(レティクル)上では、転写限界の異物($\frac{1}{5}$ 縮小露光の場合 $0.8\mu\text{m}$ 程度)の検出が必要である。

電気特性検査で不良になったチップについて、その原因を調べた一例を図2に示す。この例では、約75%がパターン欠陥などの外観不良である。このうち、プロセスの条件不良は20%程度なのに対して、異物によって引き起こされる外観不良が80%と高い比率を占めている。このため、露光工程はもとより、パターン形成工程でも異物検査やパターン欠陥検査を実施し、適切な対策をとることが高歩留まりを確保するのに不可欠なことがわかる。

* 日立製作所生産技術研究所 ** 日立製作所武蔵工場

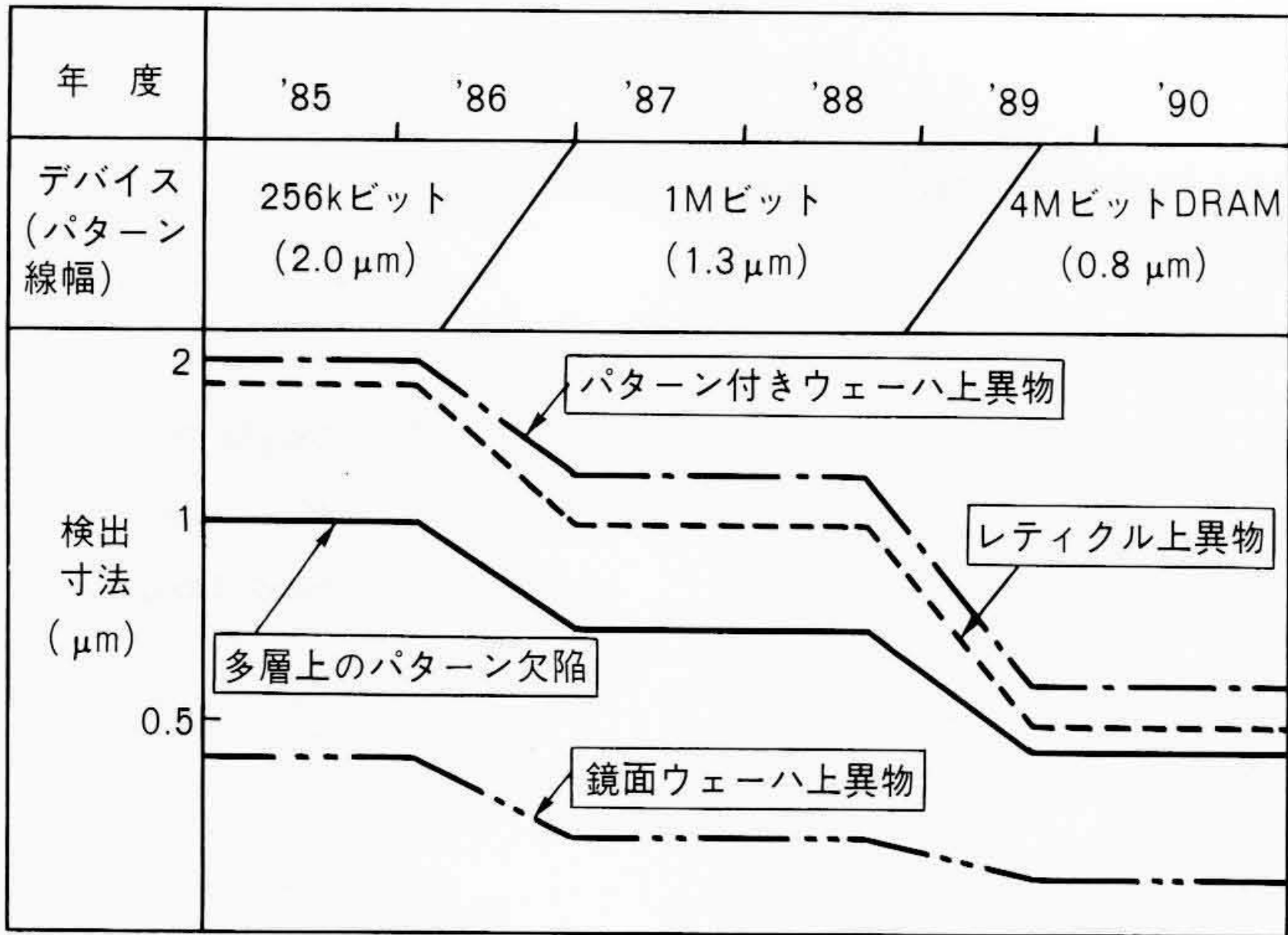


図1 パターン線幅と検出異物および欠陥寸法の推移 検出異物寸法は、(1)パターン付きウェーハ上ではパターンと同程度、(2)鏡面ウェーハ上ではパターンの $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{5}$ 、(3)レティクル上では縮小投影露光での転写限界寸法である。パターン欠陥は、多層パターン上で線幅の $\frac{1}{2}$ 程度である。

3 異物・外観検査の方法と必要性

LSI製造前工程での異物・外観検査の現状を図3に示す。

256 kビットDRAM以上の高集積LSIの量産には、縮小投影露光装置が使用される。同装置はレティクル上の5倍に拡大描画された回路パターンをレンズで縮小し、ステップ アンドリピート方式で1レティクル分ごとにウェーハ上に転写するものである。したがって、レティクル面上に異物が付着した状態で露光を行った場合は、同図に示すように、ウェーハ上の露光された全チップが転写不良となる。そこで、露光前にレティクル面上の異物検査を厳重に行い、付着異物を完全に除去することによって転写不良を防止している。

また、レティクルに浮遊異物が付着するのを防止するため、図3に示すペリクルを使用する場合もあるが、この場合にはペリクル装着の前後でレティクル上の異物を検出する必要がある。さらに、縮小レンズに付着した異物や露光条件不良による転写不良チェックのため、レジスト付き鏡面ウェーハへ1レティクル分を露光後、現像したレジストパターンを検査して転写不良をチェックしている。

以上、露光工程での2種の検査によって異物付着と露光条件不良がないことを確認したあと、作業を着工して転写不良を防止している。

一方、パターン形成工程でのウェーハ上異物検査とパターン欠陥検査は、露光後のパターン形成に用いる種々のウェーハ処理設備の異常な異物発生やプロセス不良を監視するためのモニタとして位置づけられる。各設備に試料ウェーハを投入し、検査を行い、設備に異物などの異常発生がないことを確認したあと、この設備の作業を着工している。ここで異常が生じた場合には、設備を止めて原因を探し、対策を立てる。

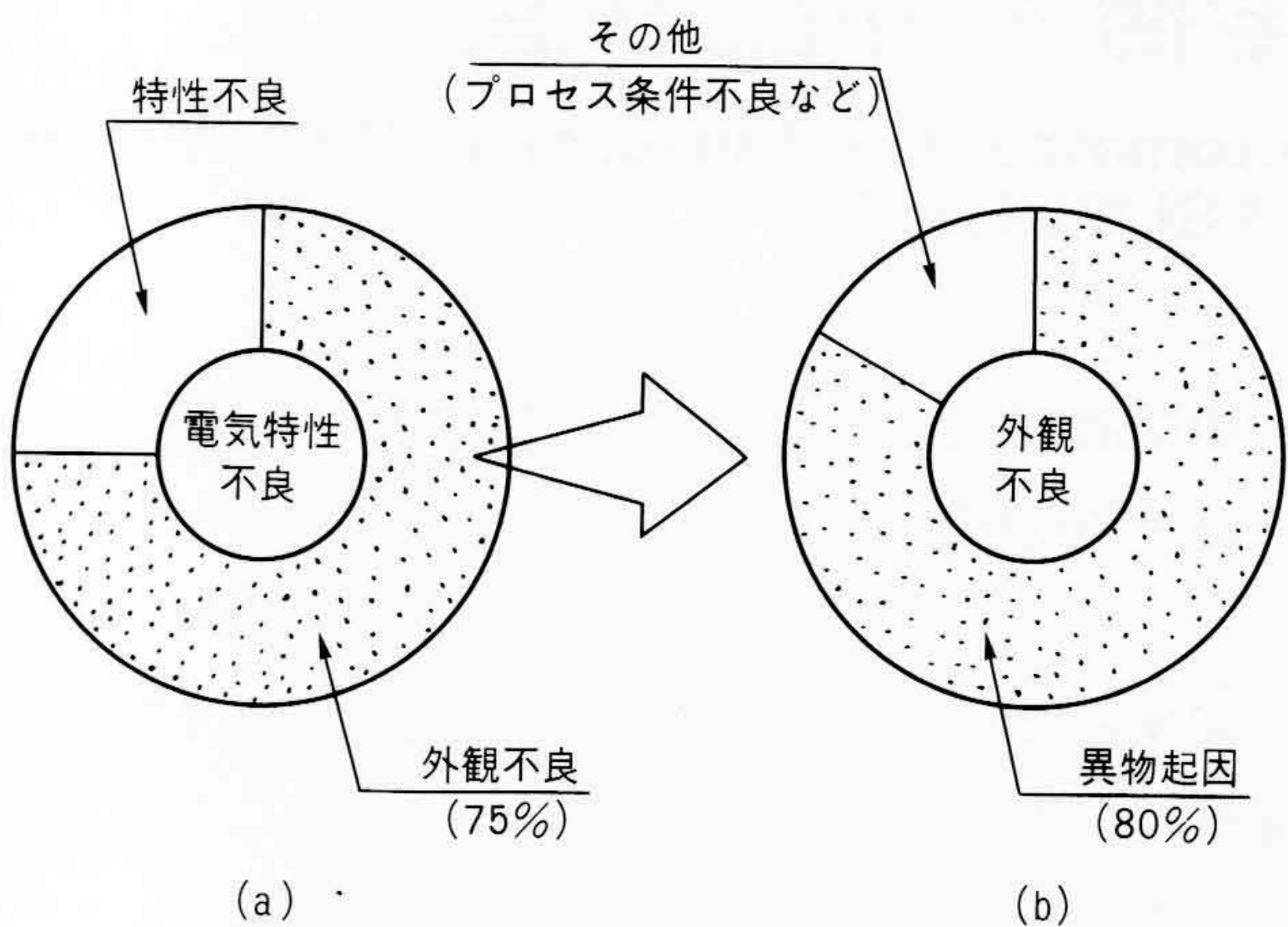


図2 電気特性検査不良内容とその要因 電気特性不良の75%はパターン欠陥などの外観不良であり(a)、さらにその80%は異物によって引き起こされている(b)。

さらに、着工後も適宜、異物やパターン欠陥の発生に異常がないかどうかを監視して、大量不良発生の防止、および品質の向上を図っている。製造工程Nで付着した異物が次工程N+1でパターン欠陥を誘起させた例を図4に示す。同図のようにウェーハ上異物検査は異物マップ表示によってプロセス設備での発塵状況を短時間に把握でき、パターン欠陥検査と併用することにより、異物のパターン欠陥への影響度の把握ができる。さらに、パターン欠陥検査の汚れ・色むら・パターンの細りなどの検出機能によってエッチング不良などのプロセス不良の把握が可能となる。

以上の露光工程とパターン形成工程での検査によって適切な対策を早期に立てることができ、大量不良発生の防止が図れ、歩留まりも向上できる。以上を表1にまとめて示す。

これらの検査を顕微鏡目視作業で行った場合は、見逃しが多いうえ検査の定量化が困難であるが、自動検査装置によって定量化が可能となる。

4 露光工程での検査

4.1 レティクル上異物検査装置

本装置⁸⁾は、ペリクル貼(は)り付け前後のレティクルパターン面上の0.8 μm異物の検出が可能である。装置の外観を図5に示す。

検出原理を図6に示す。傾斜角度を持つHe-Neレーザを同図に示すようにレティクル上に照射する。照射点からの散乱光を、集光レンズと検光子で集光して検出器で検出する。

図6に示すように45度のパターンやパターンのコーナ部では、パターンから反射した光が検出器に入り、異物との弁別ができなくなる。そこで、パターン反射光と異物散乱光に含まれる偏光の相違に着目した異物検出法により、異物だけの

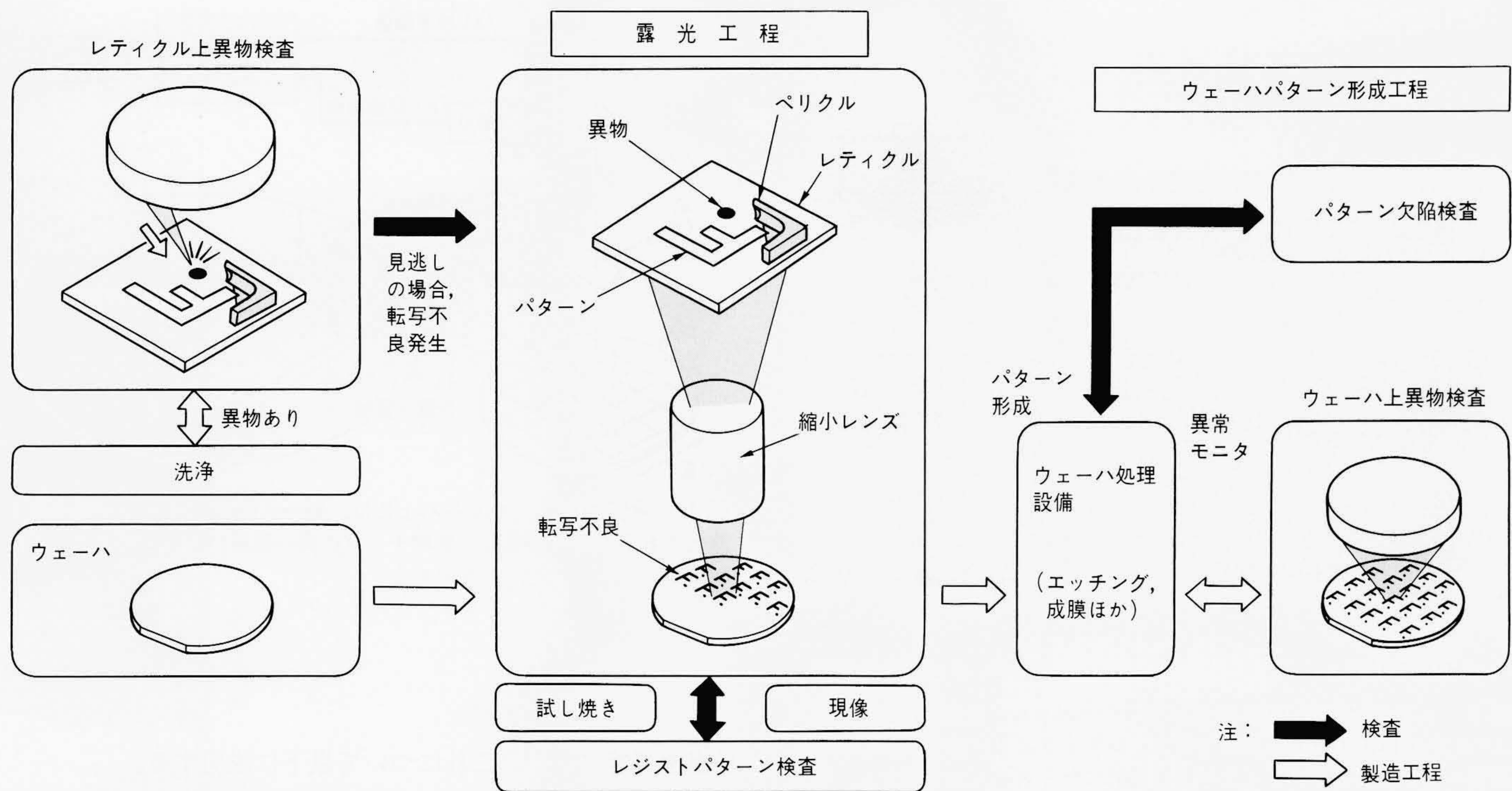


図3 異物、パターン検査の現状 レティクル上異物検査は付着異物除去、レジストパターン検査は転写不良のチェック、ウェーハ上異物検査はウェーハ処理設備やプロセス装置の発塵(じん)異常モニタ、パターン欠陥検査はパターン形成工程でのプロセス異常のチェックをそれぞれの目的として使用されている。

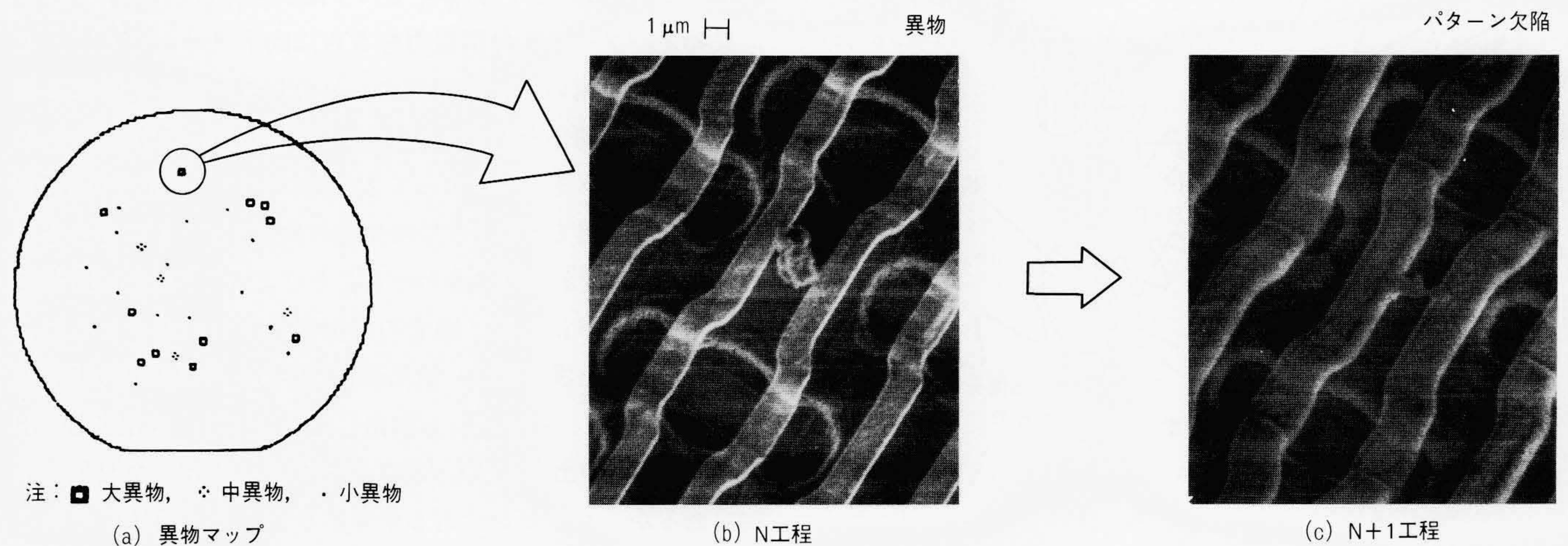


図4 ウェーハパターン上の異物と欠陥の関係 (b) 製造工程Nで付着した異物が、(c) N+1工程でのパターン欠陥の原因となった例を示す。(a)は検出された異物位置の表示を示す。

表1 各検査装置の位置づけ おのこの検査装置は、大量不良防止による歩留まりの向上を目的として使用されている。

工 程	露	光	パ タ ー ン 形 成	
検 査	レティクル上異物	レジストパターン	ウェーハ上異物	パターン欠陥
検 査 対 象	レティクル	試し焼きウェーハ	パターン付き製品ウェーハ	
検 出 欠 陥	●0.8 μm以上の異物	●0.3 μm以上の転写欠陥	●1 μm以上の異物	●0.5 μm以上の形状異常および汚れなど
検 査 時 間	150 s/100□	380 s/cm ²	400 s/φ5 インチ	190 s/cm ²
使 用 法	●付着異物	●付着異物 ●露光条件	●異常発塵チェック	●プロセス不良チェック
目 的	●転写不良防止		●大量不良防止 → 歩留まり向上 ●プロセスや製造条件の不良、発塵の原因究明	

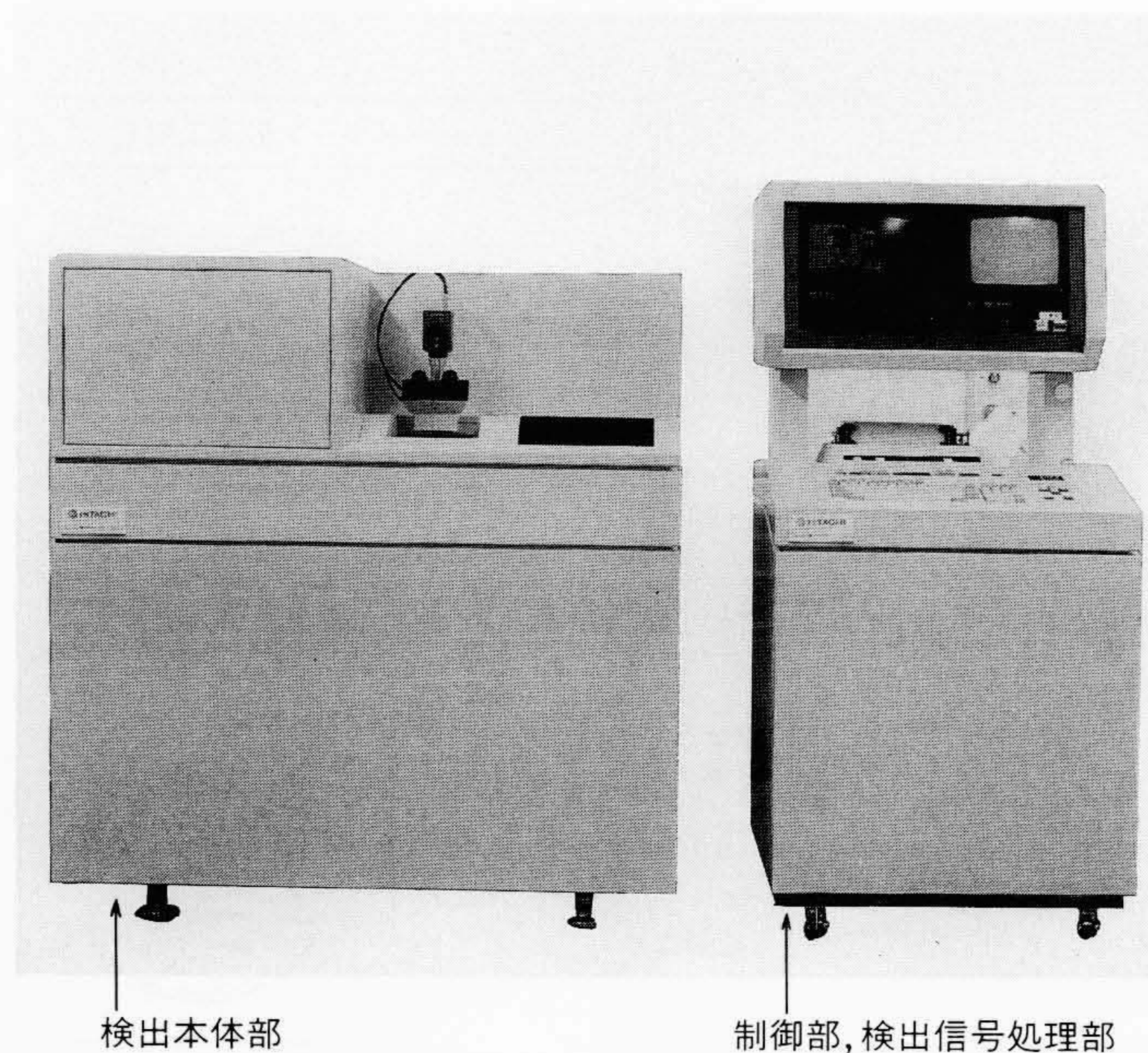


図5 レティクル上異物検査装置 ペリクルを装着したレティクル上の $0.8\mu\text{m}$ 以上の異物を検出できる。レティクルを防塵ケースに収納し、装置にセットする。レティクルは自動的にケースから取り出され、検査後にケースに収納される。

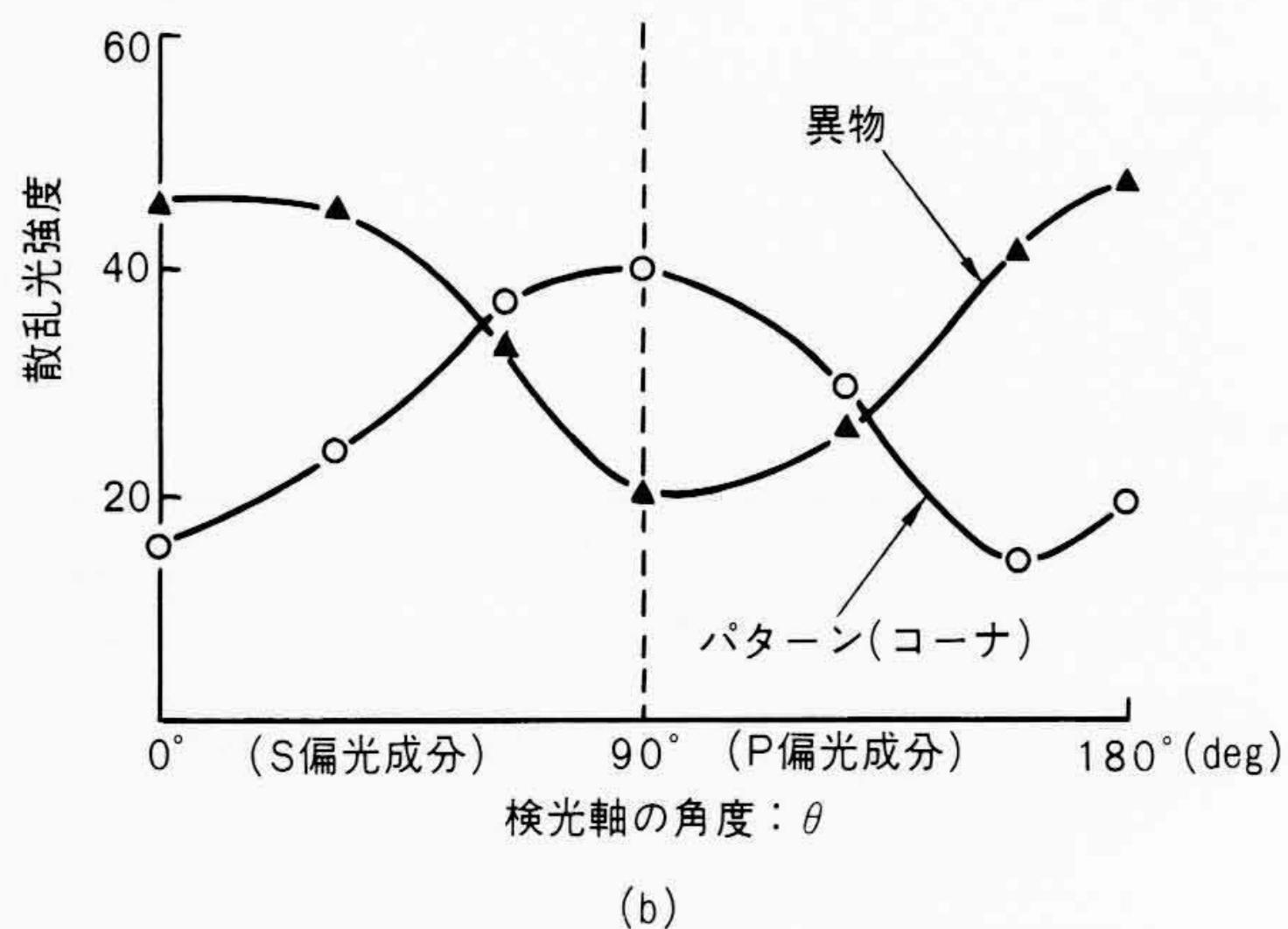
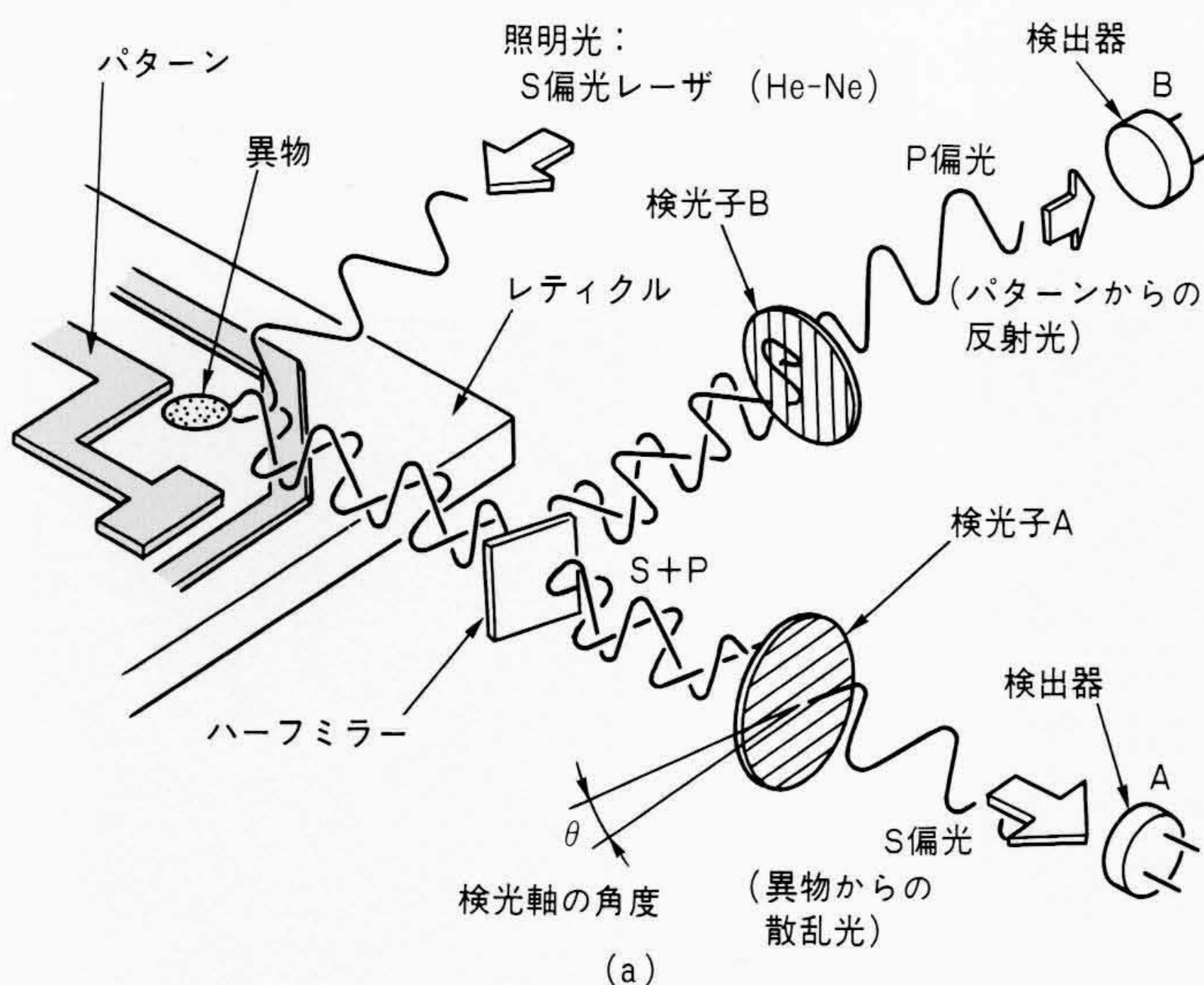


図6 差動検出方式の原理(a)と散乱光強度と検光軸角度の関係(b)
検出器Aは異物からの散乱光(S偏光)を、検出器Bはパターンからの反射光(P偏光)をおのおの検出して、両者の出力差によって異物検出を行う。

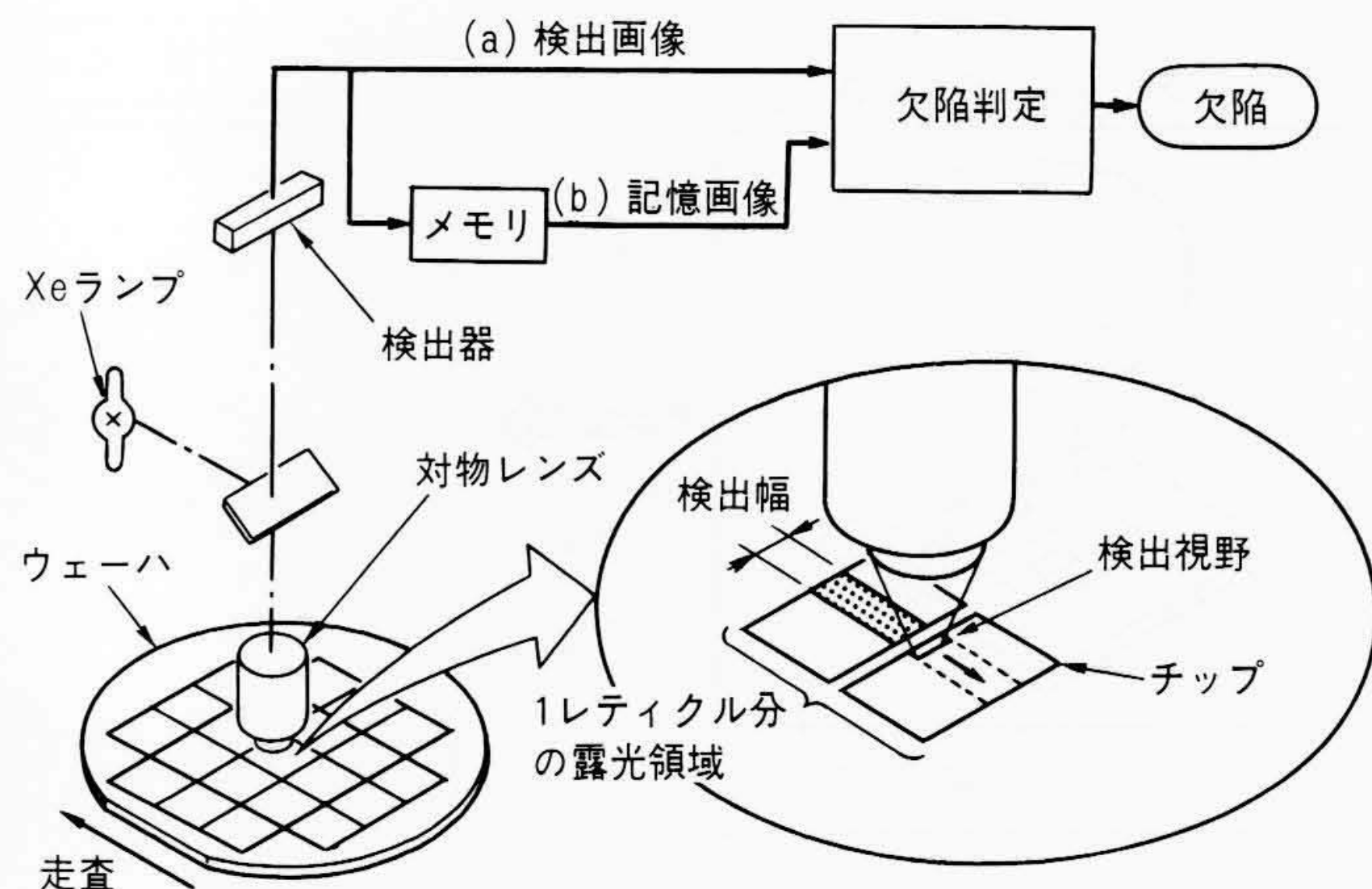


図7 検査原理 ウェーハ上には、同一の回路パターンが繰り返し露光されることに着目し、実物チップの同一回路パターン部どうしを比較する。

検出を可能にした。これについて以下に説明する。

S偏光^{※1)}レーザによるパターンからの反射光の偏光は大部分がP偏光^{※1)}となるので、検光子Aの検光軸を垂直($\theta = 0^\circ$)に配置すると、反射光は消光⁹⁾される。一方、異物からの散乱光はS偏光とP偏光が混在するため、その一部が検光子を通過する。以上によりパターンの影響を受けずに異物だけが検出できる。

異物とパターンの弁別能力をさらに向上させるために、差動検出方式を用いた。図6(b)に、おのおのの散乱光強度と検光軸の角度の関係を示す。S偏光とP偏光を含んだ異物からの散乱光をハーフミラーによって2方向に分け、検光子AはS偏光が最大に検出できるように検光軸の角度を $\theta = 0^\circ$ に合わせ、検光子Bは角度 $\theta = 90^\circ$ に合わせることによってP偏光が最大に検出できるようにした。両者の検出器の出力の差をとると、異物を検出した場合には、検出器Aの出力が検出器Bの出力よりも大きくなり、パターンを検出した場合には、検出器Bの出力が検出器Aの出力よりも大きくなるので、検出した対象が異物であるか、パターンであるかをよりいっそう明確に弁別させることができる。

4.2 レジストパターン検査装置⁶⁾

試し焼きしたレジストパターンの欠陥を厳密に検査するため、欠陥寸法もパターン線幅の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ が要求される。このため、4 MビットDRAMでは $0.3\mu\text{m}$ の欠陥を検出しなければならない。検査原理を図7に示す。ウェーハ上の隣接するチップどうしを比較する実物パターン比較法を採用している。すなわち、ウェーハを走査することによって検出器の幅に相当する1チップ分の画像をメモリに記憶し、これと現在検出し

※1) S偏光, P偏光: 振動面(電界ベクトル)⁹⁾が、試料面に対して平行な場合をS偏光, 垂直な場合をP偏光と呼ぶ。

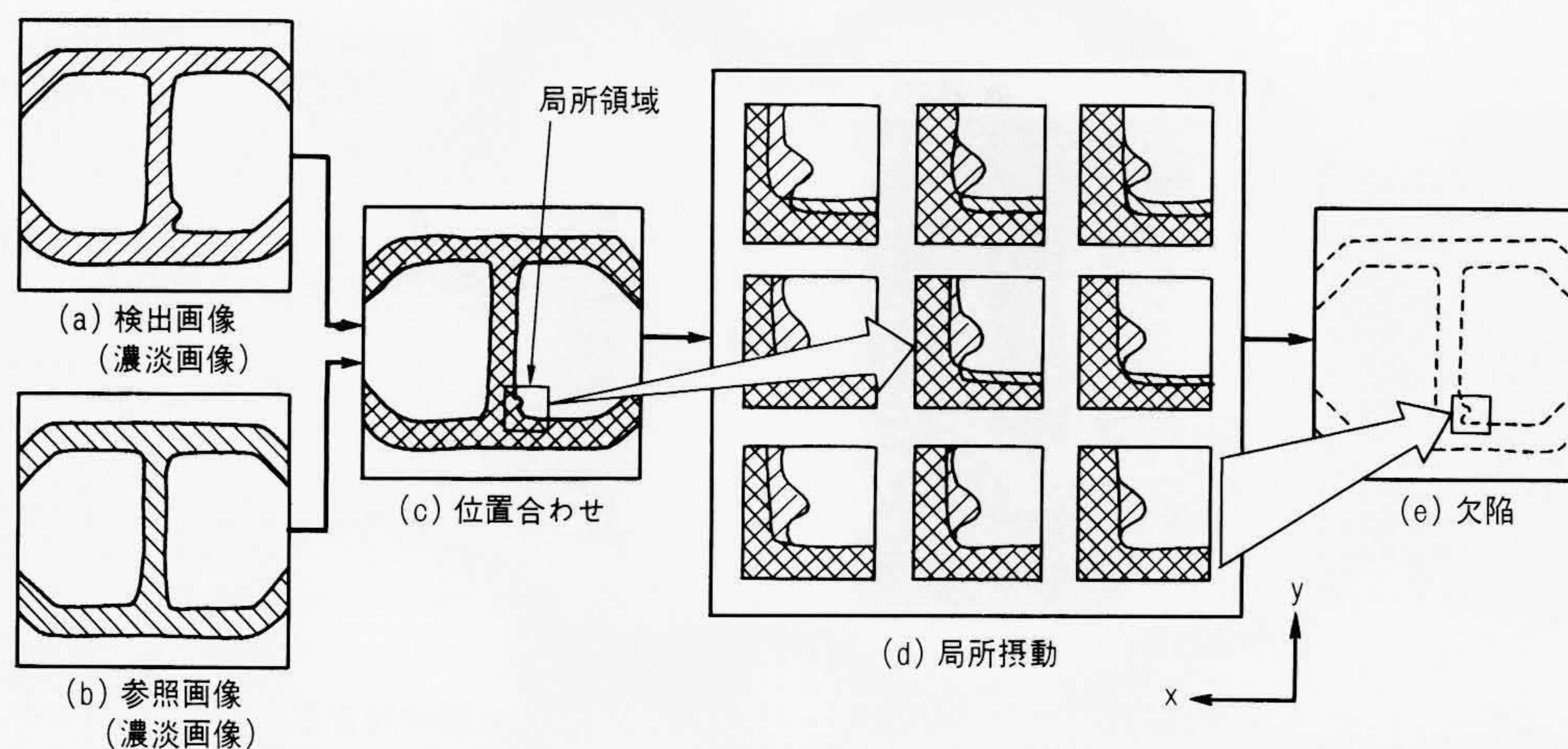
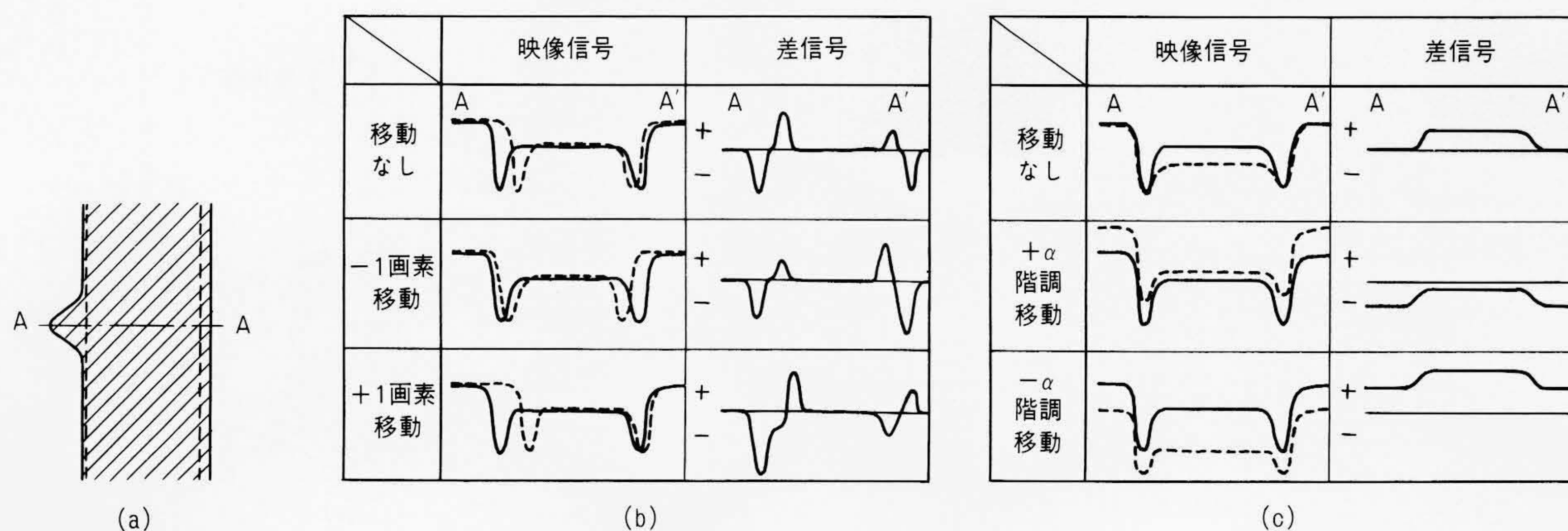


図8 局所摂動パターンマッチング法の原理 比較する一方の画像に対し、他方の画像をx、yおよび明るさ方向に合わせ込み、合わせきれない部分を欠陥として検出する。



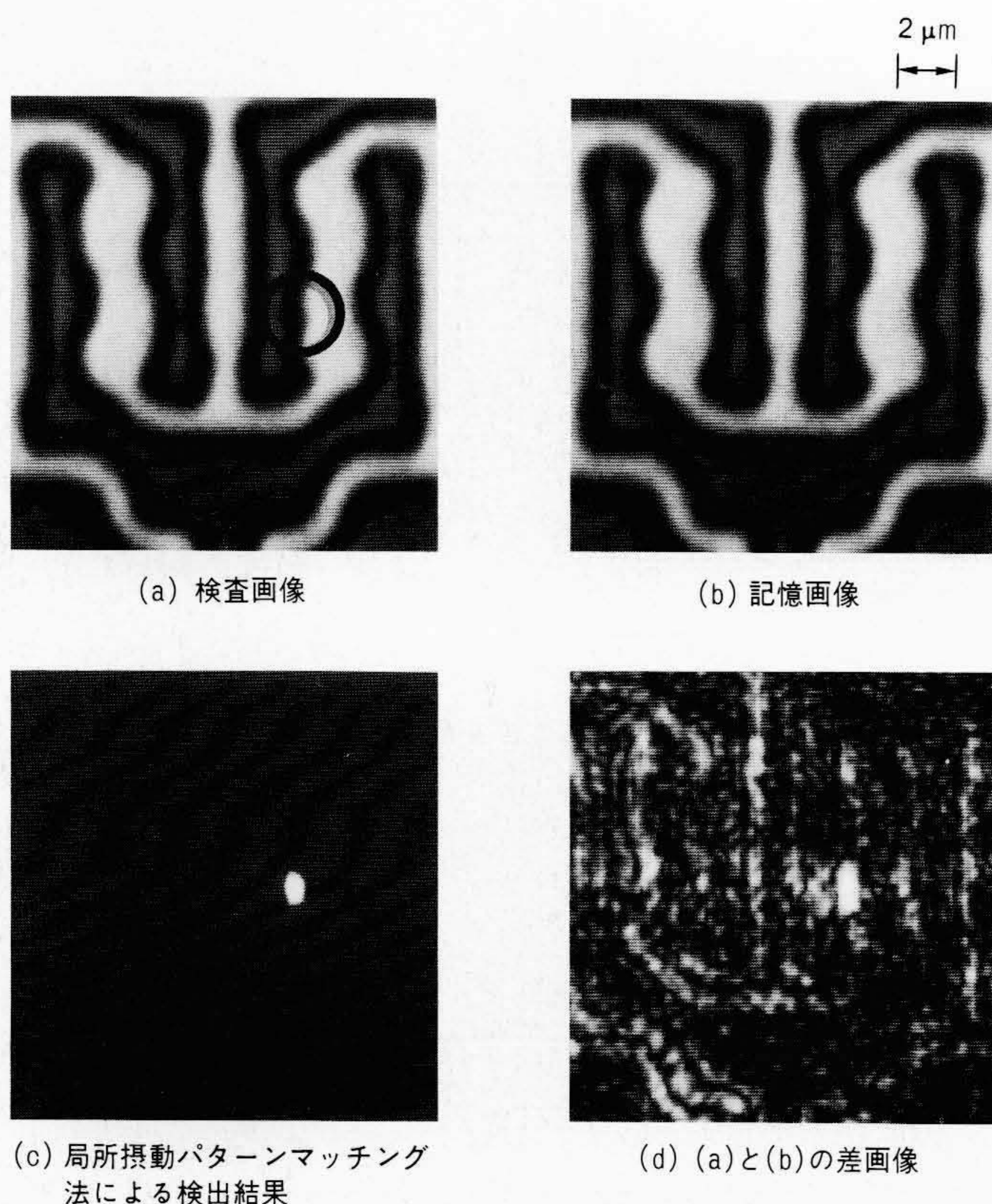
注：—— 検出パターン， ---- 記憶パターン

図9 欠陥判定処理法 (a)検査画像と参照画像の比較の様子を、(b)A～A'間の一次元信号波形と位置合わせ状態による差信号を、(c)比較画像間に濃淡差(明るさの差)のある場合の差信号をそれぞれ示す。

ているチップの同一場所の画像とを比較するものである。正常パターンどうしでも生ずるわずかな形状差や微妙なレジスト塗布厚さむらから生ずる濃淡差を考慮して、微小な欠陥を検出する局所摂動パターンマッチング法を開発した。この原理を図8に示す。検出画像(a)と記憶画像(b)を微分処理して得られるおのおののエッジ画像を用いて位置合わせを行う(c)。次に画像(a)に対し、(b)を局所領域ごとにxy 8方向に1画素相対的に移動し、差が最小となる差画像を求め(d)、しきい値処理によって欠陥を検出する(e)。実際には(a)と(b)には1画素以下の形状差あるいは位置合わせ誤差があるので、図9(b)に示すように記憶画像を横方向に±1画素移動しても検出画像と完全に一致させることができない。しかし、差信号の極性に着目すれば、正常部の形状差は±1画素移動することによって極性が反転するのに対し、欠陥部では極性の変化がみられない。したがって、極性が反転する部分の差画像出力を0(正常部)とすることで正常部の形状差を除くことができる。さら

に、レジスト膜厚変化による濃淡差に対応するために図9(c)に示すように明るさ方向にも±α階調(αは膜厚変動に伴う濃淡差で決まる。)変化させ、同様な極性処理を行っている。以上から、レジストパターンの微小な欠陥が検出可能となる。実際の検査では、数ショット※2)の転写パターンを形成し、レティクル上の異物とウェーハ上の異物とを弁別している。検出した欠陥の一例を図10に示す。従来法のように隣接チップどうしを位置合わせし、差をとっただけでは欠陥のほかにパターンの形状誤差などによる差が生じ欠陥と弁別することが困難(d)であるが、局所摂動パターンマッチング法を適用することで0.3 μmの欠陥検出が可能である(c)。

※2) ショット：1回の露光を指し、1レティクル分のチップが露光される。



注：写真○印内0.3 μm突起欠陥

図10 欠陥検出例 (a)と(b)の差画像では、微小な形状差や濃淡差に影響されて欠陥だけを検出できないが、局所振動パターンマッチング法で欠陥だけの検出を可能にしている。

5 パターン形成工程での検査

5.1 ウェーハ上異物検査装置

本装置¹⁰⁾は鏡面ウェーハ上の0.3 μm以上、パターン付きウェーハ上の1 μm以上の異物を検出できる。装置の外観を図11に示す。

検出原理を図12に示す。同図(a)でS偏光レーザー光をウェーハに対して水平に照射する。このときウェーハ上の照明光に対して垂直なパターンからの反射光は偏光が変化せず、S偏光のまま対物レンズに進む。この反射光の偏光に対して検光子は検光軸が垂直に配置されているので、反射光は消光され検出器に至らない。また、同図(b)に示すように照明光に対して角度 η を持つパターンからの反射光は対物レンズに入らず、検出されない。同図(c)は、異物に照明光が当たった場合で、異物からの反射光は偏光が変化し、P偏光が生ずる(一種の偏光解消現象)。これは検光子を通過するので、異物検出が可能となる。

以上の検出原理を用いて異物検出を行った例を図13に示す。同図(a)にパターン上の直径2 μmの異物の顕微鏡観察像を示す。これを左右からS偏光レーザーで照明し、検光子がない場合とある場合での検出像を同図(b), (c)に示した。(b)



図11 ウェーハ上異物検査装置 パターン付き製品ウェーハ上の1 μm以上の異物を検出できる。検出した異物のウェーハ上の分布をディスプレイに表示する。検出異物を必要に応じて顕微鏡下に自動的に位置決めし、観察できる。

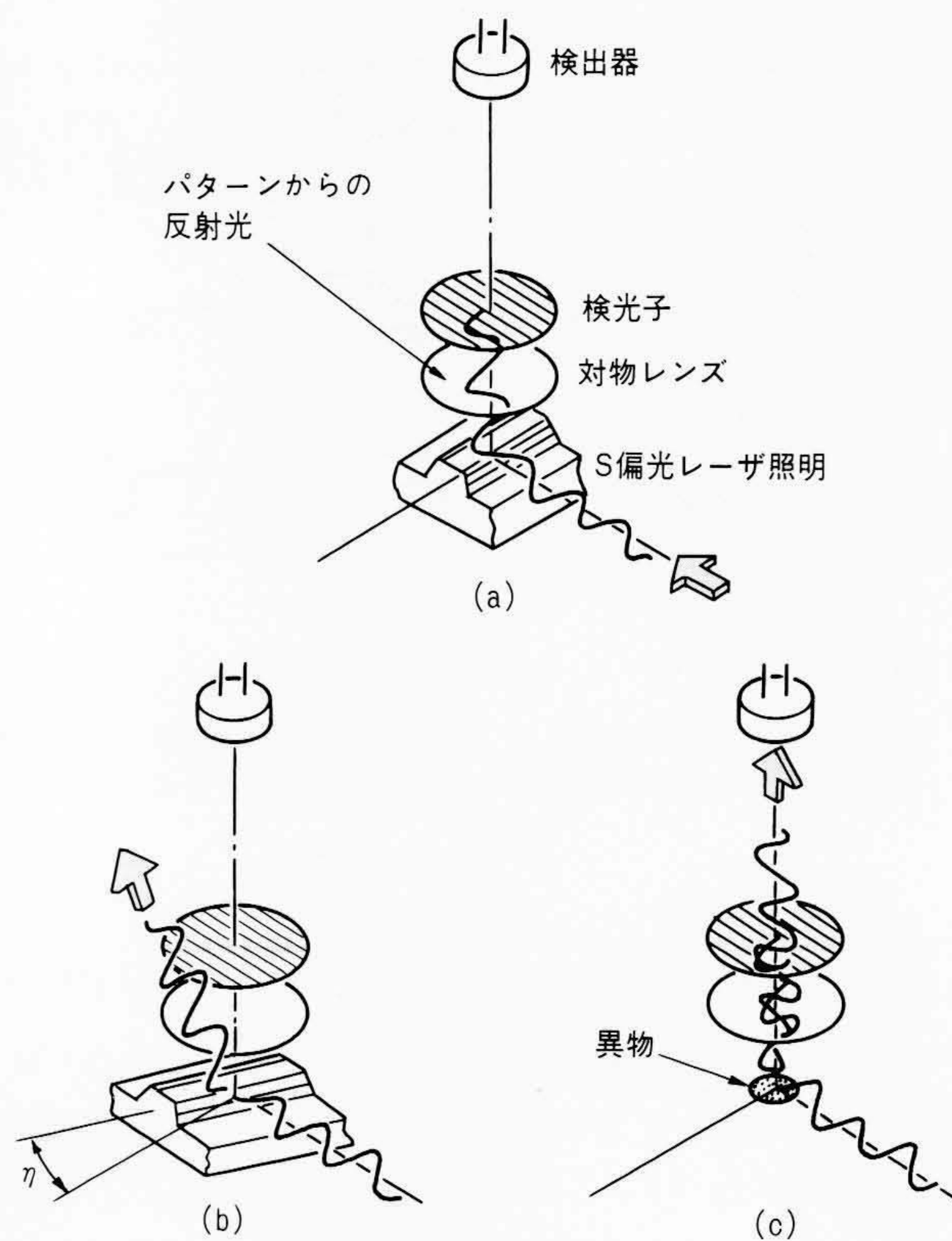


図12 検出原理 S偏光レーザー照明光に対して、(a)垂直なパターンからの反射光は検光子によって消光される。(b)角度を持つパターンからの反射光は対物レンズに入射しない。(c)異物からの散乱光だけが検出器に至る。

ではパターン反射光と異物散乱光が混在するが、(c)ではパターン反射光が消光されるので、異物だけが検出されている。同図(d)は参考のために同図(c)の異物のSEM(走査電子顕微鏡)観察像を示したものである。

5.2 パターン欠陥検査⁵⁾

ウェーハ形成の各工程でウェーハパターンを検査するため

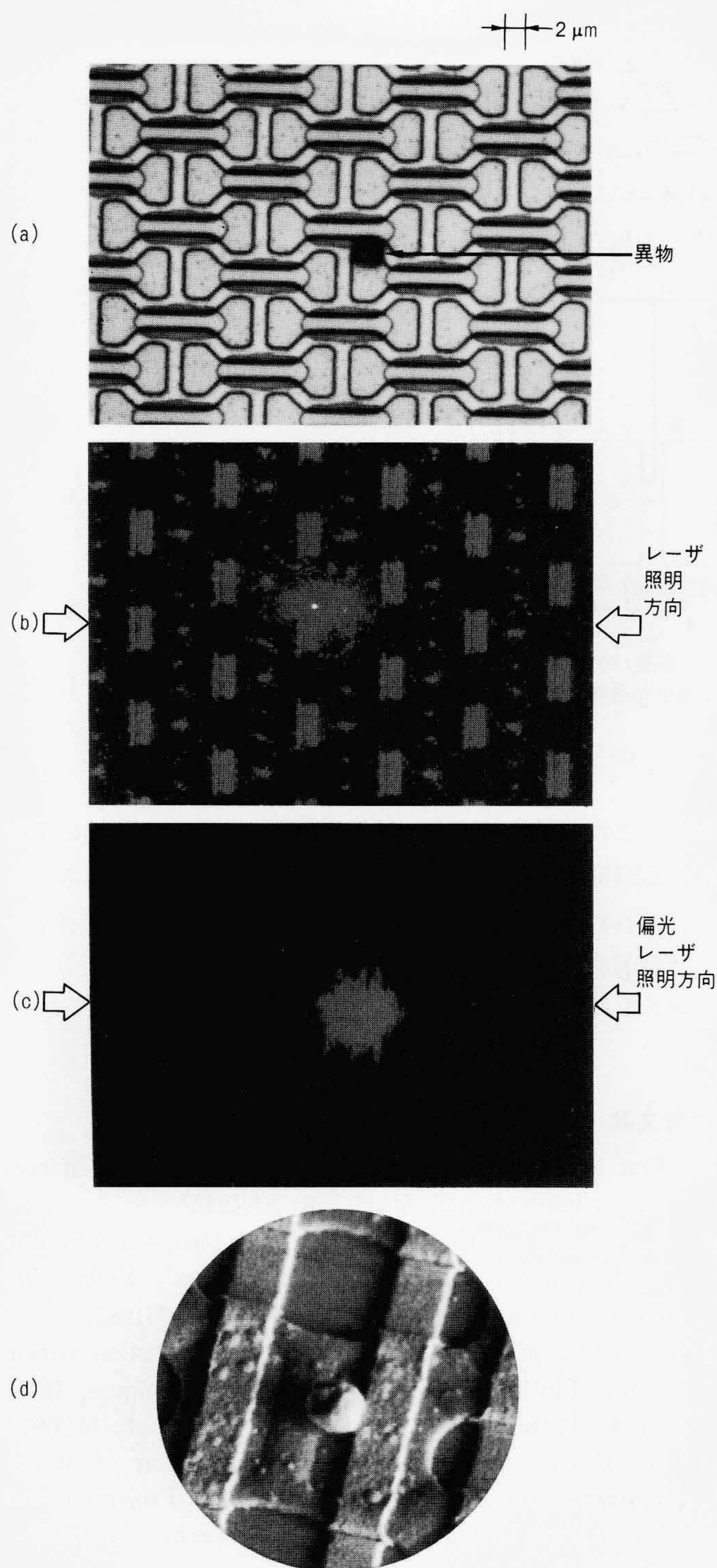


図13 パターン上の異物検出例 (a)は顕微鏡観察像を、(b)は偏光を利用しないレーザー照明検出像を、(c)は偏光を利用した検出像を、(d)は検出異物のSEM(走査電子顕微鏡)観察像をそれぞれ示す。

には、多層パターン上の欠陥を検出しなければならない。この場合、多層パターンに存在する層間アライメント誤差^{※3)}を許容して欠陥だけを検出することが不可欠である。検査原理は、メモリ素子セル部のようにチップ内に繰り返しパターンが存在する場合には、層間アライメント誤差の影響を受けないチップ内の繰り返しパターンを比較検査³⁾し、チップ内に繰り返

しパターンを持たない周辺回路部やロジック素子では、図7に示したものと同様に隣接する2チップを比較検査するものである。2チップ比較検査では、上述の層間アライメント誤差を許容するためカスケードパターンマッチング法を開発し、欠陥検出している。カスケードパターンマッチング法の原理を図14に示す。同図に示すモデルは、層間アライメント誤差 Δl を持つ2層パターンである。ここに示す処理手順を簡単に説明する。

検出画像(a)と記憶画像(b)を、微分処理によって得られたエッジ2値画像で位置合わせする(c)。位置合わせ後、差画像を検出する(d)と同時に、差が小さい領域を一致部(正常部)とし、その部分を消去するためのマスキングパターンを発生する。さらに、一致しなかった領域(マスクされない領域)に対して再度位置合わせ(e)と差画像検出(f)、一致部消去を行い、1段目と2段目のおおよその差画像(d)、(f)の最小値合成(g)を行う。以上の処理を繰り返すことによって、多層パターンの層間アライメント誤差を吸収した差画像を形成してゆく。

最終的に、適切な処理段数を判断し、その段の差画像を選択し、しきい値処理で欠陥を検出する。この例では、2段目までで層間アライメント誤差による不一致部が消去され、欠陥だけを正しく検出できているのがわかる。このように、多段(カスケード)に位置合わせ・一致部消去を繰り返し、最終的に欠陥を検出し、多層パターン上の微小欠陥検出を可能としている。

検出した欠陥の一例を図15に示す。隣接チップどうしを位置合わせ後、差をとった従来法では、検出すべき欠陥のほかに層間アライメント誤差に起因する不一致部が多数存在して欠陥と区別できない(d)。同図(c)は、カスケードパターンマッチング法を適用した結果を示すものである。層間アライメント誤差に起因する不一致部は消えて、欠陥だけの検出が可能になる。

6 結 言

半導体製造ラインでの歩留まり向上を目的として、露光工程およびパターン形成工程での異物、パターン欠陥検査について述べた。本稿で述べた検査装置の特徴をまとめると、異物検査装置は、レーザーの偏光特性を利用して試料上のパターンと異物を光学的に弁別し、高速検査を可能にしている。またパターン欠陥検査装置は、画像処理技術を用いることによって、複雑背景下の多層パターンから微小な欠陥を検出しており、異物だけでなくプロセス不良によって生ずる種々の欠陥を高信頼度で検査できるものである。LSI製造の各工程で、

※3) 層間アライメント誤差：縮小投影露光装置のアライメント誤差に起因する層間のずれ

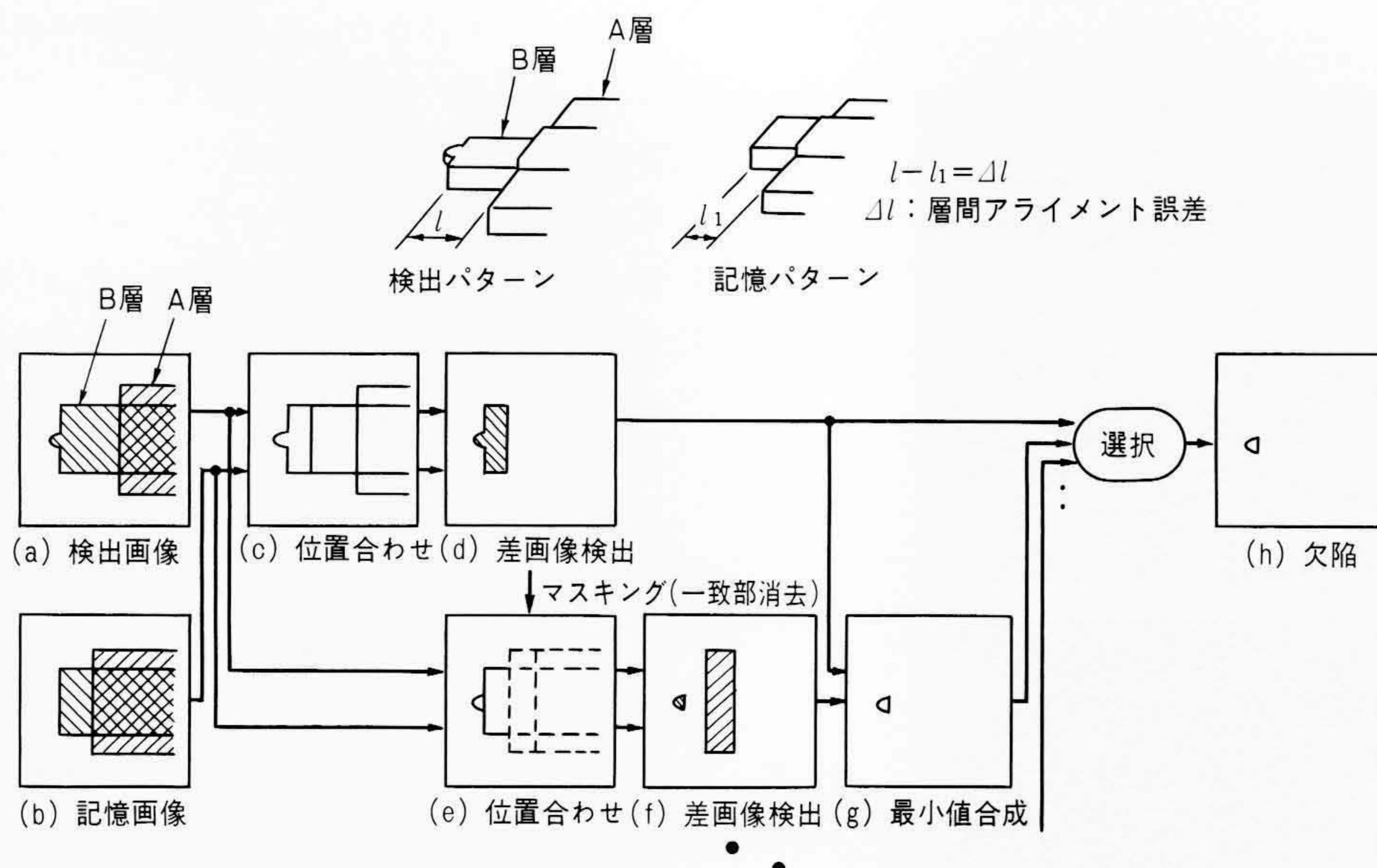
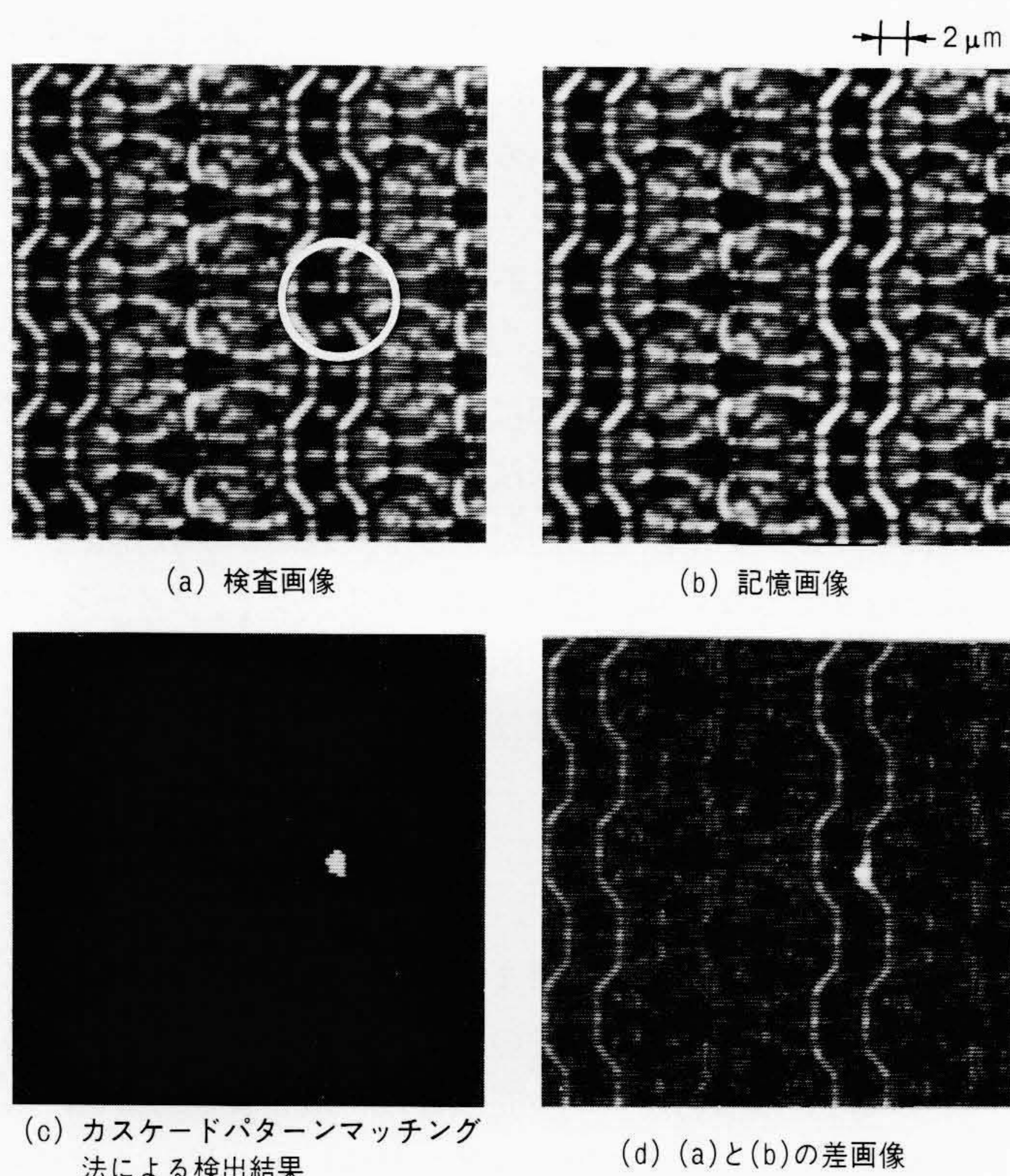


図14 カスケードパターンマッチング法の原理 多層パターン上の微小欠陥を検出するため、パターン露光工程で生ずる層間アライメント誤差による微小な層間ずれを検出しないようにしている。



注：写真○印内0.8 μm欠陥

図15 多層上のパターン欠陥検出例 (a)と(b)の差画像では層間ずれに起因する差が現れ、欠陥だけを検出できない。カスケードパターンマッチング法で、これらの誤検出要因を除き欠陥の検出を可能にしている。

これらの検査装置を活用することによって、高い歩留まりと信頼性の確保が可能となる。

歩留まりの日常管理はもとより、新世代LSIの早期立ち上げ

には、これら異物やパターン欠陥の発生状況を定量的に把握し、短時間に適切な対策を立てられることが必要である。今後、これらのニーズは微細化が進むに従ってますます高くなっていくと思われる。

参考文献

- 1) Ron Iscoff : Wafer Defect Detection Systems, Semiconductor International, 5, 11, 34~53(1982)
- 2) S. Fushimi, et al. : "Automated Visual Inspection System for Aluminum Patterns on LSI Wafers", Kodak Microelectronics Seminar Interface '85, 93~97(1985)
- 3) H. Yoda, et al. : An Automatic Wafer Inspection System Using Pipelined Image Processing Techniques, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 10, 1, 4~16(1988)
- 4) K. Harris, et al. : Automated Inspection of Wafer Patterns with Applications in Stepping, Projection and Direct Write Lithography, Solid State Tech., 27, 2, 159~179(1984)
- 5) 前田, 外 : カスケードパターンマッチングによるLSIウェハ多層パターン自動外観検査, 電子情報通信学会技術研究報告, 87, 132, 31~38, IE87-46(1987)
- 6) 松山, 外 : 濃淡画像比較によるLSIウェハパターンの精密外観検査アルゴリズム, 第2回産業における画像センシング技術シンポジウム予稿集, 295~300(昭62-7)
- 7) ソニー(株) : "レチクル品質自動評価システムARQUS-20", カタログ
- 8) 日立製作所カタログ : レチクル/マスク異物検査装置"PD-1000/2000"
- 9) 久保田 : 応用光学, 岩波書店, 146~173(1982)
- 10) 小泉, 外 : LSIプロセスにおける微小異物検査技術, 日立評論, 68, 9, 731~736(昭61-9)