

LSIプロセスにおける微小異物検査技術

Automated Visual Inspection Technique for the Detection of Small Contaminants in the LSI Production Processes

1 MビットDynamic RAMに代表される高集積LSI製造工程での不良の大部分は、プロセス中のホトマスクやレティクル及びウェーハ上への付着異物に起因する。したがって、工程歩留まりを向上させるためには、異物付着の低減及び異物付着レティクル及びウェーハを早期に排除することが重要である。そのためには、高速かつ高信頼性で、定量的に異物を検査できる装置の開発が不可欠である。これにより、プロセス装置の発じん(塵)が摘出でき、不良の大量発生を未然に防止することができる。

本稿は、レーザ照射によるレティクルやウェーハ上の回路パターンと微小異物からの散乱光の偏光特性の相違に着目した異物検査技術について述べる。

小 泉 光 義*
秋 山 伸 幸**
堀 内 昭 二***
芝 山 勝 次 郎****

Mitsuyoshi Koizumi
Nobuyuki Akiyama
Shōji Horiuchi
Katsujirō Shibayama

1 緒 言

LSI製造工程で、製品の信頼性向上、歩留まり向上は重要な課題の一つである。しかし、製品開発速度が著しく速いため、生産を開始した後、徐々に対策を施し、歩留まりを向上して量産体制を整えているのが現状である(この過程を「立上げ」と呼ぶ)。本研究はこの立上げ期間を短縮するとともに、高歩留まりで量産することを目的に、異物検査技術を開発したものである。

1 MビットDRAM(Dynamic Random Access Memory)に代表される高集積LSI製造の初期工程での不良の大部分はプロセス中の異物に起因する。したがって、製品歩留まりを向上させるには、異物付着の低減及び異物付着ウェーハの早期摘出が必要である。しかし、発じん状況を高信頼度で定量的に評価できる検査装置がないため、立上げ期間と歩留まり向上に時間を要している。そこで、これらを解決するために、高速かつ高信頼性で異物を検査できる装置の開発が不可欠である。これにより、プロセス中の発じんが多い製造装置が摘出でき、立上げ期間の短縮と併せて量産時での大量不良発生の未然防止ができる。

ウェーハ上異物検査装置^{1)~3)}は、数社から市販されているが、いずれも鏡面ウェーハを対象としているため、パターン付きの製品ウェーハ上の異物は検査できず、その適用範囲は限定され、上記の目的を十分達成することはできない。本研究では、製品ウェーハ上の異物の自動検出技術⁴⁾を開発することに特徴がある。特に、256k~1 MビットDRAM製造工程で必要とされる1 μm異物の検出技術を開発することが、本研究の目標である。

本研究はレーザの偏光特性を応用して、試料上のパターンに影響されず異物だけを安定に検出することに特徴があり、特にウェーハ上異物検出技術の高度化のために、パターンからの反射光の偏光特性を解析⁵⁾し、この反射光強度が最も小さくなる条件を明らかにした。

本稿では、LSI生産工程での異物検査に上記技術を適用して開発したウェーハ及びレティクル上の異物検査装置の性能を中心に述べる。

2 異物検査の現状

本章では、生産工程で発生する異物が歩留まりに及ぼす影響、異物検査の現状、開発した異物検査装置について述べる。

2.1 異物発生が歩留まりに及ぼす影響

DRAMに代表される高集積LSIは、図1に示すように微細化の一途をたどり、パターン付き製品ウェーハ上で2~0.6 μmの異物が付着してもパターン欠陥が発生するため、厳重な検査が不可欠である。

一般に新品種の量産開始時には十分な歩留まりを確保できないが、種々な対策を施し歩留まりの向上を図りながら量産体制が整えられる。この対策の中で異物対策が最も効果があり、これにより立上げ期間の短縮と、立上げ終了後の量産時での高い歩留まりを維持することが可能となる。

2.2 異物検査の現状

LSI製造前工程で異物検査の現状を図2に示す。

256kビットDRAM以上の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に5倍に拡大描画さ

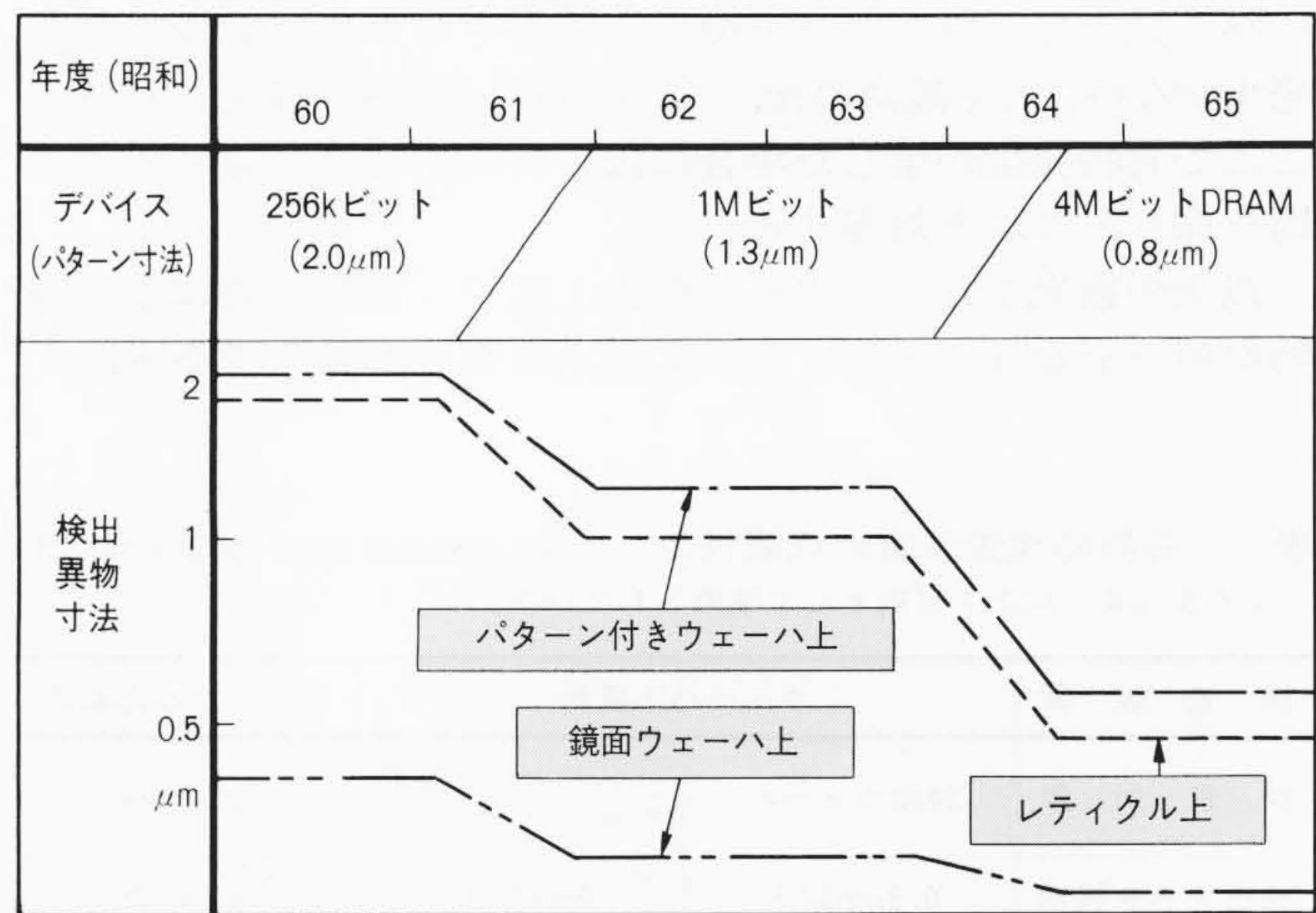


図1 パターン寸法と検出異物寸法の推移 検出異物寸法は、(1)パターン付きウェーハ上ではパターンと同程度、(2)鏡面ウェーハ上ではパターンの $\frac{1}{5}$ 、(3)レティクル上では縮小投影露光での転写限界寸法である。

* 日立製作所生産技術研究所

** 日立製作所生産技術研究所 工学博士

*** 日立製作所那珂工場

**** 日立電子エンジニアリング株式会社

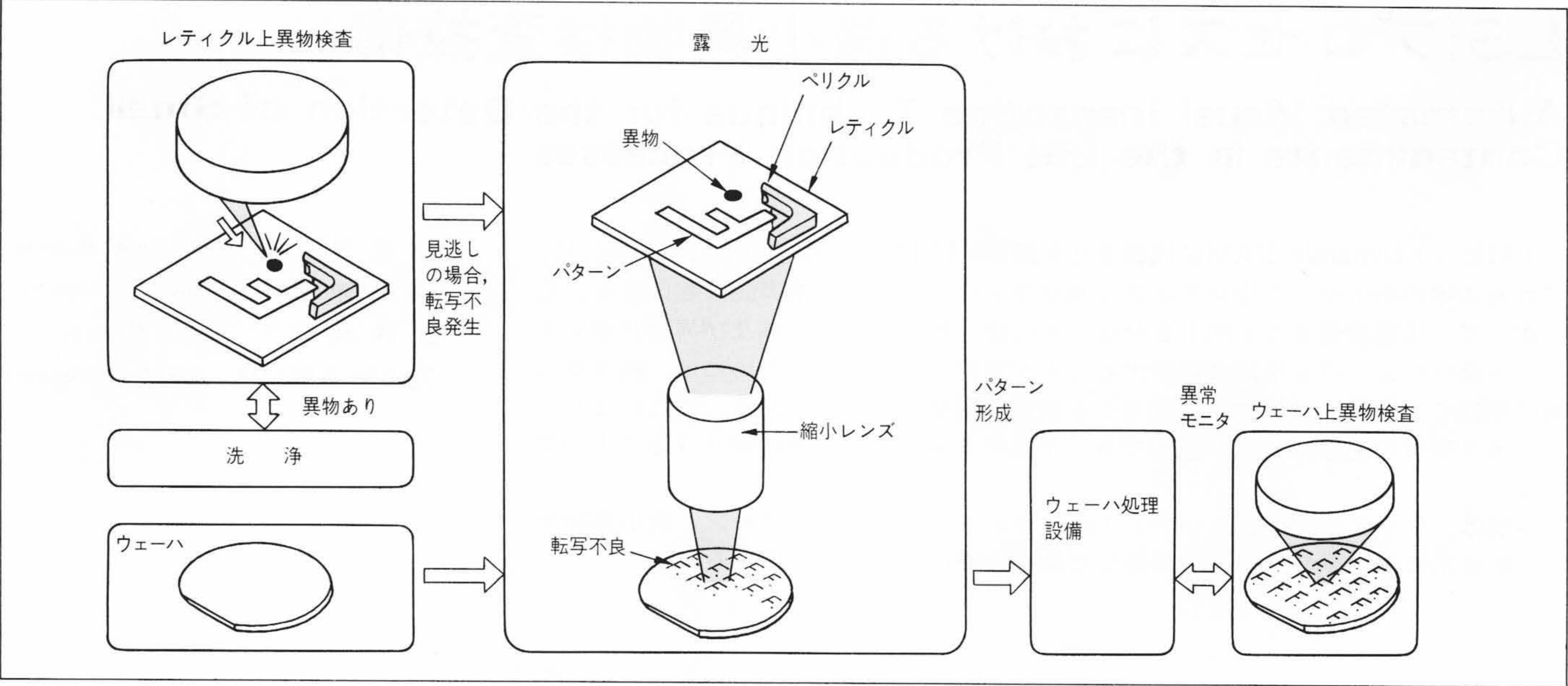


図2 異物検査の現状 レティクル上異物検査は転写不良防止，ウェーハ上異物検査はウェーハ処理設備，プロセス装置の異常モニタを各々の目的として使用されている。

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チップごとにウェーハ上に転写するものである。したがって，レティクル異物検査で異物の検出見逃しが生じた場合には，レティクル面上に異物が付着した状態で露光が行なわれるため，同図に示すように，ウェーハ上に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ない，付着異物を洗浄で完全に除去することにより，露光工程での転写不良を防止している。

また，レティクルに浮遊異物が直接付着するのを防止するため，図2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。

一方，ウェーハ上異物検査は，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を監視するためのモニタとして位置付けられる。各設備に評価用試料ウェーハを投入し，ウェーハ上の異物検査を行ない，設備に異物発生がないことを確認の後，当該設備の作業を着工している。ここで異物発生が生じた場合には，設備を止めて発じんの原因を探し，これを対策する。

以上の露光工程とパターン形成工程で，異物検査により異物対策を行なうことにより，大量不良発生が防止できる。

表1 各異物検査装置の位置付け 各々の検査装置は，大量不良防止による歩留まり向上を目的として使用されている。

検査装置	ウェーハ上異物		レティクル上異物
検査対象	鏡面ウェーハ	パターン付き製品ウェーハ	レティクル
検出すべき異物	0.3μm以上	2μm以上	2μm以上
目的	●設備の異常モニタ		●付着異物除去 ●転写不良防止
	●大量不良発生防止→●歩留まり向上		
使用法	●クリーンルーム，搬送設備などのクリーン度評価	●左記に加え成膜プロセスのクリーン度の評価	●露光装置へ装着前のレティクル上異物の検査

2.3 異物検査装置の位置付け

表1に，ウェーハ上及びレティクル上異物検査装置の位置付けをまとめた。以下に各々の異物検査装置について説明する。

2.3.1 レティクル上異物検査装置

レティクルの回路パターンは5倍に拡大されており，縮小投影露光装置によりウェーハ上に縮小して転写するため，検出すべき異物寸法はウェーハ異物検査に比べて大きい。すなわち，レティクル上異物検査では縮小投影露光での転写限界寸法の異物を見逃しなく検出する必要がある。例えば256kビットDRAMでは，表1に示すように2μm以上の異物を検出する必要がある。同様に1MビットDRAM，4MビットDRAMでは，各々1μm，0.5μm以上の異物を検出する必要がある(図1)。

2.3.2 ウェーハ上異物検査装置

表1に示すように，ウェーハ上異物検査装置は鏡面ウェーハ用とパターン付き製品ウェーハ用の2種がある。

(1) 鏡面ウェーハ用

検査対象設備がクリーンルームや搬送機構などの場合には，鏡面ウェーハを試料とするので，従来から自動異物検査装置が使用されている。鏡面ウェーハ用異物検査装置で検出すべき異物寸法は，パターン寸法の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ であり，現在は0.3μm程度であるが，今後の1M～4MビットDRAMでは0.1μm異物までも安定に検出する必要がある。

(2) パターン付き製品ウェーハ用

検査対象設備がCVD(Chemical Vapor Deposition)やスパッタなどの成膜プロセス設備の場合には，試料上にグレイン〔ナシ(梨)地状の微小凹凸〕が発生するが，従来の異物検査装置ではグレインと異物の弁別ができないため，目視検査に頼らざるを得ない。しかし，目視検査は長時間を要し，定量的な結果が得られないので，前述の目的を十分に果たすことができない。

プロセス設備でのウェーハへの異物付着状況は，パターンの有無により異なるため，パターンをもたない鏡面ウェーハで設備の発じんをチェックすることは妥当ではない。更に鏡

面ウェーハを用意するための費用がかかるとともに、途中工程で製品ウェーハに付着する異物が最終工程でどの程度LSIの特性不良につながるかの評価ができないなどの問題がある。

パターン付きウェーハ用異物検査装置は、256kビットDRAMを試料とした場合に $2\mu\text{m}$ 異物の検出が可能であるが、1M～4MビットDRAM試料の場合には $0.5\mu\text{m}$ 異物の検出も必要になると予測する(図1)。

以上述べたように、パターン付きを対象とした検査装置では鏡面の場合に比べて異物検出性能が劣り、検出可能異物寸法は大きくなるが、異物の寸法とその発生頻度は相関があるので(例えば $2\mu\text{m}$ 異物を定量的に検出できれば、 $0.3\mu\text{m}$ 異物の数が予測できる。)、上記検出性能でも設備の異常モニタとして十分使用できる。本研究では以上の観点から、特にパターン付き製品ウェーハ上の異物検出技術の開発を行なった。

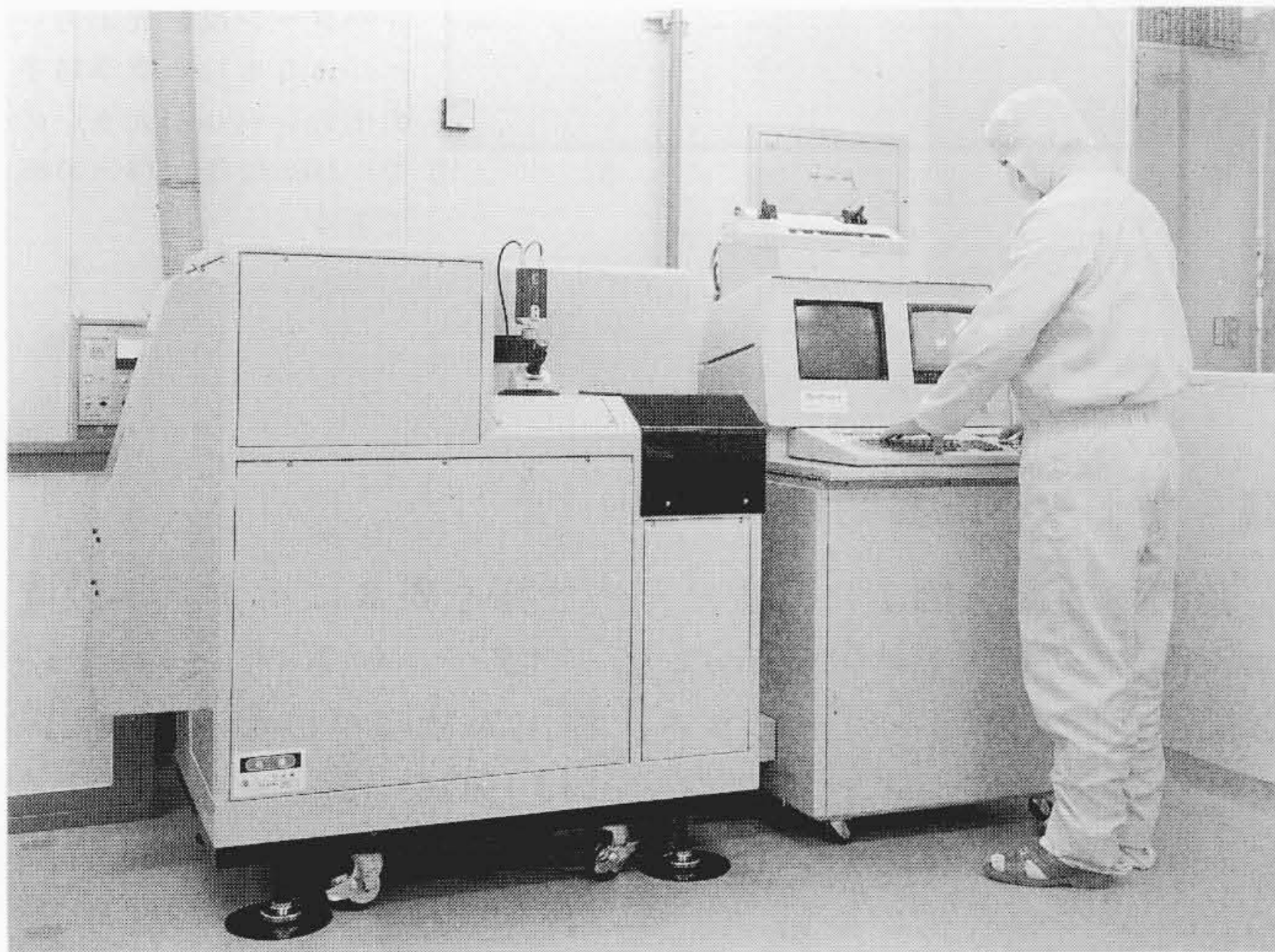


図3 レティクル上異物検査装置 レティクルを防じんケースに収納し、装置にセットする。レティクルは自動的にケースから取り出され、検査後にケースに収納される。

表2 レティクル上異物検査装置の仕様 クローム面(回路パターン面)とガラス面(裏面)の両面を、同時に約2分で異物検査を行なう。

項 目	仕 様
試 料 寸 法	□125～150($t2.3\sim4.6$)
検 出 可 能 最 小 異 物	$1\mu\text{m}$ (クローム面) $30\mu\text{m}$ (ペリクル面)
検 査 時 間	約2分(クローム面・ガラス面同時)
検 出 異 物 観 察	モニタテレビジョン, 顕微鏡
寸 法, 重 量	幅1,300×奥行700×高さ1,280(mm), 500kg

3 レティクル上異物検査装置^{6),7)}

開発した装置の外観を図3に、またその仕様を表2に示す。同図の左側は検査装置本体であり、右側は制御部と検査結果の表示部である。本装置はペリクル貼り付け前後のレティクルパターン面上の $1\mu\text{m}$ 異物の検出が可能である。レティクルを防じんケースに収納し装置にセットした後、ロード・アンロード機構によりレティクルを自動的にケースから取り出す。検査終了後は同機構によりレティクルをケースに再収納する。このように人手の介入を省き、ペリクル上に異物が極力付着しない構造とした。また、検出異物を自動的に顕微鏡の下に位置決めし、モニタテレビジョン上で拡大観察する。

3.1 検出系の構成

検出系の構成を図4に示す。He-Neレーザをガルバノミラーと $f\cdot\theta$ レンズを介して同図のように傾斜角度35度で照射して、試料をx方向に走査する。照射点からの散乱光を、集光レンズと検光子でスリット上に集光して検出器で検出する。

ここで図5に示すように45度のパターンが存在すると、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、異物だけの検出を

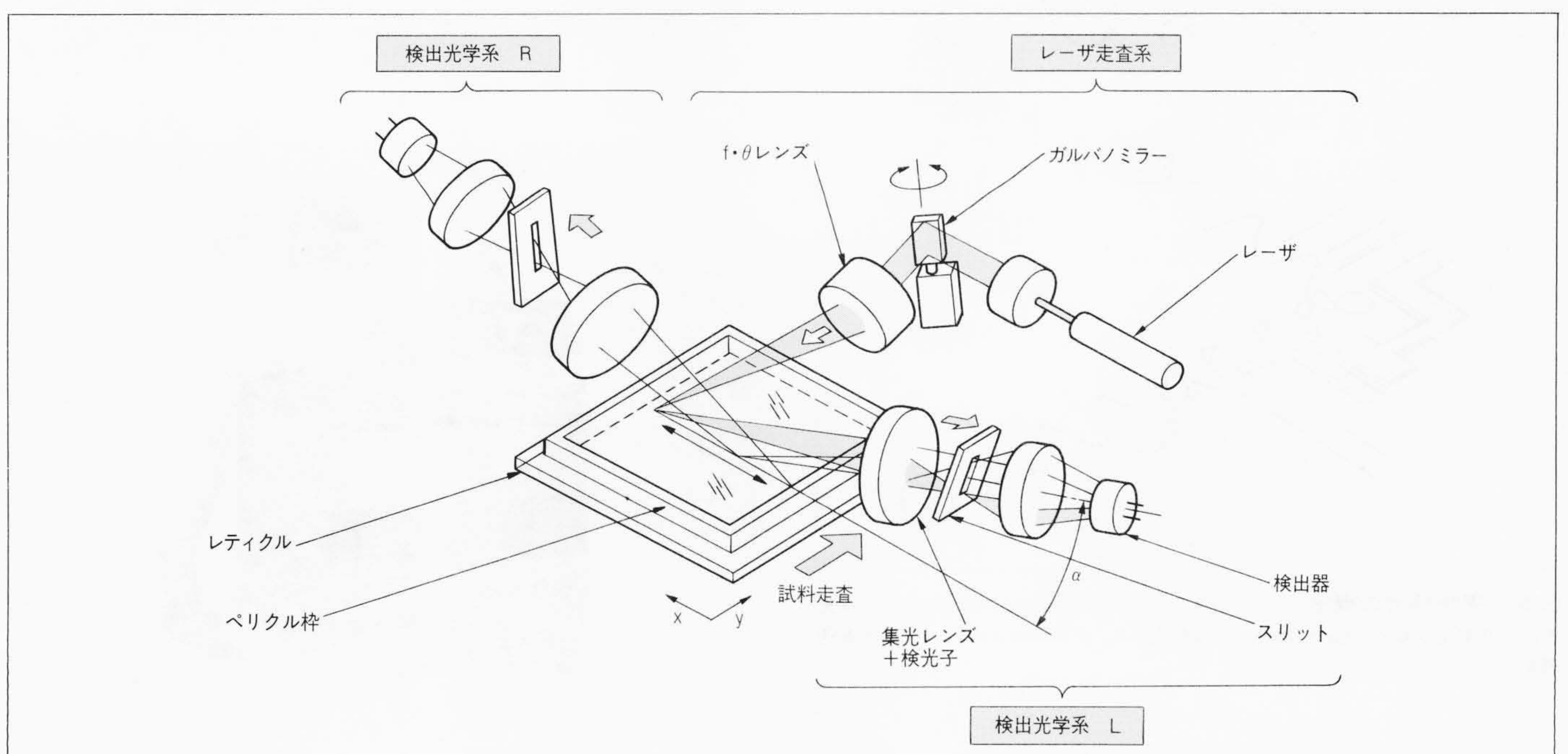


図4 検出系主要部の構成 レーザ走査系と検出光学系は、ペリクルとの干渉を回避するため、傾斜角度 α は35度としている。検出系Lは試料の左半面、Rは右半面の検査を受けもつ。

可能にした。これについて以下に説明する。

図5(a)にS偏光[※]レーザによる45度パターンからの反射光の偏光を示す。この場合、反射光の偏光は大部分がP偏光[※]となるので、検光子の検光軸をこれと垂直に配置すると、反射光は消光される。一方、同図(b)に示すように、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45度パターンの場合でも異物だけが検出できる。

ここでスリットによる検出視野の制限は、試料端部の走査でのペリクルの枠からのレーザ反射光(迷光)の遮光に役立つ。また、ペリクル枠とレーザ照射光との干渉を回避するため、検出系は左右に配置した。ここで検出系Lは試料の左半面、Rは右半面の検査を受け持つ。

3.2 検出性能

試料上に標準粒子を付けて検出した検出器出力と標準粒子径の関係を図6に示す。粒子の試料上の位置により出力のばらつきが生じるので、出力は平均値で示した。1 μm 粒子の出力レベルに比べ前述の45度パターンからの反射光の信号レベルは十分小さいので、1 μm 粒子の安定な検出が可能である。

以上述べたように、レーザ散乱光による異物検出を行なっているため、クロームパターン上の転写不良に影響のない異物も検出してしまう。このため、モニタテレビジョンによる検出異物観察により、検出異物の各々がクロームパターン上か否かの判定を行ない、レティクルの不要な洗浄作業を省く工夫を行なっている。

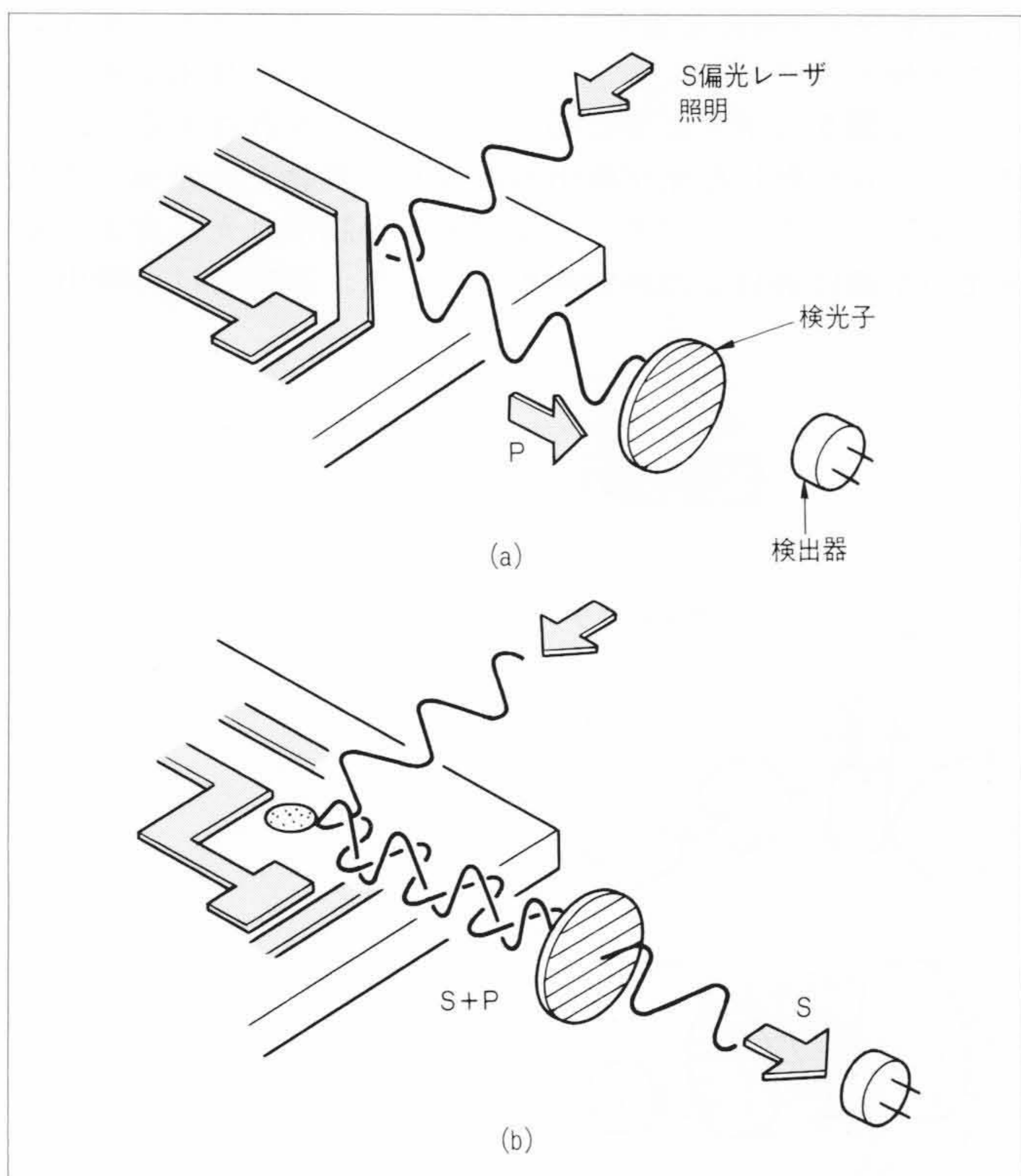


図5 異物検出の概念 (a)パターンからの反射光はP偏光となり、検光子により消光される。(b)異物からの散乱光はS, Pの混在となり、検光子を通過する。

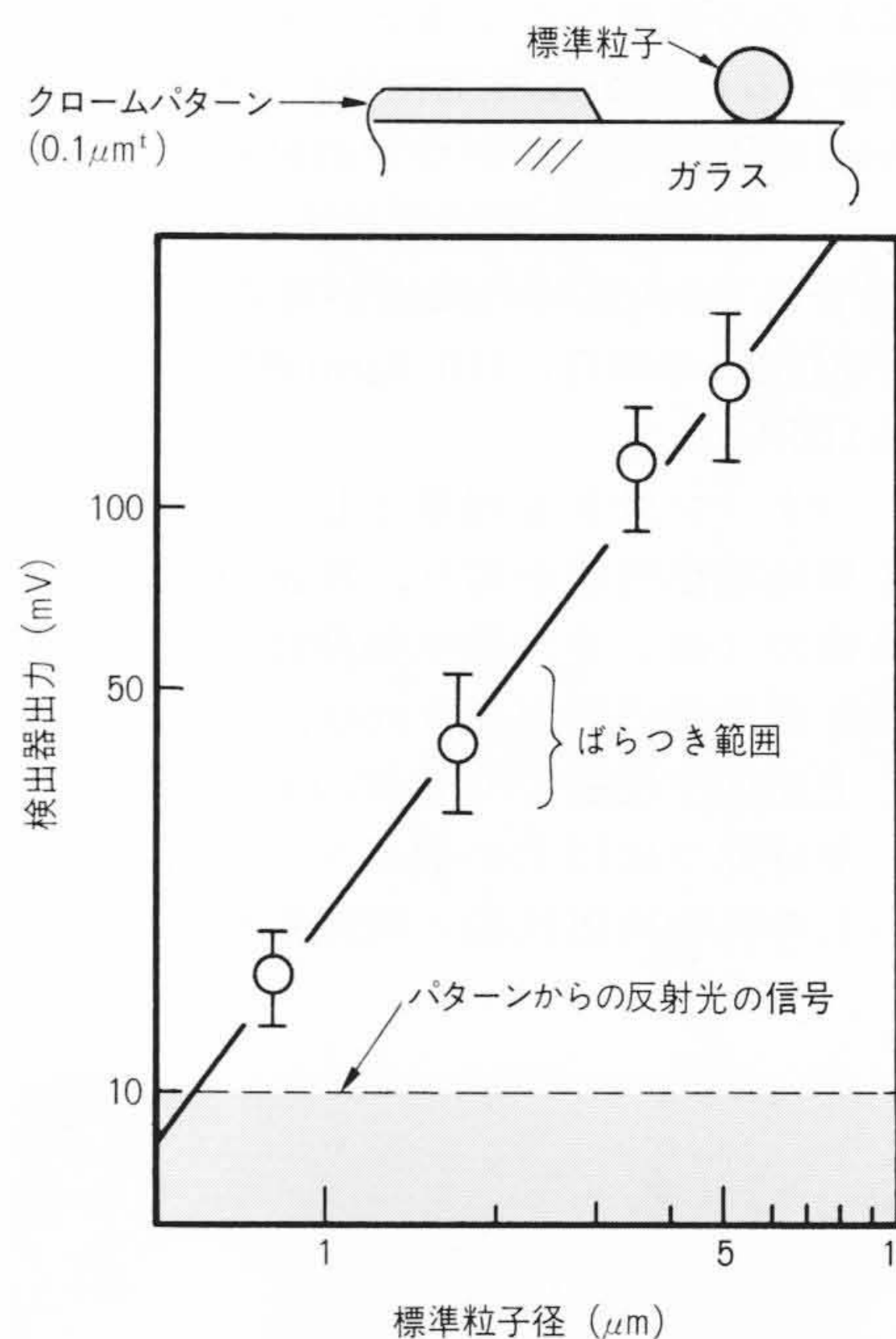


図6 標準粒子径と検出器出力の関係
パターン反射光出力レベルよりも1 μm 標準粒子の出力レベルが大きいので、1 μm 粒子が検出可能である。

4 ウェーハ上異物検査装置⁸⁾

装置の外観を図7に、またその仕様を表3に示す。本装置は鏡面ウェーハ上の0.5 μm 以上、パターン付きウェーハ上の2 μm 以上の異物を検出できる。検出異物座標は最大999個メモリされており、これらのウェーハ上の分布をディスプレイに表示する。また、必要に応じて顕微鏡下に自動的に位置決めし、個々の異物の観察ができる。

ウェーハを収納したカセットを搬入ステーションに置くと、ウェーハが自動的に異物検出ステーションに搬入される。ここでウェーハを回転(θ)しながら一方向(R)に送り、ウェーハ面上をらせん状に走査し、ウェーハ全面の検査を行なう。その後、良品ウェーハをもとのカセットに戻し、不良品ウェーハを別のカセットに収納する。



図7 ウェーハ上異物検査装置 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。

※) 振動面(電界ベクトル)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。

表3 ウェーハ上異物検査装置の仕様 本装置は、パターン付きウェーハ上の $2\mu\text{m}$ 以上の異物を約3分で検査する。

項 目	仕 様
試 料 寸 法	$\phi 100 \sim 150$
検 出 可 能 最 小 異 物	$0.5\mu\text{m}$ (鏡面ウェーハ) $2\mu\text{m}$ (パターン付きウェーハ)
最 大 検 出 異 物 数	999個
検 査 時 間	170秒/ $\phi 150$
検 出 異 物 観 察	顕微鏡, 写真撮影
寸 法, 重 量	幅 $900 \times$ 奥行 $900 \times$ 高さ $1,700(\text{mm})$, 350kg

4.1 主要部の構成

検出系主要部の構成を図8に示す。レーザ照射系はHe-Neレーザ、ビームエキスパンダから成り、異物検出の安定性向上のため前後・左右の4方向からウェーハ上の検出点にレーザスポット照明を行なう。

検出系は対物レンズ、スリット、検光子、検出器から成る。このスリット(ウェーハ面上換算 $10 \times 40\mu\text{m}^2$)は、異物とパターンの弁別の効果を顕著にしている。

4.2 異物検出原理⁵⁾

図9に検出原理を示す。同図(a)でS偏光レーザ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をも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)では、異物に照明光が当たった場合を示す。この場合、レーザ光は偏光が変化し、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なった例を図10に示す。同図(a)は表4に断面図を示した第2工程パターン上の直径 $2\mu\text{m}$ の異物の顕微鏡観察像を示す。これを左右からS偏光レーザで照明し、検光子がない場合とある場合での各々の検出像を同図(b), (c)に示した。(b)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(走査形電子顕微鏡)観察像を示したものである。

4.3 検出性能

256kビットDRAMの各工程のウェーハ上に、標準粒子を付けて検出した検出器出力と標準粒子径との関係を図11に示す。同図で、例えば第一工程ウェーハ上のパターンからの反射光検出信号は10mVである。一般的にウェーハパターンからの信号の3～4倍の信号を生ずる異物であれば安定に検出できる。

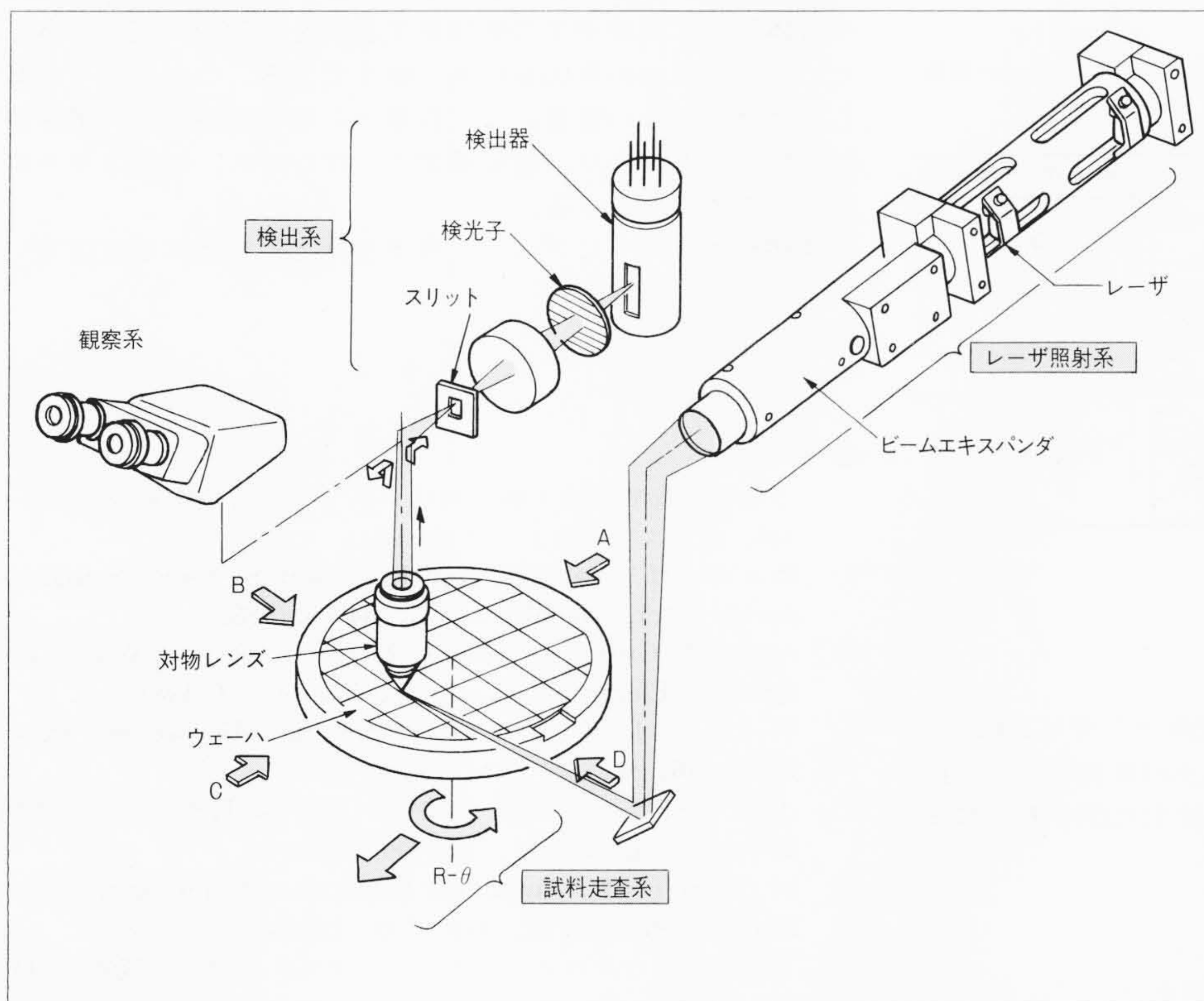


図8 主要部の構成 4方向(A, B, C, D)から検出点をレーザ照射する。ウェーハを回転させながら一方向に送ると、検出点から螺旋を描くので、ウェーハ全面が検査できる。

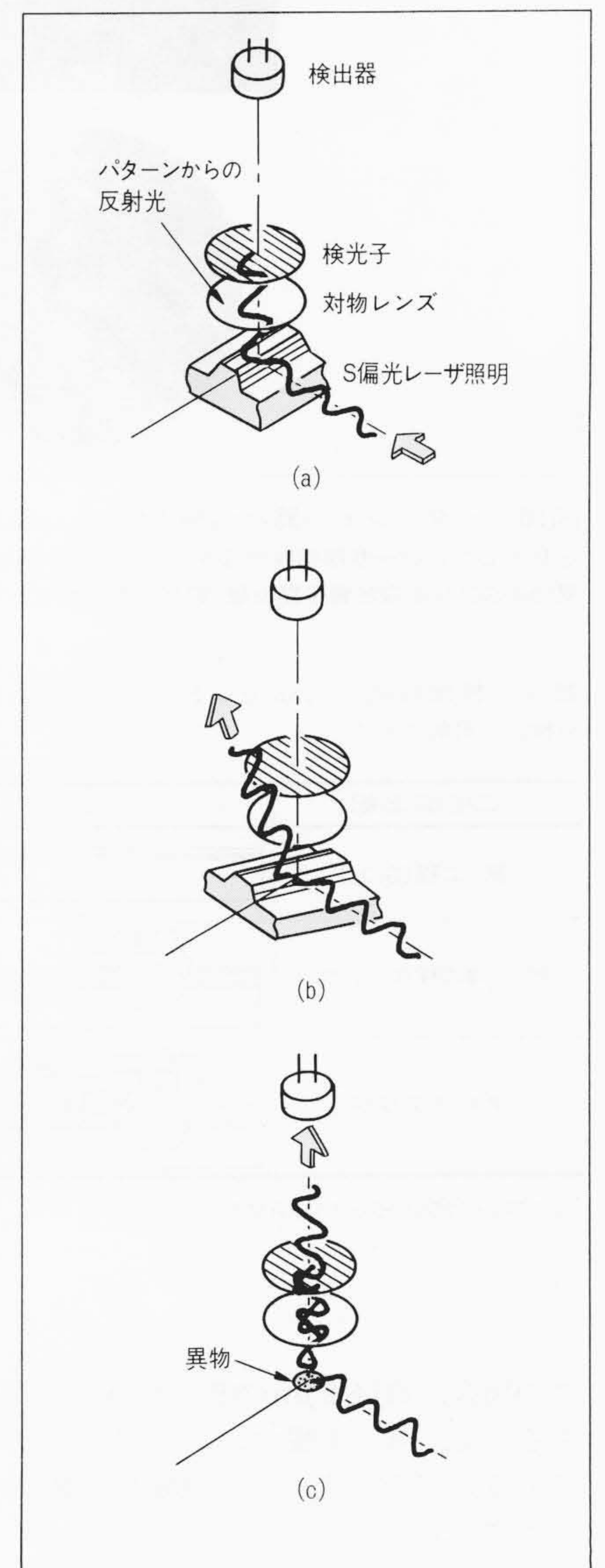


図9 検出原理 S偏光レーザ照明光に対して、(a)垂直なパターンからの反射光は検光子により消光される。(b)角度をもつパターンからの反射光は対物レンズに入射しない。(c)異物からの散乱光だけが検出器に至る。

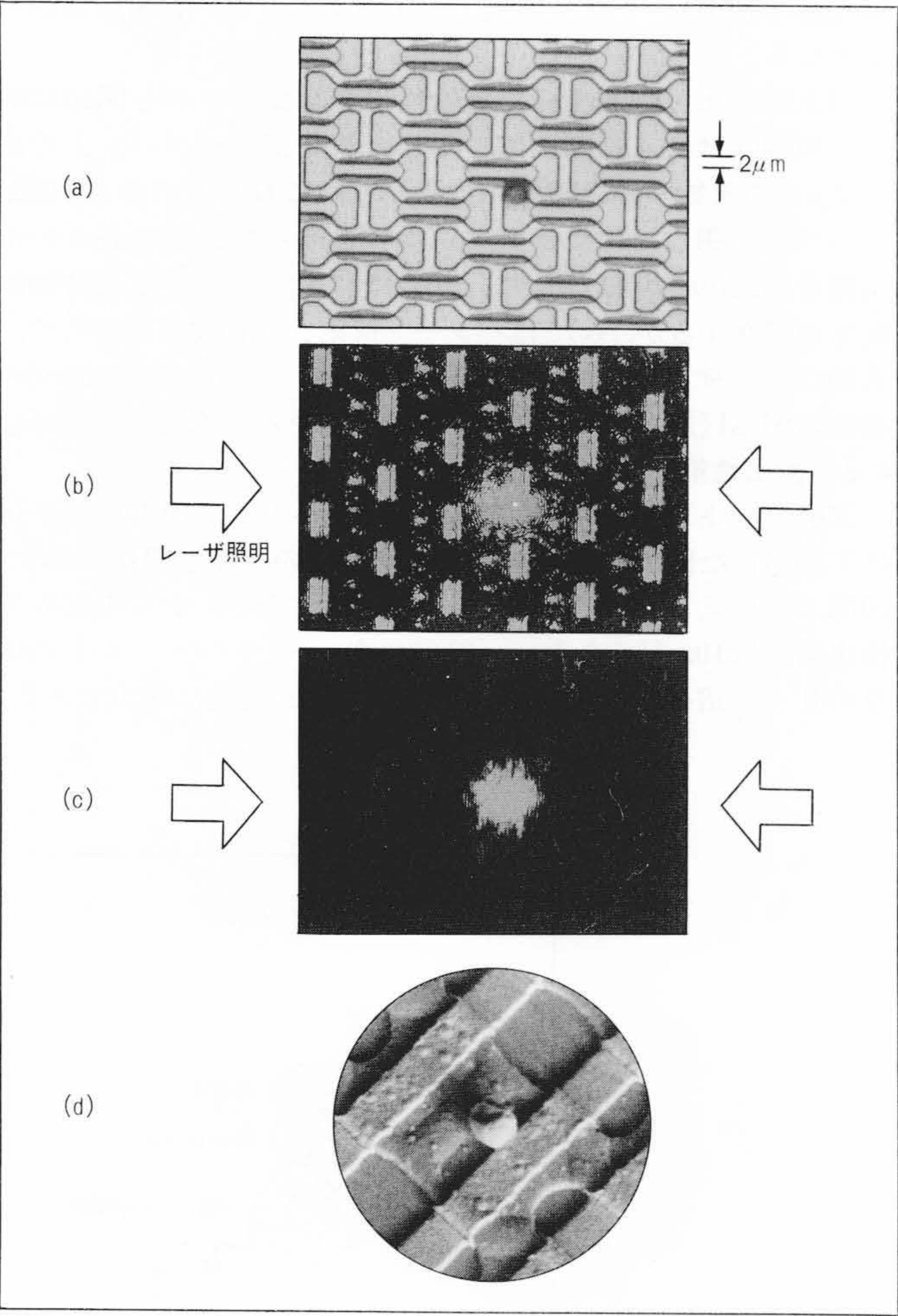


図10 パターン上の異物の検出例 (a)は顕微鏡観察像を、(b)は偏光を利用しないレーザー照明検出像を、(c)は偏光を利用した検出像を、(d)は検出異物のSEM(走査形電子顕微鏡)観察像をそれぞれ示す。

表 4 検出性能 256kビットDRAMを試料とした場合、2～5μmの異物の検出が可能である。

工程(最上層)	断 面 図	検出可能最小異物
第1工程(SiO ₂)		2μm
第2～3工程(Poly-Si)		2～3μm
第4～5工程(Al)		4～5μm

注：試料(256kビットDRAM)

この場合、直径2μmの標準粒子の散乱光検出信号は40mVであるので、第一工程ウェーハでは2μm以上の異物検出が可能である。以上のように、設定した装置の検出性能を表4にまとめて示した。

5 結 言

半導体製造ラインでの歩留まり向上を目的として、レティクル及びウェーハ上の回路パターンの存在に影響されずに異物だけを自動的に検出する技術を開発した。

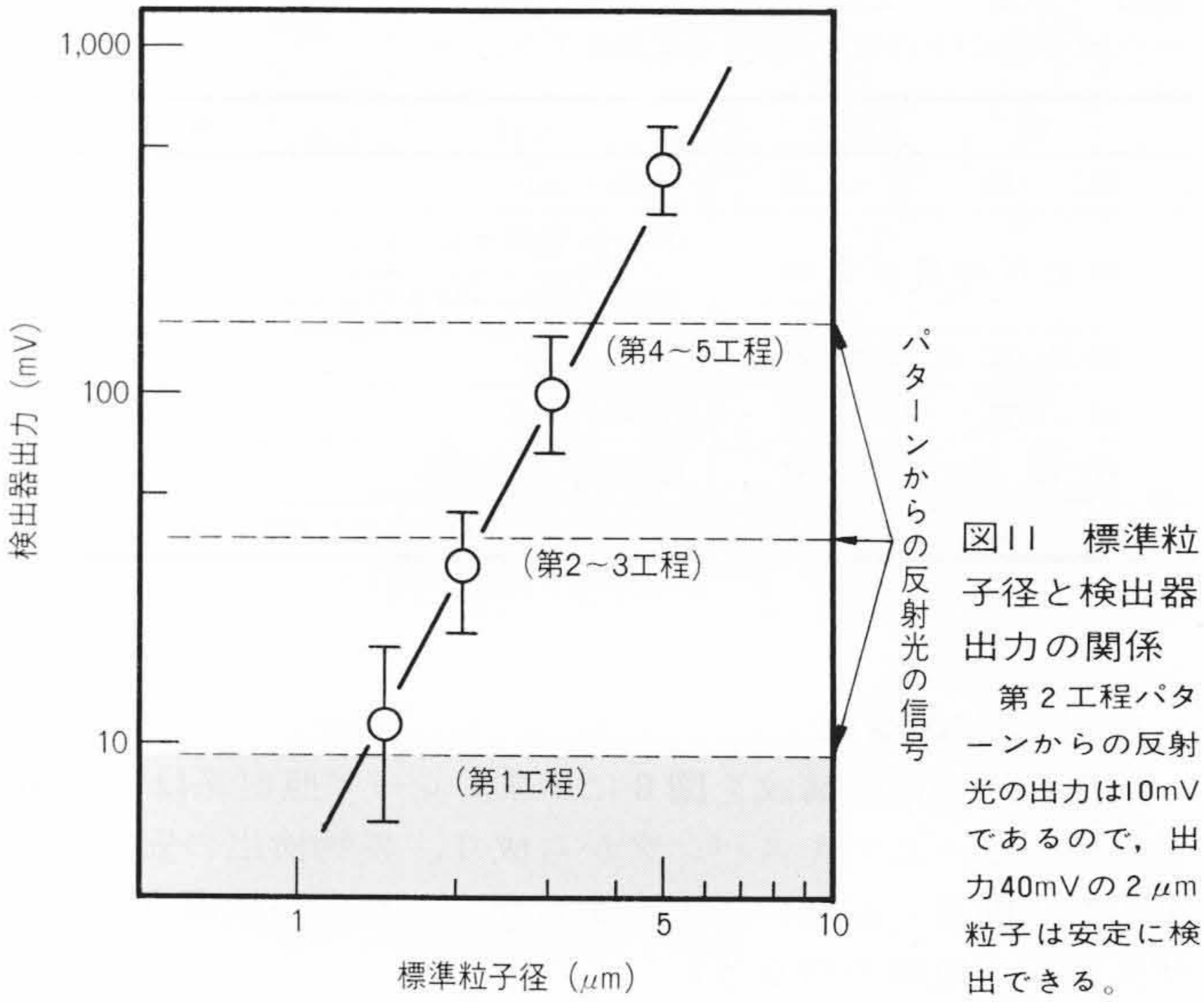


図11 標準粒子径と検出器出力の関係 第2工程パターンからの反射光の出力は10mVであるので、出力40mVの2μm粒子は安定に検出できる。

開発した2種の検査装置は、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ているため、(1)装置構成が簡単であること、(2)検査時間が短いこと、(3)検査信頼性が高いことなどの長所をもっている。このため、広く利用されており、LSI生産歩留まり向上、製品信頼性向上及び原価低減に貢献している。

本検出法には以下の適用限界がある。回路パターンのコーナ及びエッジには局部的に小さな曲率をもつ部分が存在し、この部分では異物と同様に偏光が乱れた散乱光が生ずる。本検出法では、偏光がこれ以上顕著に乱れた散乱光を生ずる異物でなければ、パターンノイズ信号との弁別ができないので検出できない。

以上のような適用限界を考慮した上で本装置を活用すれば、半導体製造工程途中での異物発生状況を定量的に把握できるため、異物発生の原因を容易に探求できる。これによって最も異物発生の多い装置、及び作業から異物発生低減対策を有効に施すことにより、投資効率を上げながら、歩留まりを向上させることができる。

本稿がユーザーにとって、多少なりとも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 小泉：最新半導体工場自動化システム総合技術集成，333～346，サイエンスフォーラム(1984)
- 2) Ron Iscoff：Wafer Defect Detection Systems, Semiconductor International, 5, 11, 34～53(1982)
- 3) Aaron D.Gara：Automatic Microcircuit and Wafer Inspection, Electronics Test, 4, 5, 60～70(1981)
- 4) W.J.Alford, et al.：Laser Scanning Microscopy, Proc. IEEE, 70, 6, 641～651(1982)
- 5) 小泉：LSIウェーハパターンからの反射光の解析，計測自動制御学会論文集，21, 8, 856～862(昭60-8)
- 6) M. Shiba, et al.：Automatic Inspection of Contaminants on Reticles, Proc. SPIE, 470, 233～239(March, 1984)
- 7) 日立製作所カタログ：レチクル／マスク異物検査装置“PD-201/201A”
- 8) 日立電子エンジニアリングカタログ：ウェーハ異物検査装置“HILIS200”