

微小欠陥及びサブミクロン粒子計測における レーザセンシング技術

Laser Sensing Technology for the Measurement of Small Defects and Submicron Particulates

半導体、撮像管などの製造工程では、微細欠陥、微小浮遊粒子の自動計測が歩どまり向上に重要な役割を果たしている。

本稿はレーザセンシング技術の工業応用の紹介をねらいとしたもので、レーザ光の回折、散乱、偏光解消現象を利用した鏡面、及び微細パターン上の欠陥、異物の検出技法について述べるとともに、サブミクロン浮遊粒子の粒径スペクトル計測技法について述べる。

具体例として、Si鏡面ウェーハ及び撮像管面板上の $0.2\mu\text{m}$ オーダの欠陥と、複雑パターン上の $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度の異物検出技法について述べ、更にクリーンルーム内の直径 $0.08\mu\text{m}$ 以上の浮遊粒子計測技法について触れる。

高見勝己* *Katsumi Takami*
 秋山伸幸** *Nobuyuki Akiyama*
 長友宏人*** *Hiroto Nagatomo*
 岩谷福雄**** *Fukuo Iwaya*

1 緒言

半導体工業を中心にして、パターンの微細化、高集積化が極度に進み、生産現場から要求される外観検査は、目視能力の限界を超えたミクロン、サブミクロンのオーダに変わりつつある。しかも、自動検査を必須条件としているところに、単なる省人をねらいとしたものでなく、検査の信頼性に重点が置かれ始めてきたことが分かる。

さて、このようなミクロンオーダのパターンの微細欠陥、あるいは浮遊粒子の実時間計測には、エネルギー密度、収束の容易さなどから判断して、レーザビームの適用が有利であり、既に実用化された技法も少なくない。

日立製作所は、レーザビームの散乱・回折・偏光解消現象を利用して、主に半導体製造工程に関連した微細欠陥、及びサブミクロン粒子の計測方法について検討を加えてきたので、それらの原理と幾つかの応用例について報告する。

2 鏡面試料上の欠陥検出

レーザ光はコヒーレンシー(Coherency)がよいため、これを収束するとき、レンズあるいは開口の回折限界まで小さく絞ることができる。ちなみに、直径 2mm のHe-Neレーザ光を焦点距離 20mm のレンズで絞れば、直径約 $8\mu\text{m}$ のビームスポット

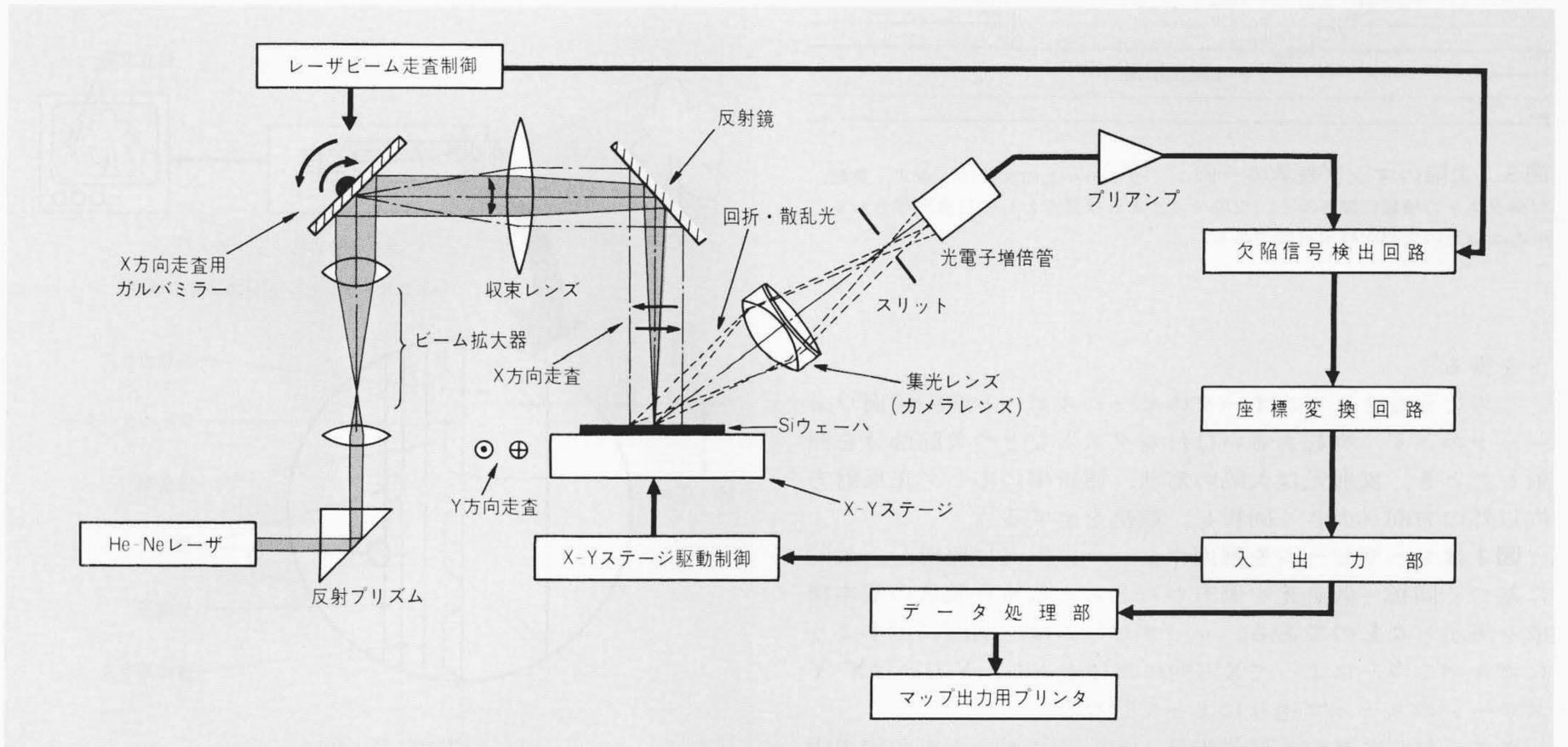


図1 Si鏡面ウェーハ欠陥検査装置の基本構成 レーザビームはSiウェーハ上に直径約 $10\mu\text{m}$ のスポット径に収束され、垂直に照射される。欠陥があれば側方へ回折・散乱光を生じ、集光レンズでこれをとらえる。

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所生産技術研究所 工学博士 *** 日立製作所武蔵工場 **** 日立電子エンジニアリング株式会社

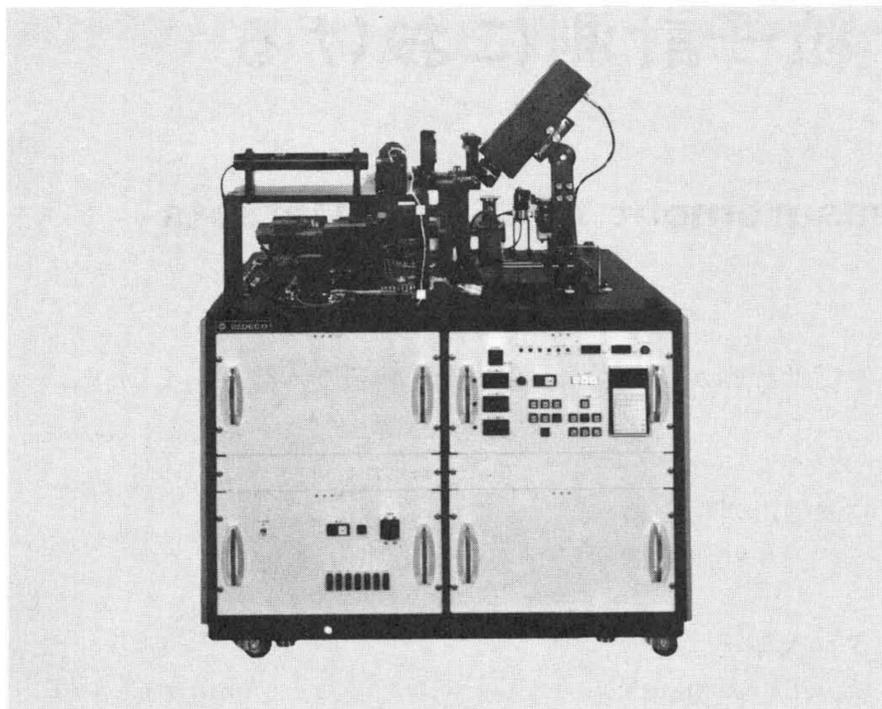


図2 レーザ面板欠陥自動検査装置HLD-200の外観 全体装置の上蓋を除去し、光学系の詳細部を示す。本装置は、クリーンベンチ内で稼動するように構成され、記憶装置、ラインプリンタなどが付属する。

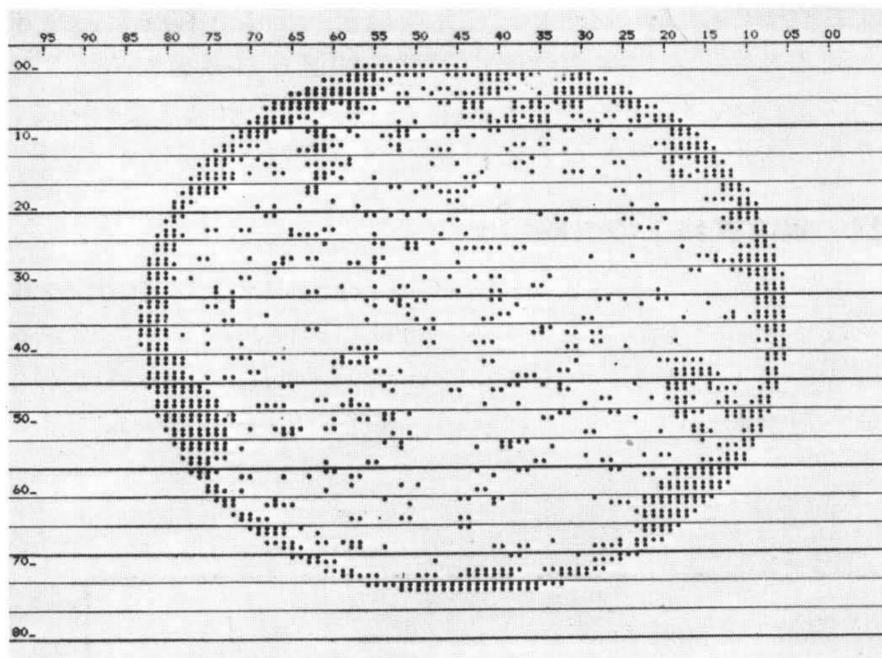


図3 欠陥のマップ表示の一例 ウェーハ上の欠陥は、きず、突起、付着ダストの種類に関係なく、欠陥でさえあれば黒点として打点印字される。0.2 μm 以上の欠陥が検出可能である。

トを得る。

このようなミクロンオーダのビームスポットがSi鏡面ウェーハ上のきず、突起あるいは付着ダストなどの欠陥部分を照射したとき、反射光は欠陥の形状、屈折率に応じて正反射方向以外の方向へ大きく回折し、散乱を生ずる¹⁾。

図1はレーザービームを鏡面ウェーハに垂直に照射し、欠陥に基づく回折・散乱光を側方からとらえる検査装置の基本構成を例示したものである。レーザービームは、同図に示すようにガルバミラーによってX方向にだけ走査し、Y方向はX-Yステージのステップ送りによって行なう²⁾。

さて、欠陥に基づく信号光は、ビームスポットと欠陥の大小関係に左右され、突起かスクラッチか、あるいは異物か単なる変色かによっても複雑に変化する。したがって、本技法にあっては、欠陥の形状、寸法、材質を同定することを断念し、鏡面上の異常部分の位置をマップ表示することを主なねらいとする。したがって、装置構成もこの主旨に沿って、(1)

0.2 μm 程度の欠陥も検出できるようにレーザービームスポットを直径10 μm に選ぶ、(2)ウェーハのレーザー走査領域を分割区分し、光学系の収差によるS/N比の低下を防ぐ、(3)欠陥の表示は、例えば1 mm^2 単位で細分割し、単位領域内での欠陥信号をバイナリー表示する、などの手法が採られている。

図2はレーザー面板欠陥自動検査装置(HLD-200)の外観を示し、直径76mmウェーハを3分以下、直径100mmのウェーハを5分以下でそれぞれ走査する。なおビーム走査周波数は、200Hz、走査幅24mm、Y方向ステップ送り幅は10 μm である。また、欠陥表示の典型例を示すと図3のようになり、欠陥の大小、質には無関係にその位置だけがマップ表示される。

応用例としては、欠陥の発生機構解明用として有効である。

3 平行パターン付試料面上の異物検出

単管式カラーテレビジョンカメラ用撮像管面板(以下、単に撮像管面板と呼ぶ)の表面には平行ストライプパターンが、磁気ディスク面板の表面には同心円状の研削マークが、平面研削盤で加工した部品の表面には平行な研削マークがある。このような平行パターンをもっている試料面上の異物や微小きずを検出する方法を、撮像管面板の異物自動検出装置を例にとり説明する。図4にカラーテレビジョンカメラと撮像管面板の構造を示す。撮像管面板は基板ガラス、3原色に相当する染料で着色したフィルタパターン、接着剤、薄板ガラス、光情報を電気情報に変換する光電膜から構成される。ここで、光電膜上に0.2 μm 以上の異物が存在すると、撮像管完成時には同図(a)に示したような白点欠陥が生ずるので、厳重に検査を行ない異物の存在する撮像管面板を排除する必要がある。

次に異物自動検出技法について述べる。図5で光電膜の直下にはフィルタパターンが存在するが、フィルタパターンを検出せずに光電膜上の異物だけを検出するのが目的である。

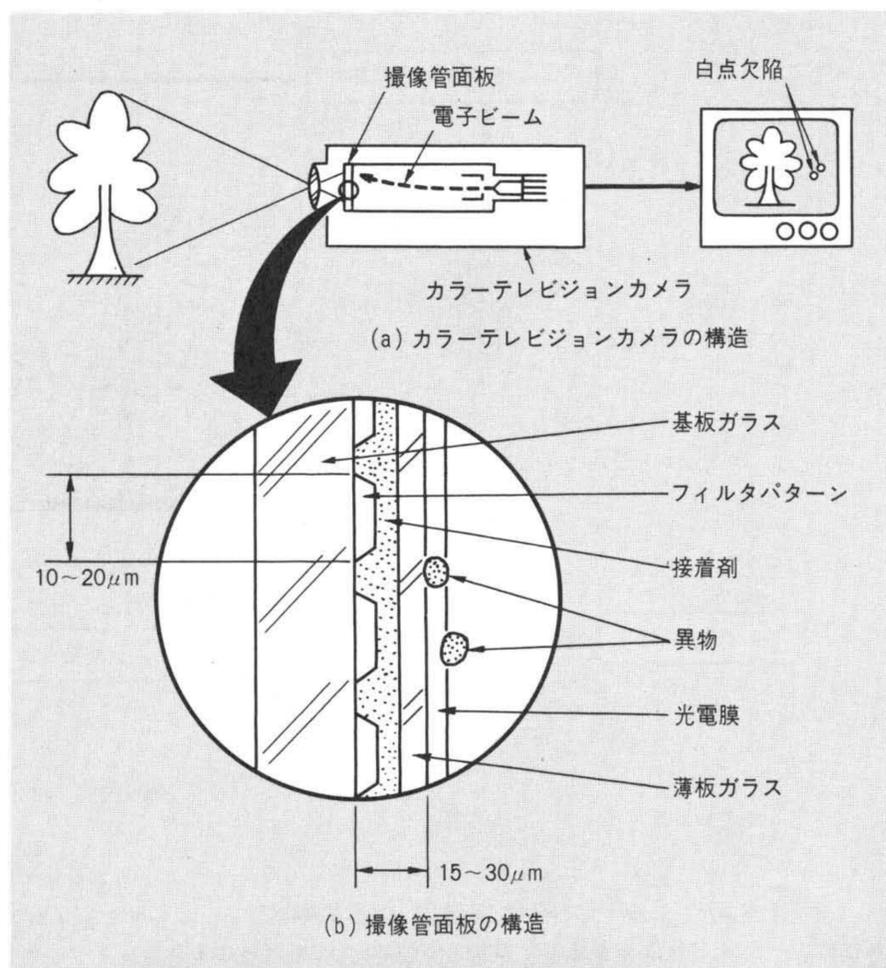


図4 カラーテレビジョンカメラと撮像管面板の構造 光電膜に異物(0.2 μm 以上)が付着すると、テレビジョン受像器上に白点欠陥が生ずるため、異物を厳重に検査する必要がある。

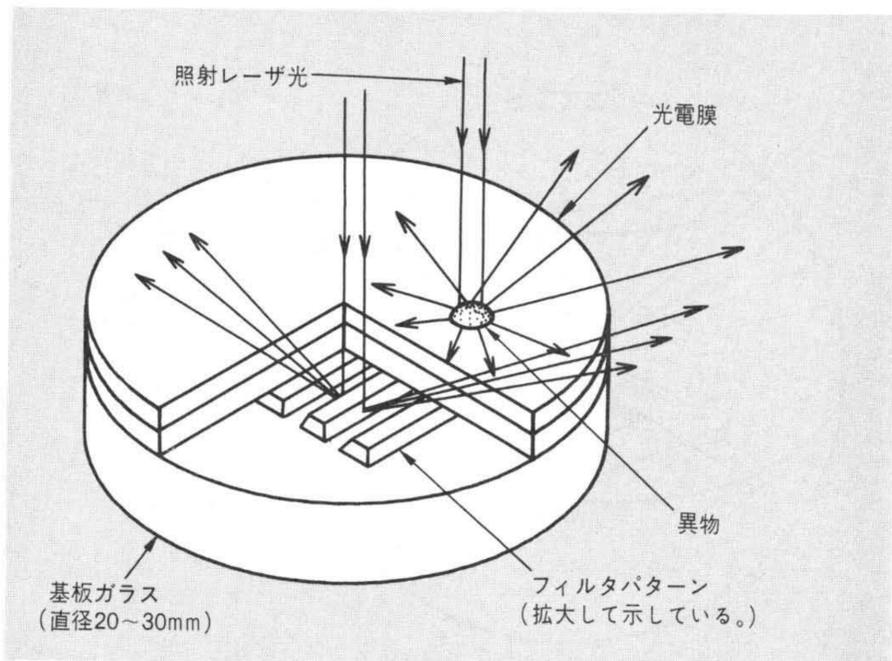


図5 フィルタパターン及び異物からの散乱光 フィルタパターンからの散乱光は、フィルタパターンに直角な面内にだけ生ずるが、異物からの散乱光は広がる。

撮像管面板の垂直上方からレーザ光を照射すると、異物からの散乱光は広がるが、フィルタパターンからの散乱光はフィルタパターンに直角な面内にだけ生ずる。したがって、フィルタパターンに直角な面内の散乱光をしゃ断し、それ以外の散乱光を有効に検出すれば異物だけが検出できる。

図6に撮像管面板異物自動検出装置の構成を示す。レーザ発振器から出たレーザ光は、回転多面鏡に当たり一方向に走査される。このレーザ光をフィールドレンズ及び対物レンズに通すと、一方向に走査するレーザスポットを撮像管面上に作ることができる。対物レンズと撮像管面板の間には、レーザスポット位置を焦点とする放物凹面鏡を設けてあり、大部分の散乱光はこれに当たったのち平行光線となって垂直上方に向かい、分岐鏡により左右に分岐し、集光レンズを経て左右の光電素子で検出される。放物凹面鏡の下側には、同図(b)に示すようにフィルタパターンからの散乱光をしゃ断するしゃ光板を設けてあるので、放物凹面鏡は異物からの散乱光だけを集光している。撮像管面板上を全面検査するためにレーザスポットを走査(振れ幅は1.2mm)し、Y方向に連続的に送り、次にX方向に1.2mmだけ間欠的に送っている。対物レンズの倍率は20倍、レーザスポット直径は3 μm であり0.2 μm 以上の異物をタクト30秒で自動検出が可能である。なお鏡面ウェーハでは直径10 μm のレーザスポットで0.2 μm の欠陥が検出できるが、平行パターンでは、S/N比が低下するので、スポット径は3 μm に絞り、検出能を向上させなければならない。

4 複雑パターン付試料面上の異物検出

IC, LSI, 磁気バブルメモリなどは、1~5 μm 程度の微細パターンで構成されている。したがって、製造工程の途中で微細な異物(突出物、例えばダスト)が付着してもパターン欠陥が生ずるため、異物を厳重に検査して、異物付着を予防している。図7に示したLSIウェーハは直径約100mm、厚さ約0.4mmのシリコン単結晶板の上に回路パターンを形成したものである。LSIウェーハ上には拡大図中に示すように複雑な多層パターンがあり、これまでに述べた方法ではパターン上の異物を検出することができない。本章ではLSIウェーハ上のパターン(線幅3~5 μm)の存在の有無に関係なく異物(2~3 μm 以上)を検出する方法について述べる。

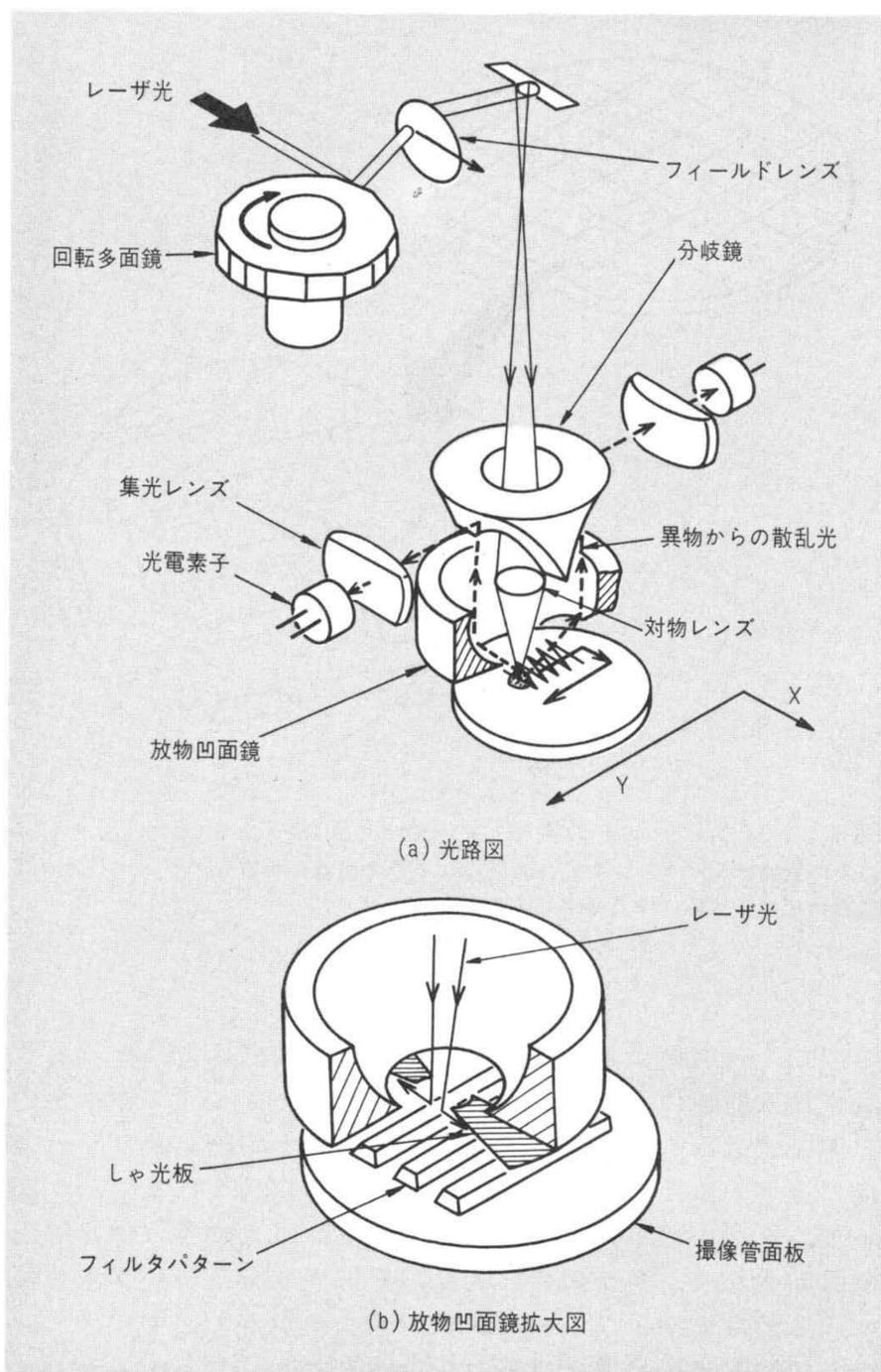


図6 撮像管面板異物自動検出装置の構成 フィルタパターンからの散乱光をしゃ光板でしゃ光し、異物からの散乱光を放物凹面鏡で有効に集光している。これにより0.2 μm 以上の異物が検出可能である。

はじめに検出原理の概念を説明する。図8でS偏光レーザ光^{※1)}をウェーハに対して角度 φ で照射する。このときウェーハ上のパターン部分からの散乱光は偏光方向が変化せず、S偏光(実線)のまま対物レンズのほうに進むが、異物に当たったレーザ光は偏光方向が変化し、P偏光成分(点線)を多く含んでいる(一種の偏光解消現象)。そこで対物レンズの後ろにS偏光をしゃ断する偏光板を設け、これを通過した光を光電素子で検出すれば、異物からの散乱光(P偏光成分)だけが検出できる。同図(a), (b)はそれぞれ偏光板除去時、及び取付け時のA面の検出像であるが、偏光板取付け時にはパターンを検出せず、異物だけが検出できることが分かる。以下にこの概念をやや詳細に述べる。

図9(a)は、レーザ光をウェーハに対して水平に照射したときのパターンからの散乱光分布を示している。パターンが水平面内で θ だけ回転したときには、対物レンズの入射瞳に入る散乱光はQ, Rの部分だけである。同図(b)は θ が変化したときの対物レンズ入射瞳内のパターンからの散乱光の分布を示している。 θ が大になるに従って散乱光は y_1 軸から遠ざか

※1) 照射レーザ光とウェーハ法線(Z軸)のなす面に、垂直に振動する偏光をS偏光、平行に振動する偏光をP偏光と呼ぶ。

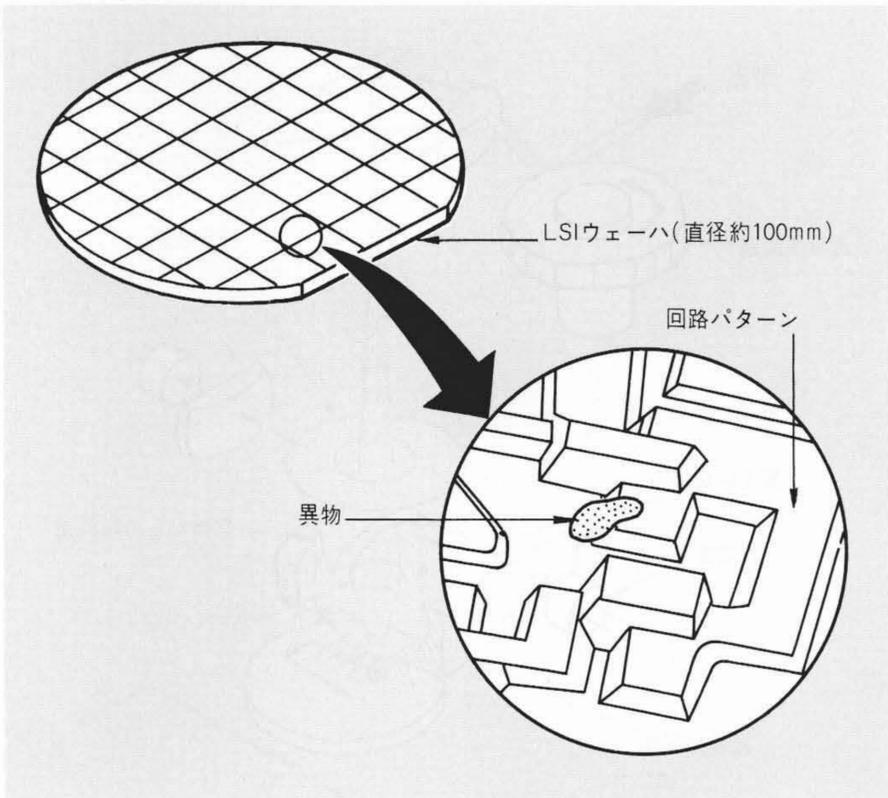


図7 LSIウェーハ上の異物(突出物)と回路パターン LSIウェーハ上の異物は、パターン欠陥の原因になるので厳重に検査し、ウェーハの表面に異物がない状態に保つ必要がある。

るので、入射瞳に入る散乱光が減少し、30度以上になると散乱光は入射瞳に全く入らないことが分かる。ここで散乱光のP偏光成分は y_1 軸上で零であるが、 y_1 軸から $+x_1$ 及び $-x_1$ 方向に遠ざかると増加することが理論的に求められる。したがって、 θ が小のときは、入射瞳に入る散乱光は多いがP偏光成分が少なく、 θ が大のときは、P偏光成分は多いが入射瞳に入る散乱光が少ないので、 θ の大小にかかわらずパターンからの散乱光のP偏光成分は少ないことが分かる。

これに対して、異物からの散乱光は対物レンズの入射瞳内一杯に広がるので、このP偏光成分の総量はパターンからの散乱光のP偏光成分の総量よりも大になる。したがって、

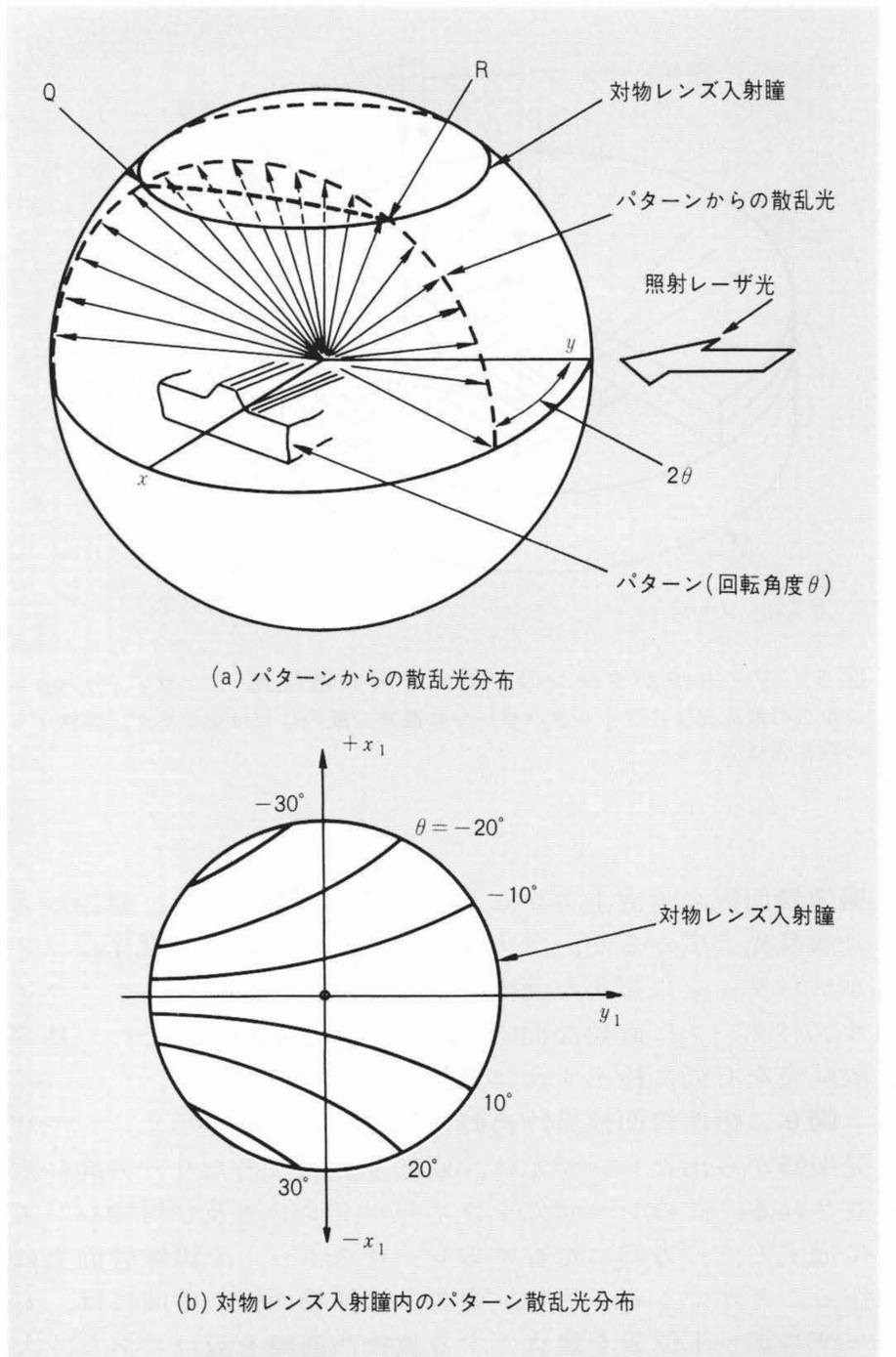


図9 パターンからの散乱光分布と対物レンズ入射瞳に入る散乱光 対物レンズの入射瞳に入るパターンからの散乱光は、Q, R部分だけである。 θ が大のときは入射瞳に入る散乱光が減少する。

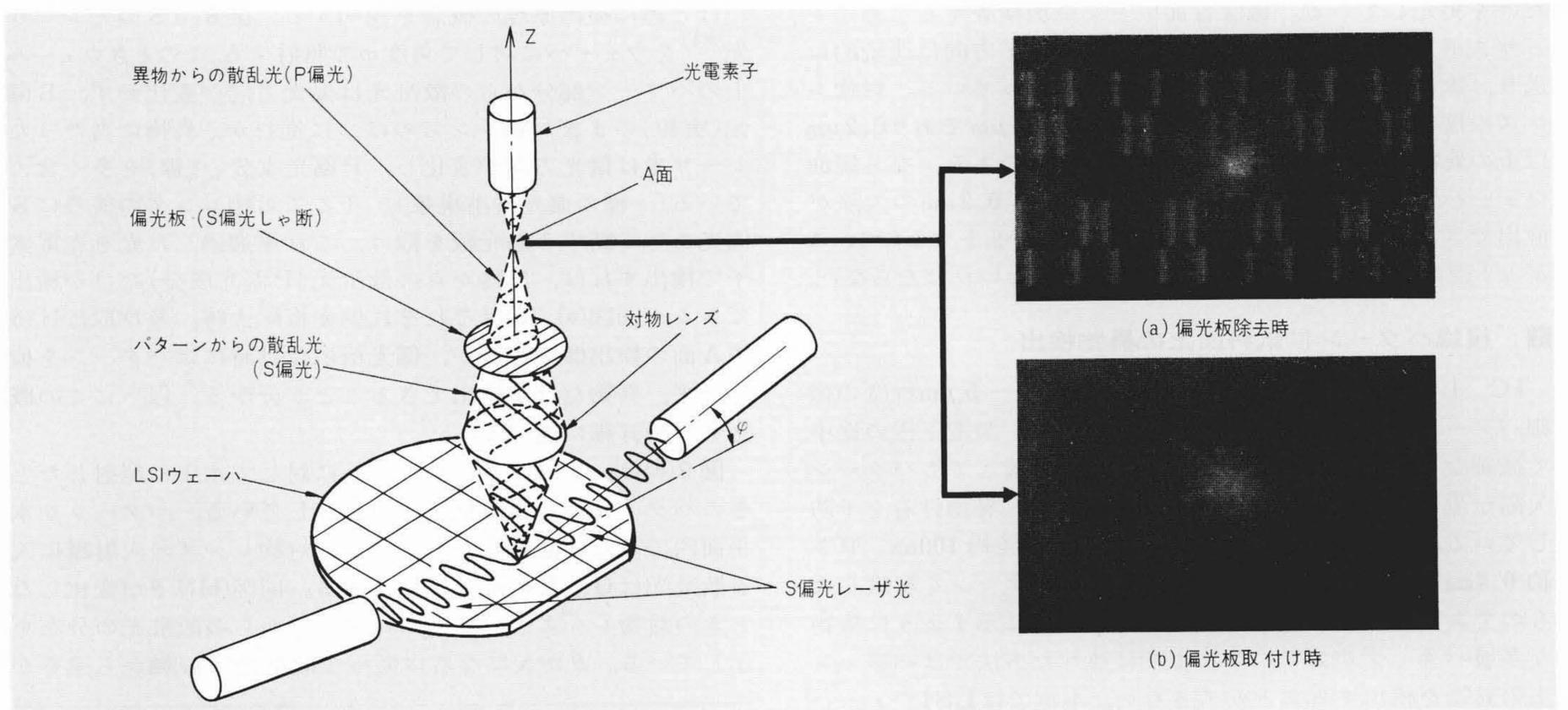


図8 LSIウェーハ上の異物検出原理の概念 LSIウェーハ上の一点にS偏光レーザー光を照射する。異物からの散乱光中にはP偏光成分が多いので、P偏光成分を検出することにより異物が検出できる。

図8で対物レンズの上方にS偏光をしゃ断する偏光板を挿入し、P偏光成分だけを光電素子で検出すれば、異物だけが検出できる。実際にはA面にスリット(ウェーハ面上換算 $10 \times 40 \mu\text{m}^2$)を設け、異物とパターンとの区別を更に顕著にしている。

図10に実用機の外観を示す。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しながら一方方向に送り、ウェーハ面上を線状に検査する。その後、良品ウェーハを元のカセットに戻し、不良品ウェーハを別のカセットに収納する。異物番地はすべてメモリされており、必要に応じて顕微鏡下に自動的に位置決めし、観察することができる。なお ϕ は1度である。

本装置によりウェーハ面上のパターンの存在の有無に関係なく、 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 以上の異物がタクト1.5分で自動的に検出される。

5 サブミクロン浮遊粒子の検出

半導体プロセス、撮像管、あるいは磁気バルブ製造工程では、雰囲気中に浮遊するダストが素子特性に致命的な影響を及ぼす場合が少なくない。そして、ダストに起因する歩どまり低下の素因分析を行なうには、粒径スペクトルの実時間計測が有効な情報を提供する。

このようにして、直径 $0.08 \mu\text{m}$ 以上のサブミクロン粒子の粒径分布を計測するために、レーザを利用したダストモニタを開発した。図11にその基本構成を示す。まずレーザビームを収束レンズでガスセル内に絞り込むとともに、粒子を含むサンプルガスをセル内に一定流量で導入通過させる。サンプルガスは、清浄空気流を用いて包囲し、一種のエアカーテンを形成して粒子のセル内飛散を防いでいる。サンプルガス中の粒子が収束レーザビーム(通常、直径 $100 \mu\text{m}$)で照射されたときMie散乱を生じ、粒径、屈折率などに対応した散乱光を発生する。これを集光レンズでとらえ、光電子増倍管で電気信号に変換したとき、信号パルスの波高値はほぼ粒径に比例し、計数されたパルス数が、単位時間に集光レンズの焦点部分



図10 LSIウェーハ異物自動検出装置の外観 カセットに収納したウェーハが異物検出ステーションに自動的に搬送され、ウェーハ上の $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 以上の異物がタクト1.5分で自動的に検出される。

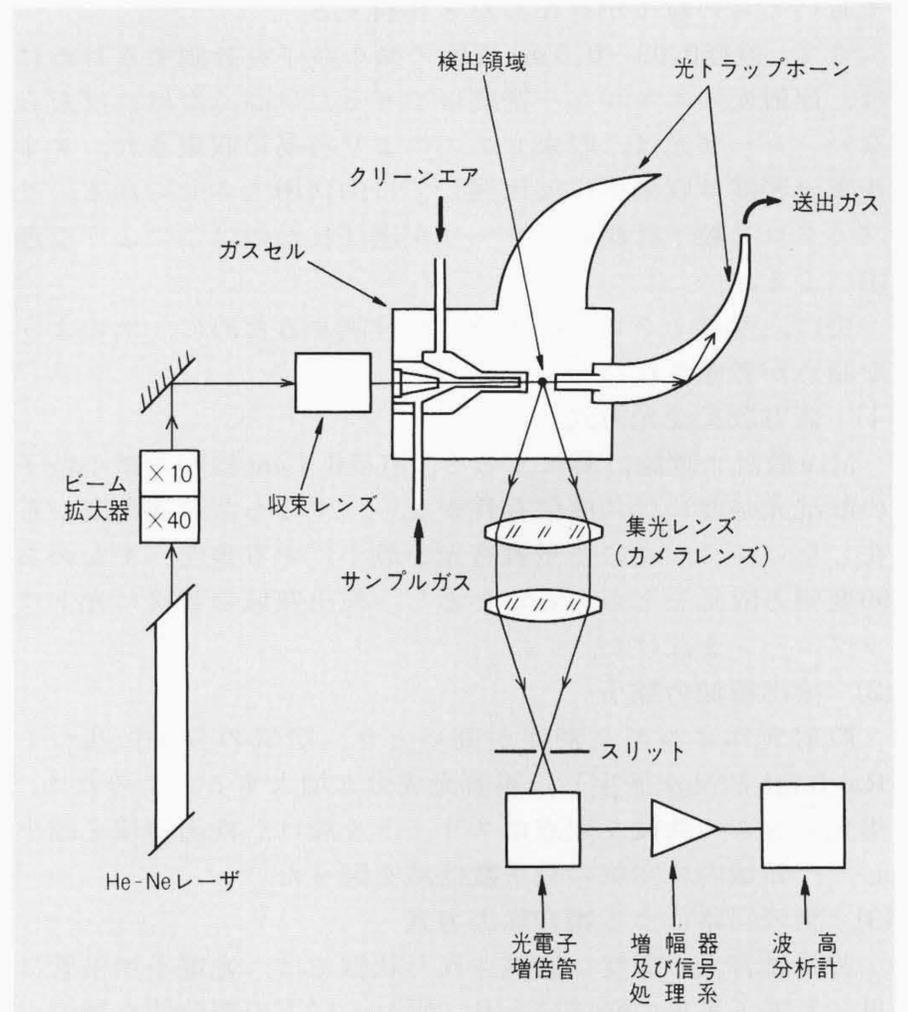


図11 レーザダストモニタの基本構成 レーザ光は直径 $100 \mu\text{m}$ のビームに収束され、ガスセル中の粒子を照射する。側方散乱光をとらえて波高分析すれば、粒子の粒径分布、個数濃度が実時間表示される。直径 $0.08 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒子の計測が可能である。

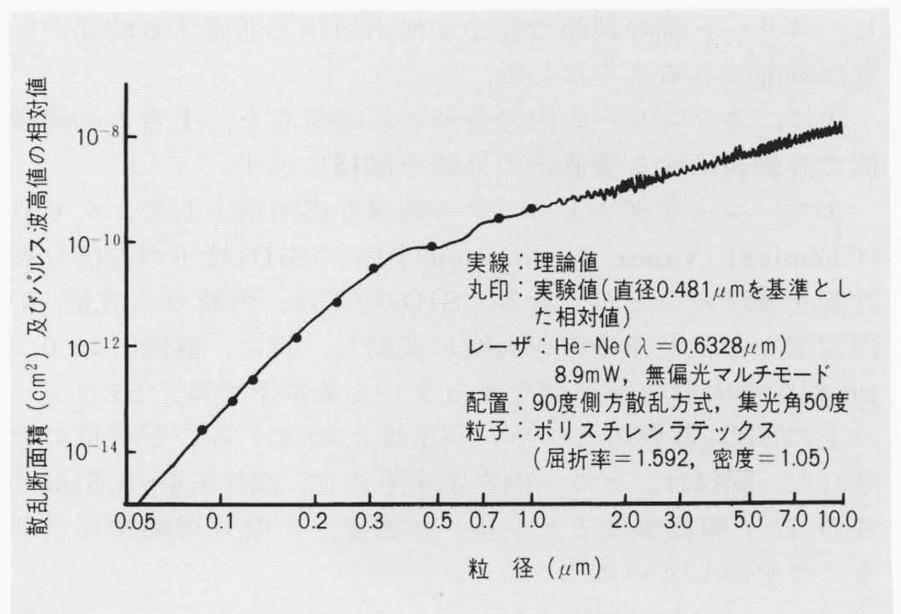


図12 散乱断面積の理論値と出力パルス波高値(実験値)との対応 標準粒子ポリスチレンラテックスに対する出力パルス波高値は、理論値とよく一致する。実際のサブミクロン粒子は、屈折率、形状などが不明なため、標準粒子換算で粒径表示するのが普通である。

(検出領域)を通過した粒子の個数濃度を表わす。したがって、波高分析計(Multi-channel Analyzer)で波高値とその頻度分布を求めれば、適当な補正係数を介して粒径スペクトルを知ることができる。

図12は、標準粒子ポリスチレンラテックス(屈折率1.592、密度1.05)に対する散乱断面積の理論値と、実際に計測されたパルス波高値との対応関係を示したものである³⁾。両者は測定誤差範囲内でよく一致している。実際には、図12を校正曲線に選び、信号の波高値から、標準粒子換算で直径(μm)い

くらくらの粒子が存在したと判断する。

さて、直径 $0.08\sim 0.3\mu\text{m}$ 程度の微小粒子を計測するためには、照射光のエネルギー密度はできるだけ高くなければならない。レーザー光は、収束レンズにより容易に収束され、エネルギー密度は収束率に反比例して自由に増大させられる。サブミクロン粒子計測に、レーザーが選ばれたのはこのような理由による。

更に、サブミクロン微小粒子を計測するために、次のような諸点が考慮された⁴⁾。

(1) 側方散乱受光方式

Mie散乱の理論計算によると、直径 $0.1\mu\text{m}$ 程度の微小粒子の散乱光強度には角度依存性がない。すなわち最適角度が存在しないので、逆に背景雑音光を最小にする角度、すなわち 90° 側方散乱をとらえることとし、検出領域の背後に光トラップホーンを設けた。

(2) 検出領域の縮小

照射光エネルギー密度が高いとき、空気分子に基づくRayleigh散乱が派生し、雑音光成分が増大する。このため、集光レンズの共役な焦点にスリットを設け、検出領域を縮小して、領域内の空気分子数低減を図った。

(3) 論理回路による雑音除去方式

背景雑音光が極度に低減された状態では、光電子増倍管は単一光電子事象の領域に入り、幅 $1\mu\text{s}$ 以下の離散的な雑音パルスが散発するようになる。この現象を利用して信号パルス幅を一桁以上大きく(約 $40\mu\text{s}$)選び、論理回路を用いて、幅の狭いパルスはすべて雑音として除去し、S/N比の増大を図った。なお信号パルス幅が自由に選択できるように、図11に示すように収束レーザービームとサンプルガスを共軸にして導入し、スリット幅の調整で粒子が検出領域を通過する時間が任意に調節できるようにした。

次に、クリーンルーム内の各所の粒径分布を、1台の制御装置で計測表示する装置系の外観を図13に示す。

また、レーザーダストモニタの特異な応用例として、CVD (Chemical Vapor Deposition) 炉中の SiO_2 粒子の粒径分布計測を挙げることができる。 SiO_2 粒子は、供給ガス流量、炉内温度などで粒径分布が大幅に変動し、特に、直径 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ 程度の大型粒子が発生するような条件下では、Siウェーハ上の SiO_2 薄膜のピンホール密度が増大することが見いだされた。図14は、その一例を示すもので、直径 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ の SiO_2 粒子個数濃度とピンホール密度とが強い相関関係にあることを示している⁵⁾。

6 結 言

レーザーを用いた微細欠陥及び浮遊粒子の計測技法について、日立製作所での研究・開発を中心に述べた。結果を要約すると、

- (1) レーザービームを直径 $10\mu\text{m}$ 以下に収束・照射することにより、鏡面上の $0.2\mu\text{m}$ 程度の欠陥検出が可能である。
- (2) 平行パターン上の異物は、回折・散乱光の異方性を利用することにより、直径 $3\mu\text{m}$ ビームスポットを用いて $0.2\mu\text{m}$ 程度が検出可能であり、複雑パターン上の異物(ダストなどの突出物)は、レーザーの偏光解消を利用して $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度以上が検出可能である。
- (3) 8mW のHe-Neレーザーを用い、光学的、電子的技法を併用することにより、直径 $0.08\mu\text{m}$ 以上の浮遊粒子の粒径スペクトルを実時間計測することができる。

終わりに、本研究開発に重要な役割を果たされた関係各位に対し、深く謝意を表わす次第である。

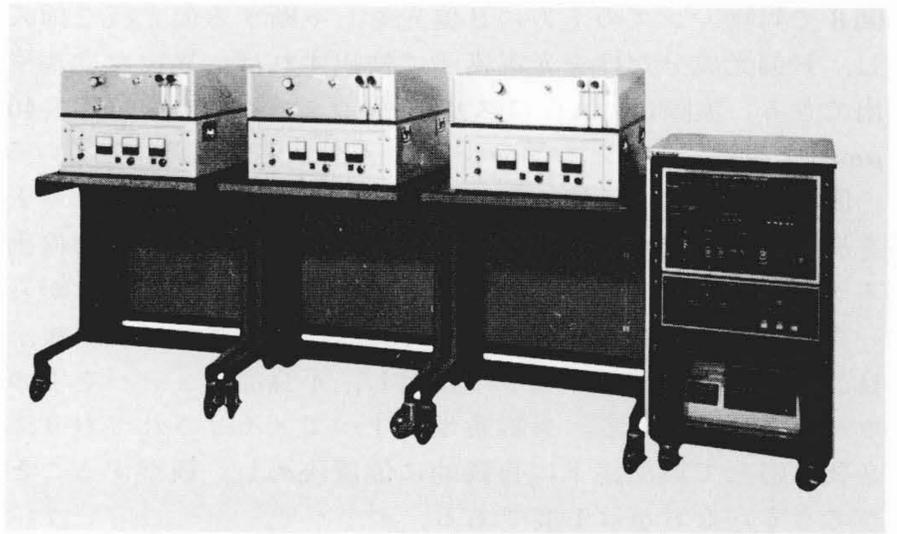


図13 レーザダストモニタTSI-500の外観 センシング部分(左側3台)は、本体制御装置(右側)から分離され、クリーンルームの所望箇所の粒径分布モニタリングを行ない、本体で一括表示する。

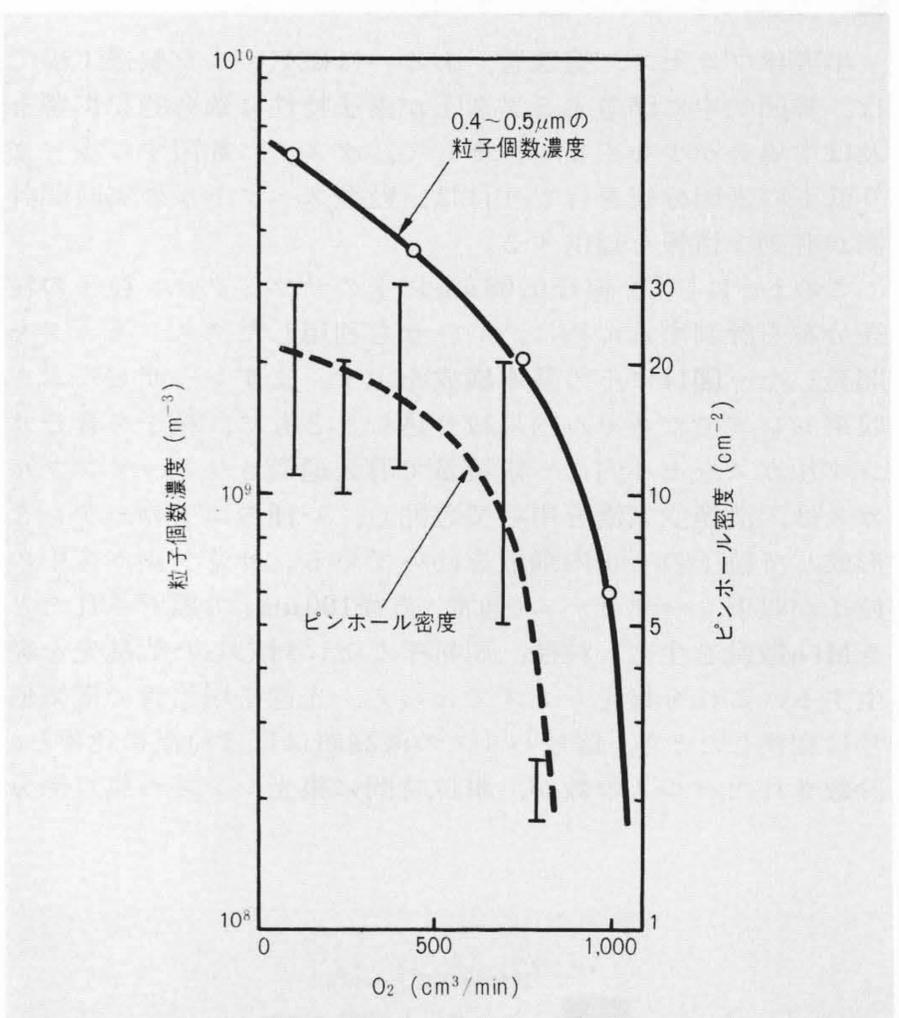


図14 CVD炉内 SiO_2 粒子濃度とウェーハ薄膜ピンホール密度との相関 直径 $0.2\mu\text{m}$ 以下の SiO_2 粒子が炉中に存在する場合は問題ないが、直径 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ の大型粒子が発生するような動作条件下では、薄膜のピンホールが急増する。

参考文献

- 1) 須田, 外: 半導体プロセスにおける欠陥・微粒子のレーザーによる検出, 電子材料, 16, 9, 103~109 (1977)
- 2) 岩谷, 外: レーザ面板自動検査装置, 電子材料, 18, 9, 34~39 (1979)
- 3) K. Suda and T. Handa: Portable Optical Particle ($0.06\mu\text{m}$) Counter, Rev. Sci. Instrum. 50, 7, 831 (1979)
- 4) K. Suda: Instrumentation for the Size Determination of Submicron Particulates Systems by Side Way Light Scattering Method, Rev. Sci. Instrum., 51, 7 (1980)
- 5) A. Shintani, K. Suda and M. Maki: SiO_2 Particulates Dispersed in a CVD Reactor, J. Electrochem. Soc., 127, 2, 426~429 (1980)