

## 半導体パターン欠陥認識技術の動向

㈱日立製作所 生産技術研究所

前田 俊二

概要：半導体ウェーハの欠陥検査は、1980年代前半から研究が始まり、半導体ビジネスの成長と共に、産業界の代表的分野の一つに成長してきた。半導体パターンの微細化に伴う欠陥検出感度の向上、高速化が常に中心課題であり、解決策が絶えず模索されてきた。本稿では、発表文献等を通して、光学的な明視野検査を中心に実用画像処理技術の研究の足跡をたどり、開発技術を位置付けると共に、今後の課題を述べる。

### 1. はじめに

半導体ウェーハの欠陥検査装置は半導体の歩留り向上、製造プロセス品質管理に不可欠のものとなっている。半導体の微細化は着実に進んでおり、それに対応し、最小検出欠陥寸法も小さくなっており、目視検査は不可能である。現在、設計ルール 65nm の半導体が既に量産されており、数十 nm という欠陥検出性能が実現されている。一方、大量の半導体チップを一括して製作するためにウェーハサイズはφ300mmにまで拡大し、φ450mmも計画されるに至り、パターンの微細さと、その微細さに比して広大な検査面積ゆえに、高速・高感度な欠陥検出が要求されている。

マシンビジョンの応用分野において、一方の代表である電子回路実装基板の検査（図1）において、はんだ付けの検査では、目視による検査が従来から行なわれ、また欠陥修正が可能であることから、ほぼ完全な検査、すなわち 100%に近い欠陥検出率、そして 0%に近い虚報率（良品を不良品と誤識別する確率）が求められている。これに対し、半導体ウェーハの欠陥検査では検査の信頼性を否定するものではないが、微細化との競争、高速化の飽く

なき追求が特徴的である。

検出対象欠陥の微細化と、検査面積の増大が同時に進行するなか、検出画素寸法の微細化による高感度化を図りつつ、それによる検査速度低下を補い、かつ検査面積の増大に対応して高速化を図ることが追求されてきた結果、産業応用の画像処理の中で、半導体ウェーハの欠陥検査はもっとも大容量の画像データを高速に処理するものとなっている。図2～4に欠陥検査装置の検出・処理性能の推移を示す。欠陥の微細化と共に検査時間の短縮を図るため、画像処理の速度も大幅に向上している。

ウェーハ欠陥検査は、一般にウェーハ上に形成されているチップ（図5. 最近ではダイと呼ぶことが多い）またはチップ内の繰返しセルパターン間の比較検査を基本としている。すなわち、図6に示すようにウェーハ上のチップ間の対応パターンを互いに比較し、不一致を欠陥として検出する「実物同士の比較」に基づく方式が主に使われてきた。設計データと比較する「モデルに基づく認識手法」や良品の特徴情報との不一致を検出する「ルールに基づく認識手法」ではなく、ウェーハ上に多数形成されたチップに

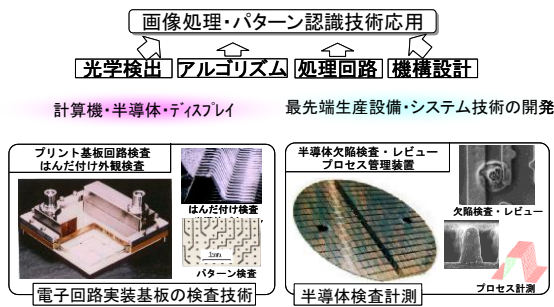


図1 マシンビジョンの産業応用分野

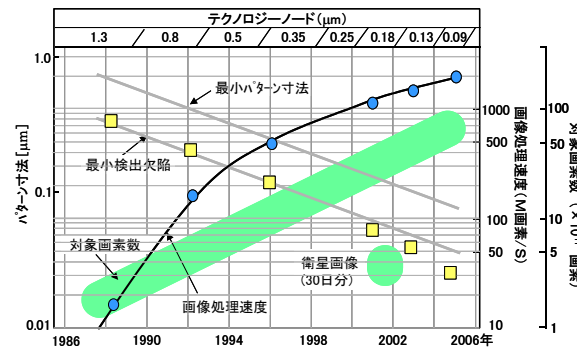


図3 LSI ウェーハ欠陥検査の性能推移その1

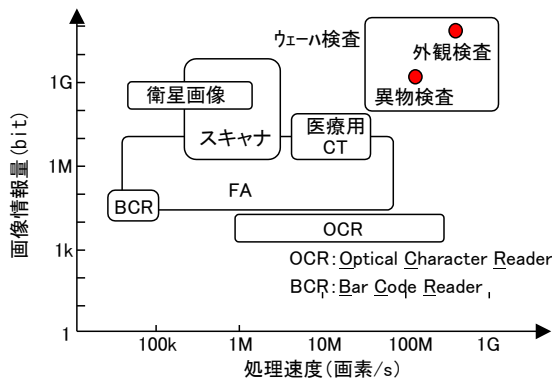


図2 各種応用分野における画像処理量

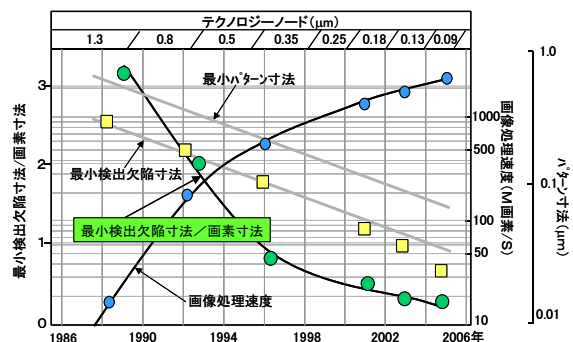


図4 LSI ウェーハ欠陥検査の性能推移その2

対し、隣接するチップの対応パターンを比較し、欠陥を認識するものである。

チップ比較はチップ全面の検査が可能であり、セル比較はチップ内のメモリセル部など繰り返しパターン部に限定される。

開発方式の多くは、可視光（ランプ光源）・明視野顕微鏡検出により得られた画像から、パイプライン形の比較処理によって、欠陥を抽出するものである。パイプライン形の比較処理は、後に高速化のため並列形の比較処理になる。

以下、技術開発を先導してきた明視野検出系の実用画像処理を中心に、ここでは5年毎の区切りで開発技術を概観する（半導体の世代に同期した研究成果とは必ずしもなっていないため、発表技術を5年刻みで整理する）。

## 2. 各年代の開発技術

### 2.1 1980～1985年

レーザ照明による散乱光検出をコア技術とした、大画素高速検出を特徴とする暗視野系の異物検査に一～二世世代遅れで、明視野検出系の研究開発がスタートした。目視検査の負荷軽減、自動化が当初の目的である。LSIパターンの当時のデザインルールは、2～1.3 $\mu\text{m}$ であり、照明の主波長が486nm、NAが0.8とすると、一般に解像度として与えられる波長/2NAの値は0.3 $\mu\text{m}$ となり、光学解像度はほとんど問題にならないレベルであった。

画像処理は、TTL(Transistor-Transistor Logic) IC や PLD(Programmable Logic Device)ベースのハードウェアが主体であり、その規模制約から2値画像処理が基本であった。

#### 微分2値画像の比較法

1982年にソニー(株)の小西らはチップ内の繰り返しパターンを対象に、検出画像を微分し、微分2値画像のパターンマッチングにより、不一致部分を欠陥として検出する方法を開発している<sup>1)</sup>。ステージ送りとストロボ発光の組合せで、TVカメラを用いて画像を撮像していた。本手法は、のちにチップ比較検査に拡張されている<sup>2)</sup>。

#### 2値画像の直接比較法

日立のFushimiらは1985年にウェーハ多層パターン上のAl配線パターンを明視野照明と暗視野照明を同時に施すことにより光学的に顕在化して2値画像として検出し、チップ比較により欠

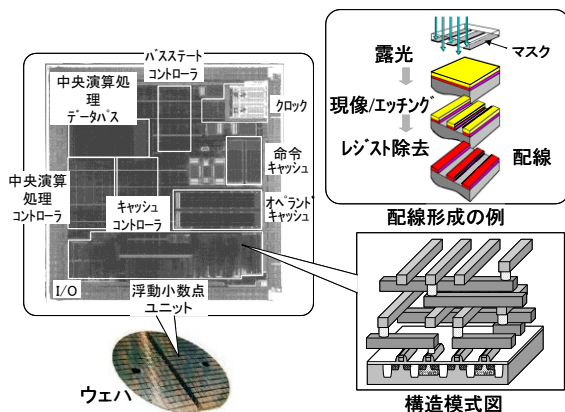


図5 半導体チップ

陥を検出する方法を開発している<sup>3)4)</sup>。現在の主流方式になっている1次元イメージセンサとステージ送りによる連続的な画像検出であった。

ここでは、Al配線パターンとそれ以外に分けるため、ヒストグラムを用いたモード法を基本とした2値化を実施している。また、2値化された二つのパターンに関して、一定の区間毎に排他的論理和の加算値を最小にする位置を実時間で測定し、位置ずれを補正する2値画像のパターンマッチング技術が実用化された。これらにより、Al配線パターン上の1 $\mu\text{m}$ 欠陥の検出を可能にしている。LER(Line Edge Roughness)やヒロック(表面の微小凹凸)などが生じ、出来の悪いAl配線パターンを精度高く検出する技術の難易度が高く、最小検出欠陥寸法と検出画素寸法の比の値は、約3であった。

### 2.2 1986～1990年

2値画像のパターンマッチングから濃淡画像のパターンマッチングへの展開が見られ、欠陥検査も2値画像処理から濃淡画像処理に基づく方法に発展した。また、設計パターン情報を参照して高感度化を図る方法が開発されるなど、多くのアルゴリズムが開発された。パターンマッチング強化形の研究が強力に進められたと言える。明視野検査装置の効果が次第に認知され、実用化が始まった時期である。

#### 局所摂動パターンマッチング法

1986年に日立の松山らが発表した、1層パターンを対象とし濃淡画像同士を比較検査する方法である<sup>5)</sup>。対象は、感光剤の有機材料(レジスト)にマスクパターンを露光・転写・現像して形成される。図7に検査原理を示す。2枚の画像を画素単位で位置合せした後、一方の画像に対し他方の画像を3×3画素の局所領域ごとにxy平面内および明るさ方向に摂動し、合わせきれない部分を欠陥として検出する。摂動したときに、2枚の画像の対応画素に関して差の符号が変化した場合、パターンが一致したとして出力を0にしている。

この方法により、図8に示すように、良品として許容すべきわずかな形状差や濃淡差に影響されることなく、レジストパターン(1層)を対象とし、0.3 $\mu\text{m}$ 欠陥の検出を可能にした。TVカメラによる画像検出とPLDベースの画像処理ハードウェアであった。カスケードパターンマッチング法

1986年に日立の前田らが開発した、多層パターンに対応する方

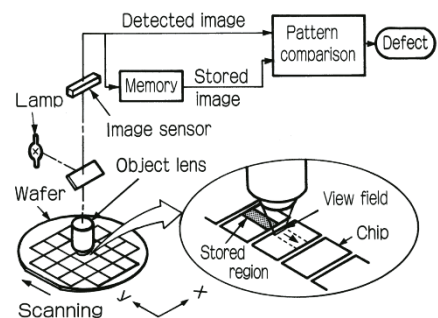


図6 検査原理

法である<sup>9)</sup>。縮小投影露光装置によるチップごとの位置合せのため、多層パターンでは図9に示す層間アライメント誤差が生じる。そこで、図10に示すように、パターンの位置合せと、一致部を消去することを繰り返すと、最終的に位置合せできない領域として欠陥を検出することができる。

パターンの位置合せは、2次微分フィルタにより構成されるエッジ検出と排他的論理和の加算値を最小にする位置を求めるパターンマッチングにより実現している。2段のパターンマッチングを構成し、0.25 $\mu\text{m}$ /画素で0.5 $\mu\text{m}$ 欠陥の検出を可能にしている。画像検出は、1次元イメージセンサとステージ送りによる方式である。上記明視野検出系は、同一ウェーハの追跡検査を通して欠陥発生工程を特定することに活用された。

### 設計パターン参照法

1986年に日立の依田らが発表した設計パターン情報を参照する検査方法である<sup>7)9)</sup>。設計パターンを参照しながら濃淡画像を2値化し、距離変換処理により欠陥寸法や配線間隔を計測して致命欠陥を検出する。

ここでは、Al配線部やSiO<sub>2</sub>部、パターン段差部などの領域の識別に設計パターン情報を用い、層ごとに異なる2値化を行い、この結果にそれぞれ異なる欠陥判定基準を用いている。これにより、Al配線部のヒロックやパターン段差部などの影響を除いている。比較的パターン密度の低いIC検査を対象に性能を検証しているが、設計データの活用は現在でも主要課題のひとつである。

### セル比較/設計パターン参照法

1988年に日立の依田らが発表した方法である<sup>10)</sup>。チップ内の

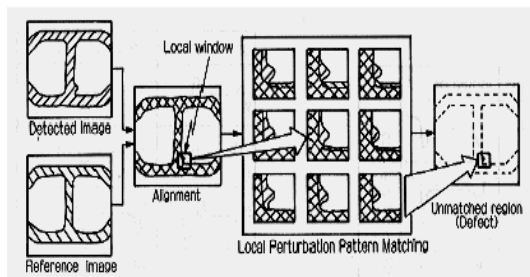


図7 局所摂動パターンマッチング法の原理

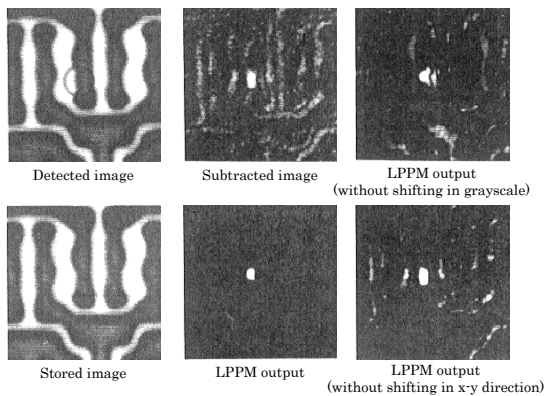


図8 欠陥検出例

繰返しセルパターン同士を比較して欠陥候補を算出し、設計パターンを参照して欠陥を抽出する。

ここでは、セルパターンの明るさを強調する目的で、ガンマ変換に似た2次多項式の階調変換処理を実施している。また、2値画像に対し、収縮処理と膨張処理を繰り返すオープニングと膨張処理と収縮処理を繰り返すクロージングにより、ノイズの低減と連結処理を実施している。さらに、欠陥の位置や面積を精度良く算出するためには、欠陥のラベリング処理が必要であるが、従来2パスであったラスタスキャンによるラベリング処理を1パスで実現することを可能にしている。これらにより、0.2 $\mu\text{m}$ /画素で多層パターン上の0.6 $\mu\text{m}$ 欠陥の検出を可能にしている。繰返しセルパターン同士を比較する部分は、上述したAl配線パターン検査装置とほぼ同時期に実用化されており、明視野検査の先駆けとなった技術である。

### 局所濃淡比較法

1988年にIBM社のDomらが発表した、繰返しパターンを対

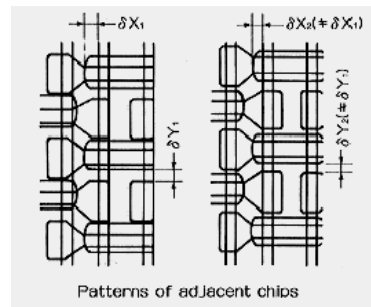


図9 層間アライメント誤差

象に局所ウィンドウで濃淡画像を比較する方法である<sup>11)</sup>。これに

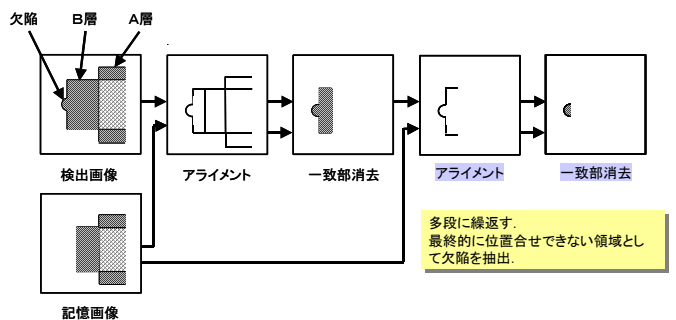


図10(a) カスケードパターンマッチング法の原理

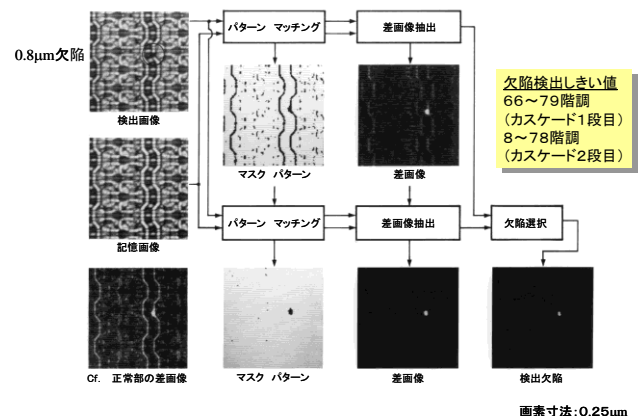


図10(b) カスケードパターンマッチング法の画像処理例 (3層パターン)

画素寸法:0.25 $\mu\text{m}$



より、0.5 μm 欠陥の検出を可能にしている。

グレイン対応しきい値生成法

1990年に日立の前田らが発表した、表面の微小凹凸であるグレインを誤認識することなく、欠陥を検出する方法である<sup>12)</sup>。図11に概念を示す。後述の統計的良品パターン生成(図18)と同様に複数枚の検出画像を用いて、2次微分によりパターンエッジを検出し、エッジを境界線とした閉領域を抽出する領域分割を行って、分割された領域毎に異なるしきい値を設定する。セル比較に適用され、セル内と雖もパターン毎にきめ細かくしきい値を制御可能なことが特徴である。設計パターンやプロセス情報を用いることなく、対象パターンからグレインによる明るさ変動に応じたしきい値を自動で生成することにより、グレインが一部の層にある多層セルパターン上の0.5 μm 欠陥の検出を可能にしている。

2.3 1991~1995年

LSI パターンのデザインルールが検査照明波長と同程度になり、微細欠陥の検出にブレークスルーが必要となった。従来の画素単位の濃淡画像処理からサブピクセル単位の濃淡画像処理に発展したことが、この時期の大きな特徴である。

また、イメージセンサの蓄積時間を確保するためのTDI(Time Delay & Integration)化、タップ並列化、画像処理の並列化・LSI化により、明視野式検査の高速化が先導的に推進された。図12にTDIイメージセンサを用いた高速画像検出の例を示す。従来と比較し、飛躍的な高速化が可能となった。これらの寄与により、半導体製造ラインへの明視野検査装置の導入が積極推進された。

また、パターン微細化の進展に伴い、問題となる欠陥数が増大してきた。しかし検査装置で検出される欠陥すべてがデバイス不良を引き起こすわけではない。検出欠陥候補の中から問題となる欠陥を見極める作業は、検出欠陥数の増大に伴い、大きな負担に

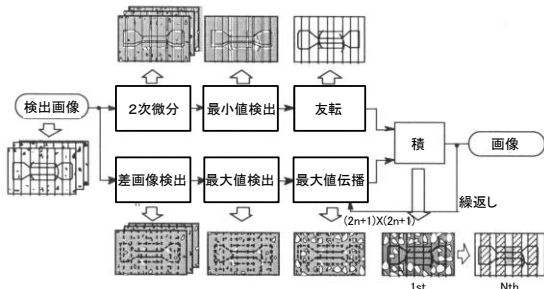


図11(a) グレイン対応しきい値生成法

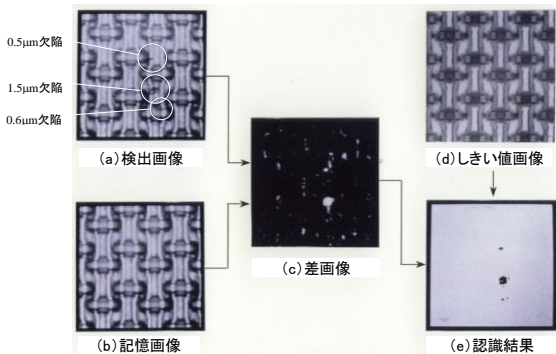


図11(b) グレイン対応しきい値生成法の画像処理例

なってきた。このため、高速で精度の高い欠陥分類を実現すべく欠陥画像に基づいた欠陥分類技術や致命性判定方法(Automatic defect classification on the fly)の先駆的な研究がなされた<sup>13)</sup>。特に、リアルタイム欠陥分類に対する期待が生まれた。

さらに、偏光による異物の検出が主体であった暗視野系の異物検査に、チップ全面の検査を目的として、明視野系に追随して比較検査技術が導入された<sup>14)15)16)</sup>。空間フィルタリングによってパターン回折光を遮光しつつ、隣接チップ間の差画像を検出して欠陥を検出するものである。高NA化によって、微細欠陥からの散乱光を効率良く捕捉することを可能としている。なお、通常空間フィルタリングでは複数のセルピッチに対応することは困難であり、課題として残されている。また、ランダムパターンからの散乱光も捕捉してしまうため、チップ間の明るさばらつきや信号の飽和に対応する必要があるため、比較検査の導入によってもロジックパターンの検査感度はやや低い。

微分極性比較・多重位置マッチング法

1991年に日立の前田らが発表した方法である<sup>17)18)</sup>。図13に原理を示す。ここでは、画像のマッチングにより得られる不一致画

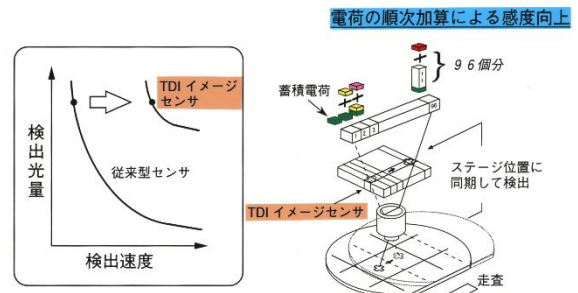


図12 TDIイメージセンサを用いた明視野高速画像検出 (TDI 96 段の例)

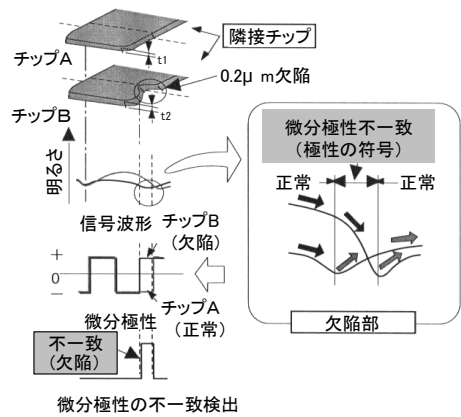


図13(a) 微分極性比較アルゴリズムの原理

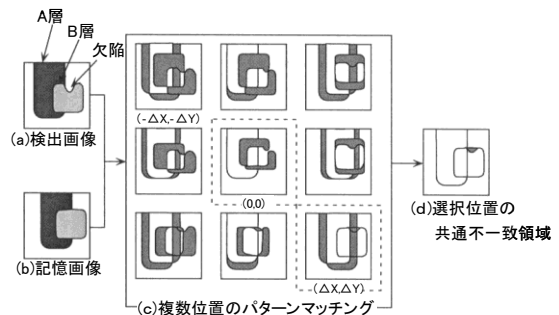


図13(b) 多重位置パターンマッチング法の原理

素数に着目し、層間ずれに対応したマッチング位置を選択し、共通の不一致を欠陥として検出する。1例を図14に示す。ここでは、明るさの違いを許容するため、1次微分を施し、その極性を比較して不一致画素数を得ている。

本アルゴリズムは、摂動範囲を限定することから局所摂動パターンマッチング法を多層パターン対応に拡張したものと言える。この方法により、多層パターン上の0.2μm欠陥の検出を可能にしている。専用LSIとFPGA(Field Programmable Gate Array)からなるハードウェアであった。

### サブピクセルマッチング法

1994年に日立の広井らが発表した、サブピクセルの精度で位置合わせして比較検査する方法である<sup>19)</sup>。図15に原理と欠陥検出例を示す。従来は、類似度補間手法である、正規化相関値(NCC)のパラボラフィッティングによりサブピクセル精度を実現していたが、本手法では、比較する2枚の濃淡画像に関して、濃淡差の2乗誤差が最小になるように画像を補間する。一撃で補間値が算出できることが特長であろう。また、明るさを一致させる点が、比較検査にとっての核心である。この方法は専用LSIにより実現され、画像検出時のサンプリング誤差を許容して、0.18μm欠陥の検出を可能にした。本手法は、画像間に明るさの違いがあると精度が劣化するが、明るさの違いが少ないパターンでは有効と考えられる。位置合わせ手法として見ると、線形補間が成り立つパターンを対象にする、微分などの前処理追加に改良の余地がある。

なお、本方式はオプティカルフローの研究で導出されていた勾配法によるもの<sup>20)</sup>と類似の形式の解になっているが、比較する両方の画像を補間することにより、補間に伴う画像劣化が比較検査に与える影響を最小限に抑えている点が特長であろう。

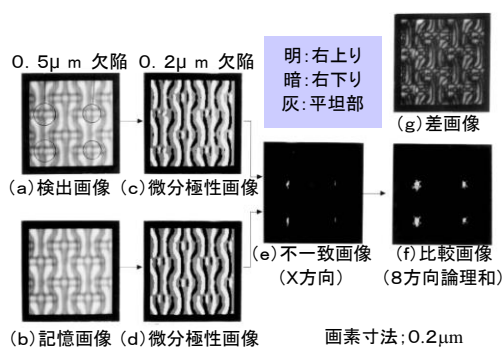


図14(a) 微分極性比較アルゴリズムの画像処理例

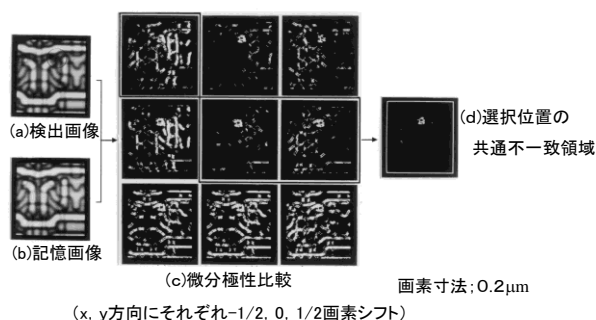


図14(b) 多重位置パターンマッチング法の画像処理例

### 実時間致命性判定法

1995年に日立の原らが発表した、欠陥の致命性判定を行う方法である<sup>21)</sup>。図16に原理を示す。欠陥検出と同時に、欠陥を含む周囲の局所画像を記憶し、検査と並行して局所画像を解析することにより、欠陥を分類し、致命性を判定する。原らは、プリント配線板のパターン検査に適用し、有効性を確認している。この方式は、欠陥をカテゴリ(クラス)に分類するリアルタイムADC(Automatic Defect Classification)の原形である。

### 実時間欠陥分類法

1995年にSEMATECHのBennettらがLSIウェーハ検査におけるリアルタイムADCの必要性を説いた<sup>13)</sup>。分類に用いる特徴量には形状、色(明るさ)、テクスチャ、位置、大きさなどとされるが、分類手法は不明である。欠陥カテゴリと特徴量リストを学習することにより、分類条件が決定される。

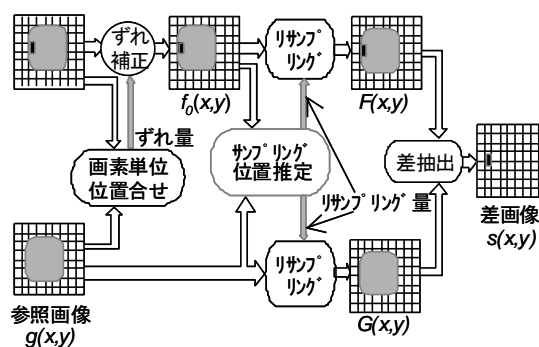


図15(a) サブピクセルマッチング法の原理

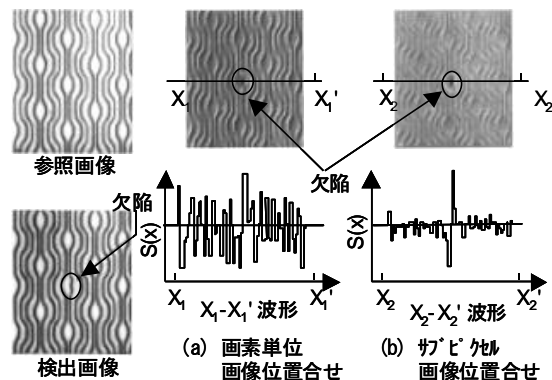


図15(b) サブピクセルマッチング法の欠陥検出例

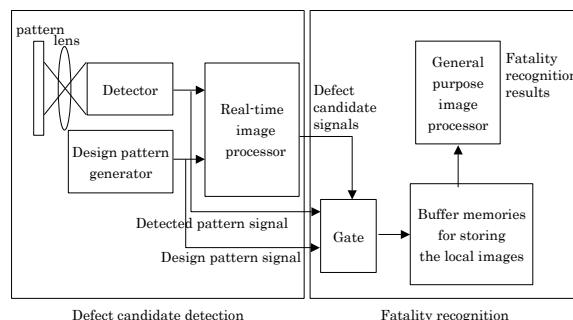


図16 致命性判定法

## 2.4 1996~2000年

LSI のノードはクォータミクロンを切り、100nm 欠陥の検出が要求されるに至った。このため、画像の検出から処理に至るすべての過程がブレークスルーを必要としてきた。

光学系では輪帯照明と空間フィルタリングの組合せによる高コントラスト化や、偏光特性を用いた高次回折光の高効率検出による高コントラスト化<sup>22)23)</sup>などに見られるように光学限界への挑戦が始まり、また画像処理では「ロバスト化」をキーワードとして、パターン依存性の少ないパターンマッチング手法の開発<sup>24)25)</sup>が進んだ。さらにステージの空気静圧軸受けによる非接触駆動化などを含む、歪みの少ない高精度な画像検出<sup>26)27)</sup>なども周辺の必須基盤技術として研究が強化されてきた。また、新たな検出手段として電子ビームを用いた画像検出技術の開発が進められ、SEM 画像に見られる大きな歪みを対象とした広い探索範囲のパターンマッチング技術の実用化研究がなされている<sup>28)~32)</sup>。

検査の付加価値を大きく向上する欠陥分類に関しても、検査後に改めて画像を取得して分類を行う Re-visit ADC<sup>33)</sup>の形態から実用化が始まり、画像検出と同期して全欠陥を対象に分類を行うリアルタイム ADC の実用化へと進化していった<sup>34)35)</sup>。Re-visit ADC を活用した、致命性のある欠陥の管理手法も研究された<sup>36)</sup>。

微細化対応のロバストな画像処理としては、比較検査における感度阻害要因のひとつが、薄膜干渉に起因して生じる膜厚の違いによる明るさの違いであり、特筆すべきは、これへの対応が進化を見せたことである。すなわちパターンの位置の違いと明るさの違いに対応するため、位置の違いに関しては上述した画像位置合せの高精度化、ロバスト化の技術開発が進められ、明るさの違いについては、検出感度をパターンの場所により自在に変えてその影響を低減する方法（グレイノイズ除去法<sup>12)</sup>、SAT 法<sup>37)38)</sup>、DSI 法<sup>39)</sup>や微分処理を用いて明るさの違いの影響を緩和する方法（微分極性比較がその例）など多くの手法が開発された。

暗視野系においても、空間フィルタリングで散乱光を除去できないパターンの明るさのばらつきに合わせて、統計的に適切なしきい値を設定する技術が開発されるなど、画像処理のロバスト化が進められた<sup>40)41)</sup>。

しかし、パターンの明るさやその変動に応じて感度を設定することは、明るさの異なるパターンへの対応の本質的解ではないこと、微分処理に基づく方法は、低コントラストパターンの感度が低いことが課題であった。そこで、パターンの明るさの違いについても、位置合せと同様にその明るさを積極的に合わせ込む方法が立案された。

### SAT(Segmented Auto Threshold)法

1996年に米国 KLA Tencor 社が発表したしきい値設定方法である<sup>37)38)</sup>。図 17 に概念を示す。パターンの明るさやコントラ

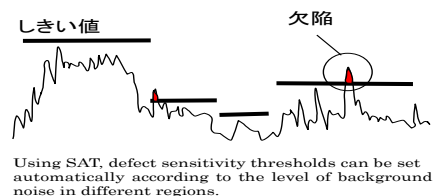


図 17 Segmented Auto Threshold 法 (筆者作成)

トに応じて画像の領域分割を行い、分割された領域ごとに異なるしきい値を設定し、グレイノイズや膜厚の違いによる正常部の誤検出を抑制するものである。検出感度をパターンの場所により変えてその影響を低減するという意味において、上述したグレイノイズ対応しきい値生成法と類似の概念に基づくがマット内を同一に扱うなど、個々の領域がやや広いと言う課題があるようである。

この方式は、擬似欠陥の発生した領域に左右されることなく、着目領域の感度設定ができ、また、比較パターン間に変動がない領域では、高感度な検査が可能である。最近では、課題であった分割領域の指定や、しきい値設定の自動化の研究が進んでいる模様である。

### DSI(Die-to-Statistical Image)比較法

統計的良品パターンの生成と比較に基づく方法であり、図 18 に概念を示す。

その一つとして、1996年に東レエンジニアリング㈱が発表した方式<sup>39)</sup>が DSI 法である。複数枚の実デバイスの画像を入力し、統計処理することにより良品バラツキを含んだデータベースを作成する。このデータベースと被検査画像を比較することにより欠陥を検出する。

LSI を対象とした場合、データ量が膨大になることから、比較的 low 倍率で検査する磁気ディスクのヘッド基板の検査やチップ部品検査等の用途に向いていると考える。

本手法は、設計データとの比較ではないが、「モデルに基づく認識手法」の一種と考えられる。

### 統計的しきい値設定法

1999年に日立の野口らが発表した方法である<sup>40)~42)</sup>。図 19 に原理を示す。異物検査において、周期パターンからの散乱光を遮光することを目的とした空間フィルタリングでは除去できない(ランダム)パターンなどに対し、各画素について明るさのチップ間の違い(変動)を検出し、ばらつきを正規分布と見なしてその標準偏差の定数倍をしきい値として設定するパラメトリックな設定手法である。パターンの明るさ変動や画像検出時のサンプリング誤差を吸収(感度を低下)している。ランダムなパターンに対する高感度化を狙ったものである。比較手法と言うより、明るさばらつきに応じたしきい値設定法であり、欠陥が正常パターンと空間的、階調的に分離できればよい(しきい値が周りの画素の影響を受けなければよい)。可干渉性の高いレーザを照明光源とした、大画素検出の暗視野検査において、コストに優れた方式と見られ、特に画像処理条件の設定容易化としての効果があった。

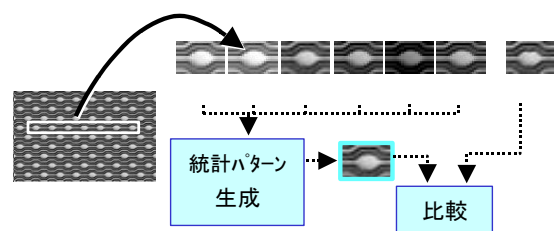


図 18 統計的良品パターン生成・比較手法の概念



発生頻度が高くない擬似欠陥への対応、正規分布から逸脱したはずれ値(Outlier)への対応、少数データへの対応などロバスト性確保が今後の課題であろう。また、欠陥をパターンと空間的に分離するため、光学解像度に見合う画素寸法が必要となり、これに対応して、画像の位置合せが今後必要になってくるであろう。

### 加算相関マップによる画像位置合せ法

2000年に日立の酒井、前田らが発表した画像の位置合せに関する方法である<sup>24)25)</sup>。図20に原理を示す。従来、類似度としてSAD(差の絶対値和)やSSD(差の二乗和)を使用していたが、正規化相関演算(NCC)を実時間全面検査に適用した(専用LSIを開発)。NCCを高速リアルタイムな処理に適用した例は少ないと見られる。また、相関マップの加算演算により、正規化相関演算がもつ、パターンの方向や粗密への依存性を排除し、ロバスト性を高めることに成功している。パターンエッジ情報がある領域を選択する必要がなく、選択ミスに伴う位置合せ不良の発生を防いだことに特長がある。さらに、位置合せに関して、前後のデータに関する無矛盾性(Consistency)に基づく診断機能も開発された。その後、DSPに基づくシステムへの展開も検討された。スワス先頭ダイなどを対象に位置合せすべきパターンを取捨選択し、ソフトウェアの演算負荷の低減が図られている(特許情報)。

### 散布図(Scattergram)情報を用いた比較法

2000年に日立の前田、酒井らが実用化した方法である<sup>44)~47)</sup>。図21に基本原理を示す。パターンの明るさの違いやラフネスによる散布図データの拡がり<sup>43)</sup>を抑えるため、散布図の分解(Scattergram Separation)、すなわち各画素を類似の特徴量ごとに分類し、類似の特徴量をもつ画素ごとに散布図のデータを線形近似して階調変換による明るさの合せ込みを行う。これにより、検出画素寸法の1/3の欠陥を検出可能にし、光学的解像限界を超

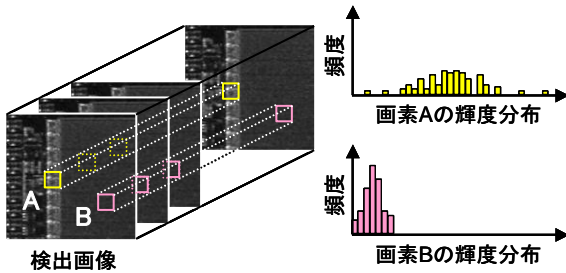


図19(a) 複数ダイの対応点の明るさ分布 (ダイの対応画素を串刺し)

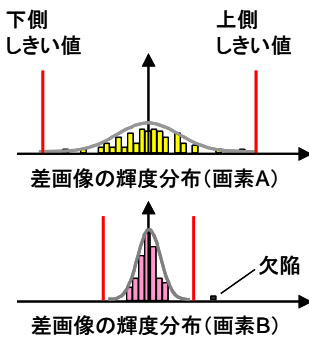


図19(b) しきい値設定方法

える微小欠陥を信頼性高く認識することが可能となった。図22に処理例を示す。「物理的な層」をイメージしたカスケードパターンマッチングなど、パターンマッチング強化形の研究から、本手法のように統計学の層別概念に基づき、各画素を「統計的に異なる層」に分類して欠陥を認識する、統計的パターン認識形の研究に移行し始めたと言える。なお、散布図は、Lissajousとして見ると、画像の位置ずれや欠陥がもつ位相のずれを表している。

その後、複数ダイから生成したゴールデン画像を対象にした方式<sup>45)</sup>や、複数ダイを用いて特徴量を算出し線形回帰木の形式で、特徴量の自動選択と特徴空間の分割に基づく方式<sup>46)</sup>も立案された。時空間情報(特徴量)の更なる積極的な活用が課題であろう。

これらの方式は、設計データと比較する「モデルに基づく認識手法」や良品の特徴情報との不一致を検出する「ルールに基づく認識手法」とは異なり、モデルやルールを用いずに欠陥を認識する技術である。なお、統計的しきい値設定法<sup>40)</sup>に対し、本手法は

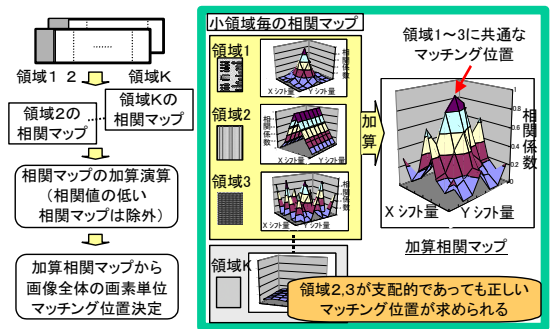


図20 加算相関マップ方式

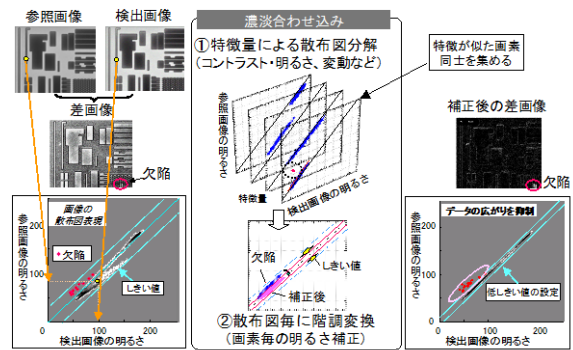
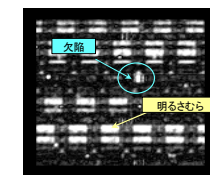
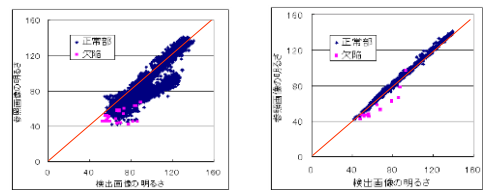
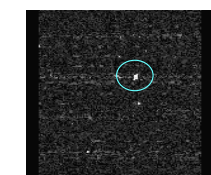


図21 散布図分解を用いた欠陥認識法



(a) 従来法による差画像 (S/N: 42/42)



(b) 本手法による差画像 (S/N: 20/10)

図22 散布図分解を用いた欠陥認識法の処理例

比較そのものに関するものであり、しきい値の設定法とは異なる。

## 2.5 2001~2005年

開発方式を公開しない傾向が見られるようになり、発表件数は多くない。半導体ノードの微細化に対応した高感度化のため、検出画素寸法の微細化がさらに進み、これに伴うスループット低下を防止しつつ、処理の柔軟性を確保する目的で、プロセッサ並列方式が実用化された<sup>49)50)</sup>。これは複数のプロセッサでソフトウェアにより画像を処理するものである。これにより、FPGAや専用LSIからなる画像処理システムが、フレキシブルなソフトウェア中心となり、スケラビリティを維持しつつ比較的短時間で顧客ニーズに対応可能となった。これに伴い、pタイル法や判別分析(大津の方法)などの基本技術も、検査感度を制御するための浮動しきい値設定に多用され始めたと考えられる。

さらに、基本感度が高いセル比較適用率を高めるため、ダイ内の複数のセルピッチへの対応やセル端の検査の実現、セルと言えどもパターン形状のばらつきに応じたきめ細かいしきい値制御などが重要となり<sup>51)</sup>、演算負荷の増大や変動への対応が図られてきたと考えられる。感度阻害要因として、LER(Line edge Roughness)や ACLV(Across Chip Line width Variation)が認識され、統計的しきい値設定法などと同様に、複数のダイ情報を用いてパターン変動を表現・許容することも、搭載メモリの大容量化やソフトウェア処理の柔軟性にに基づき、実現可能となった<sup>49)</sup>。

また、明るさの違いに対応したロバストな画像位置合せの研究も進歩が見られた<sup>52)~54)</sup>。これらは低ビットの符号化であり、正規化相関に比べ低負荷演算であることも特長である。

光学系においては、明視野系にも暗視野系と同様にレーザを搭載した装置、特に高感度・高速検査の実現を目的として、波長266nmの短波長照明の検査装置が2003年に現れた<sup>49)50)</sup>。画像解像度向上による正常部と欠陥の分離性(解像度向上による正常パターンと欠陥の空間的分離。同様に、コントラスト向上による階調的分離)の確保が狙いである。さらに、レーザ光のもつ可干渉性(空間的コヒーレンシ)の低減が実施されている。

暗視野系においても、標準粒子であるPSL(Polystyrene Latex)からの散乱光強度が波長の4乗に逆比例することから、短波長化が必要とされている。パターンのない面板の検査においても、ラフネス等のノイズが欠陥信号に重畳しないように、レーザスポット径を小さくすることによって解像度(S/N)を確保している。

また、暗視野系においても、リアルタイムADCの搭載が始められた。カテゴリ数は高々3乃至5種類程度に限定されている模様であるが、欠陥と擬似欠陥の識別、上層と下層の識別などに適用されている模様である。暗視野系の高速度を謳ったマクロ検査の市場も新たに立ち上がった。

また、可視光の波長以下である100nmクラスの欠陥は、SEM(Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡)でなければ詳細な観察はできない。この観察作業の自動化を目的として、欠陥画像の自動分類アルゴリズムが搭載された欠陥観察専用のSEMが開発された。目視による欠陥のSEM観察・分類作業は1時間に数十欠陥が限度であるが、1時間に数百個程度の欠陥の自動観察・分類が可能となった<sup>55)</sup>。現在では、千数百個程度の欠陥

観察が可能である。

検査の付加価値向上の新たな取組みとして、図23に示すように、ウェーハ上に観察される欠陥の有意な分布形状は製造プロセスの異常と関係が深いことから、発生欠陥数のみではなく、欠陥分布状態も定量化しモニターすることにより、製造プロセスをより詳細に管理する技術が開発された<sup>56)</sup>。

## リアルタイムADCおよびその活用

Re-visit から移行したリアルタイムADCが、特定欠陥のモニタリングあるいはレビュー対象の絞込みを目的として用いられた。また、検査装置の高感度化に伴い大量の擬似欠陥が検出される恐れがあるため、リアルタイムADCの機能を活用して、検出した欠陥が擬似かどうかの再判定に活用された<sup>49)</sup>。

識別器としては、ニューラルネットやファジー推論<sup>57)58)</sup>、決定木<sup>59)60)</sup>が報告された(文献58はRe-visit対応と思われる)。

## 欠陥点分布パターン識別技術・レビューサンプリング技術

2001年に日立の高木、渋谷らが発表した方法である。図24に示すように、欠陥の局所的な密度を画像化した密度画像を生成し、統計的2値化手法を適用することにより、有意形状パターンを検出している<sup>56)</sup>。本アルゴリズムでは計算幾何学で利用されるボロノイ図を利用し、欠陥点の密度を定義することにより、欠陥密度分布の傾向を把握することで、マクロに有意な形状をもつ欠陥分布、すなわち欠陥密度の観点で偏りをもつ部分を顕在化するのに最適な密度画像の画素サイズを動的に決定している。これにより、有意パターンの密度変動に対しロバストな検出を実現している。

この技術を活用し、図25に示すように、代表欠陥を効率的に抽出して観察するレビューサンプリング技術が開発された。同一分布パターン内の欠陥は、ほぼ同じ種類の欠陥からなることが多いことに着目し、統計的にサンプリング数を求めたものである。

## 2.6 2006年以降の展開と課題

比較検査は、欠陥検出感度のさらなる向上を目指して、よりロバストとなり、多様な機能を有するアルゴリズムの開発が着実に進められている。特に、パターン認識技術の適用・展開を通して、高度な欠陥検知が実現されつつある。例えば、欠陥検出を欠陥と正常の分類問題として扱うことによって、欠陥検出にもリアルタ

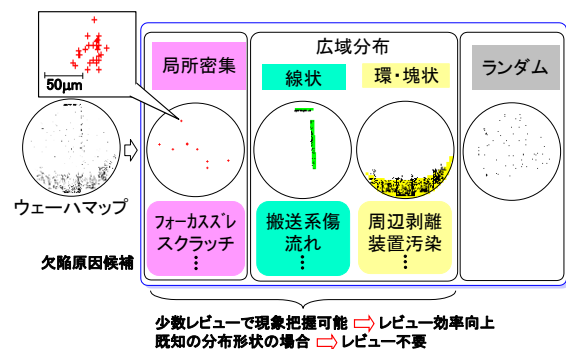


図23 欠陥分布の識別



タイムADC同様に教示形の識別が検討されている<sup>61)62)</sup>。ここでは、負事例のない1クラス識別の問題として扱われている。リアルタイムADCとして、特徴量選択(ランダム)と識別器の組合せ(バギング)の例なども報告されている<sup>63)64)</sup>。

転写不良などのシステマティック欠陥への対応や、明るさが変動し誤検出を生じやすいノイズな領域における微細欠陥の検出も残された課題であり、ダイ比較や統計的良品パターン比較に加え、顕著性に基づく単一画像からの欠陥検出も報告されている<sup>65)</sup>。また、画像毎の不一致情報を集め、不一致情報群から統合的に欠陥を判定する技術の開発も進むであろう。

多数の欠陥のなかから Nuisance と呼ばれる不要な擬似欠陥を分類して排除することや、欠陥の致命性を判断することも、従来にもまして重要な技術になると考えられる<sup>66)67)</sup>。設計データの活用も、致命性の判断に活用され<sup>68)</sup>、大きな進化が見られると考えられる。注目欠陥の検出率や認識率を確保することも重要であり<sup>69)</sup>、さらには事例集めに係る学習コストを低減するための少数

データによる学習も、併せて重要な技術となろう。

さらに欠陥認識は、光学系との協調がより重要になる。欠陥認識は、光学系に絡む画像生成過程に精通した高度化と、検出画像に左右されないことを旨とする高度化があるが、光学限界を超え、検出画素寸法の1/3を切る微細欠陥の検出には、前者の比重が大きいと言える。例えば、2000年始め頃より研究着手された、物理特性に基づくビジョン(Physics-based Vision)や、能動的に光学条件を制御することにより得られる多重画像の統合など、多くの関連研究<sup>70)71)</sup>も、半導体検査分野に実用し得ると考える。解像度の確保は、欠陥信号と正常パターンの空間的分離性の確保であると述べたが、欠陥信号の明るさを背景信号と分離できるという階調分離性も併せて重要であり、「能動的に」分離できる光学条件を見出すことが大切である。リアルタイムADCの特徴量に関しても、分類正解率向上のため、識別器から特徴量の良し悪しを見ることに加え、欠陥が微細なため、光学条件に対する欠陥や背景の光学的振舞い(Appearance-based→behavior-based)を活用して特徴量を定める、或いは網羅的に取得したデータから、分布の裾にまで注意を払い、統計的振舞いに着目して「確率構造」をあぶり出すという観点も必要になる。これらにより、歩留り低下を引き起こすが今まで検出できず「Non visual」とされてきた見えない欠陥<sup>72)</sup>への対応が進むことを期待する。

アルゴリズムを搭載するプラットフォームについては、処理の複雑さ、負荷の増大への対応を目的として、マルチコアCPUを中心とした、負荷のダイナミックな増減を吸収可能なシステムに移行すると考えられる。近傍画素から大域までを対象とする画素演算、再帰演算、ヒストグラムなどの統計演算は言うに及ばず、主成分分析、判別分析或いは最近傍探索などのパターン認識に纏わる多岐に亘る演算を、その負荷を平準化しつつ効率的に実行することが必要となろう。

最後に、検出した欠陥点群の情報を積極的に活用した、問題工程の特定の例を図26に示す<sup>73)</sup>。欠陥分布パターン識別技術を適用した例である。製品検査による欠陥分布情報とダミーウェハ(鏡面)検査による欠陥分布情報の突合せや、共通経路解析を行うことにより、問題となる工程・装置を高精度に特定するものである。設備状態を監視制御するAPC(Advanced Process Control)システム<sup>74)</sup>に、これらの欠陥情報を入力し、設備やプロセスの異常検知を高精度化することも可能であると考える。

ますます膨大化する検査情報をいかに効率的に扱うか、さらには異常検知のみならず予兆として検知し、原因をいかに早期に診断するか、今後も知恵が必要である。

### 3. まとめ

コアとなる技術開発を先導してきた明視野検査系の実用画像処理を中心に開発技術を概観した。顧客ニーズである高感度・高速検査を実現すべく、絶え間なく技術開発が進み、その結果、約15年間で最小検出欠陥寸法と検出画素寸法の比の値は一桁向上し(図4)、また二桁以上の速度向上が実現された(図3)。そして、その後はリアルタイム欠陥分類や欠陥分布識別など新機能が開拓され、検査の付加価値向上が図られてきた。今後も、高度な技

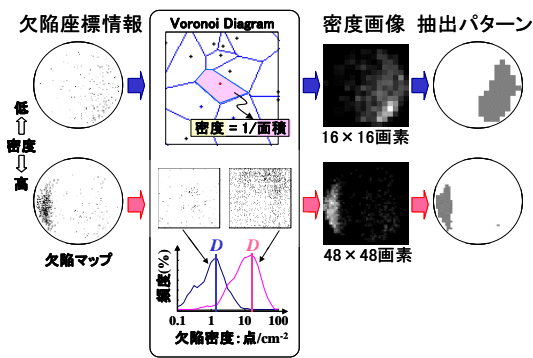


図24 欠陥点分布パターン識別技術

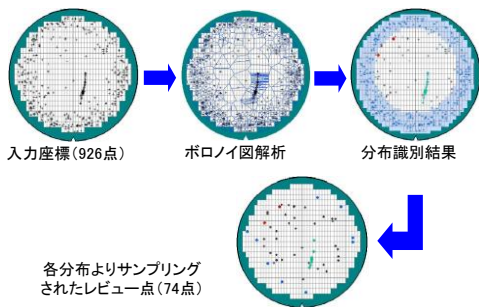


図25 レビューサンプリングの例

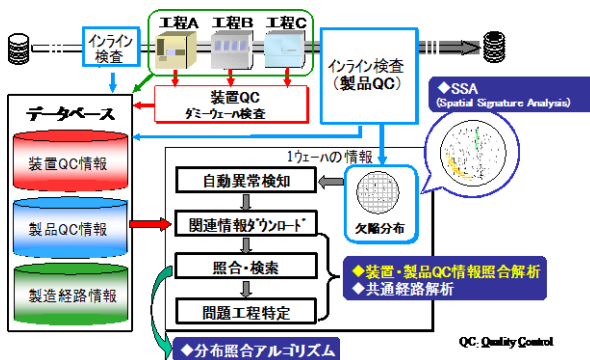


図26 問題工程の特定

術が創造されるであろう。

今後、半導体製造プロセスの複雑化に伴い、欠陥発生原因がさらに多様化するため、欠陥発生源の特定に要する時間の短縮が、一層望まれるであろう。欠陥検査情報の解析能力は今後も向上するであろうが、検査情報に内在する製造プロセスの変動に関する情報を把握することは人間の能力を超え始めている。多様な、溢れる情報の中で統計的な傾向を的確に検出し、エンジニアの判断を支援するためにも、マシンビジョンを含むパターン認識技術の適用展開が鍵となると思われる。

## 参 考 文 献

- 1)小西敏夫, 御園生守男, 加藤敏夫: 超 LSI ウェーハ表面欠陥検査装置, テレビジョン学会誌, 36, 1(1982)38.
- 2)H.Ishihara,T.Sooma,M.Misonoo,K.Takatsu,K.Akanuma: High Speed Reticle Qualification System, Proc. of SPIE, 772(1987)248.
- 3)S.Fushimi,H.Kubota,Y.Hara,Y.Nakagawa: Automated Visual Inspection System for Aluminum Patterns on LSI Wafers,Proc. of Kodak Microelectronics Seminar(1985)93.
- 4)原 靖彦, 伏見 智, 大島良正, 窪田仁志: LSI ウェーハアルミ配線パターン検査自動化の研究, 信学論(C), J69-C, 4(1986)385.
- 5)松山幸雄, 岩田尚史, 窪田仁志, 中川泰夫: 局所摂動パターンマッチング法による LSI ウェーハパターンの精密外観検査, 信学論, J72-D-II, 12(1989) 2041.
- 6)前田俊二, 窪田仁志, 牧平坦, 二宮隆典, 中川泰夫, 谷口雄三: カスケードパターンマッチングによる LSI ウェーハ多層パターン自動外観検査, 信学論, J72-D-II, 12(1989)2012. 及び 前田俊二, 遠藤文昭, 牧平坦, 窪田仁志: 比較検査における数値解析手法を用いたしきい値設定支援, 信学論, Vol.J81-D-II, 1(1998)27.
- 7)依田晴夫, 酒匂 裕, 江尻正員, 浜本信男ほか: 設計データ参照を特徴とする半導体ウェーハ自動外観検査装置 WISE-550, 第 1 回産業における画像センシング技術シンポジウム(1986) 351.
- 8)酒匂 裕, 依田晴夫, 江尻正員: 実時間半導体ウェーハ外観検査アルゴリズム, 信学論(D), J69-D, 11(1986)1687.
- 9)M.Ejiri,H.Yoda,H.Sakou: Knowledge-directed inspection for complex multilayered patterns,Machine Vision and Applications,2(1989)155.
- 10)H.Yoda, Y.Ohuchi, Y.Taniguchi, M.Ejiri: An automatic Wafer Inspection System Using Pipelined Image Processing Techniques, IEEE Trans. PA & MI, PAMI-10, 1(1988) 4.
- 11)B.Dom,V.Brecher,R.Bonner,J.Batchelder,R.Jaffe:The P300: A System for Automatic Patterned Wafer Inspection, Int. Journal of MVA (1988)205.
- 12)前田俊二, 窪田仁志: LSI ウェーハパターン自動外観検査におけるしきい値最適化の試み, 信学技報, IE89-93(1990). 或いは 前田俊二, 窪田仁志, 牧平坦: LSI ウェーハパターン自動外観検査における最適しきい値の自動生成, 信学論, Vol.J79-D-II, 2(1996)191.
- 13) M.Bennet,K.Tobin,S.Gleason: Automatic Defect Classification - Status and industry trends, SPIE, Vol.2439(1995) 210.
- 14)秋山伸幸ほか: 差画像検出方式異物検査装置の開発, 精密工学会誌, 57, 11(1991)1955.
- 15)秋山伸幸, 大島良正, 小泉光義, 秋葉政邦, 長友宏人: 偏光レーザによるパターン付試料上の異物検査の自動化, 計測自動制御学会論文集, 17, 2(1981)237.
- 16)秋山伸幸, 水野文夫, 井古多まさみ, 高見勝巳: 空間フィルタを用いたウェーハ異物検出技術, 精密工学会誌, 58, 11(1992)1909.
- 17)S.Maeda, T.Hiroi, H.Makihira, H.Kubota: Automated visual inspection of LSI wafer patterns using a derivative-polarity comparison algorithm, Proc. of SPIE, 1567 (1991)100.
- 18)前田俊二, 広井高志, 窪田仁志: 微分極性比較法による LSI ウェーハ多層パターンの自動外観検査, 信学論, J82-D-II, 1(1999)39.
- 19)T.Hiroi,S.Maeda,H.Kubota,K.Watanabe,Y.Nakagawa: Precise Visual Inspection for LSI Wafer Patterns Using Subpixel Image Alignment, Proc. of 2nd IEEE workshop on Applications of Computer Vision (1994)26.
- 20)安藤 繁: 微分相関を用いた 2 次元計測およびその時空間微分法との対応について, 計測自動制御学会論文集文誌, Vol. 23, No.8(1987)856.
- 21)原 靖彦, 土井秀明, 柄崎晃一, 飯田 正, 北村茂樹, 古谷貴史: 回路パターン欠陥の致命性判定, 精密工学会誌, 61, 6(1995)844.
- 22)芝田行広, 前田俊二: 光学顕微鏡における像コントラスト向上に関する検討, 精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集(2002)558.
- 23)芝田行広, 前田俊二: 明視野顕微鏡における像コントラスト向上技術, 精密工学会, 70, 11(2004)1428.
- 24)酒井 薫, 前田俊二, 岡部隆史: 複数の正規化相関マップを用いたロバストな画像マッチング, 第 13 回外観検査の自動化ワークショップ, 精密工学会(2001)65.
- 25)前田俊二, 酒井 薫, 芝田行広, 岡部隆史, 窪田仁志: 照明条件制御下における相関マップ統合型画像マッチング方法, 精密工学会, 73, 9(2007)1051.
- 26)吉田 実, 前田俊二, 岡 健次, 牧平 坦: 画像解析によるスキャニングステージの高精度測定技術, 精密工学会秋季大会学術講演会, F53(1997).
- 27)前田俊二, 吉田 実, 岡 健次: 画像解析によるスキャニングステージの高精度測定技術, 精密工学会, 66, 1(2000)137.
- 28)Douglas Hendricks, Jack Jau, Hans Dohse, Alan Brodie, Dan Meisburger: Characterization of a New Automated Electron-Beam Wafer Inspection System, SPIE, 2439(1995)174.
- 29)服部 毅: Cu ダマシンプロセスの検査技術 SEM 式欠陥検査装置で Cu めっきボイド検出, 月刊 Semiconductor World(1999)56.
- 30)品田博之, 牧野浩士, 高藤敦子, 金子 豊, 村越久弥: ウェーハ検査用高速大電流 SEM 光学系, LSI テスティングシンポジウム(2000)151.
- 31)野副真理, 西山英利, 田中麻紀: 大電流電子ビーム 1 スキャン方式による電気的欠陥の高感度検出, LSI テスティングシンポジウム(1999)151.
- 32)広井高志, 田中真紀, 宍戸千絵, 渡辺正浩: 複数の評価関数を用いたロバストな LSI パターンの位置合わせ方法, 電学論, 124, 3(2004) 621.
- 33)K.Kameyama,Y.Kosugi,T.Okahashi,M.Izumita: Automatic Defect Classification in Visual Inspection of Semiconductor Using Neural Networks, IEICE, E81-D, 11(1998)1261.
- 34)A.Skumanich,J.Boyle,D.Brown: Advanced Interconnect Process Development Utilizing Wafer Inspection with "On-The-Fly" Automatic Defect Classification, IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, (1999)259.
- 35)A.Skumanich,R.Ott: Using 'on-the-fly' automatic defect classifi

- cation to enhance yields, MICRO Magazine, 17, no.6(1999).
- 36) A. Shimoda, K. Watanabe, Y. Takagi, S. Maeda: Shortcycle killer particle control based on accurate inline defect classification, the 9th ISSM (2000)199.
- 37) 齊藤幹人: デバイス・プロセスに早期確立を支援する最新検査技術, 日経マイクロデバイス, 3(1996)91ほか.
- 38) S. Wong, C. Yoke, M. Small, R. Ghaskadvi, S. Jawaharlal, G. Yin: Effective use of customized autoSAT templates in a foundry environment for better recipe set-up, ASMC 2001 Proc. 12th annual advanced semiconductor manufacturing conference and workshop (2001)145.
- 39) 脇坂泰行, 川口浩志: ウェーハパターン検査装置「インスペクタ」, 電子材料, 3月号, 107/110(1996)ほか.
- 40) M. Noguchi, Y. Oshima, H. Nishiyama, K. Watanabe, A. Sugimoto: Defect inspection on CMP process and its application, Proc. of SPIE, 3677(1999)780.
- 41) 浜松 玲, 渋谷久恵, 西山英利, 大島良正, 前田俊二, 野口 稔: 背景別統計的しきい値法を用いた半導体ウェハ検査技術, View2004(2004).
- 42) A. Hamamatsu, H. Shibuya, Y. Oshima, S. Maeda, H. Nishiyama, M. Noguchi: Statistical threshold method for semiconductor inspection, 12th A-PCNDT 2006-Asia-Pacific Conference on NDT(2006).
- 43) 前田俊二, 岡 健次: 散布図情報を用いた重回帰分析によるしきい値設定手法の提案, 精密工学会, 66, 12(2000)1885.
- 44) 前田俊二, 酒井 薫, 岡部隆史: 散布図情報を用いた LSI ウェーハ薄膜多層パターン比較検査アルゴリズム, 信学論, J88-D-II, 7(2005)1173.
- 45) 酒井 薫, 前田俊二: 統計パターン比較と特徴的はずれ値検出による微小欠陥の認識手法, 信学技報, PRMU2005-53(2005)11.
- 46) 酒井 薫, 前田俊二: 複数パターン情報を利用した統計的はずれ値検出による微小欠陥の認識手法, 信学技報, PRMU2005-233(2006)1.
- 47) 酒井 薫, 前田俊二, 岡部隆史: 散布図情報を用いた LSI ウェーハ薄膜多層パターン比較検査手法, 画像ラボ, No.2(2006)15.
- 48) 酒井 薫, 前田俊二: 特徴空間の再帰的分割に基づく半導体欠陥検査手法, CVIM-155, No.2006(2006)65.
- 49) 塩崎 篤, 小野貴通, 渡辺正浩, 桑原雅之: 最新の DUV 光学式ウェーハ外観検査装置, 日立評論, 85, 4, (2003)29.
- 50) 渡辺健二, 前田俊二, 船越知弘, 宮崎陽子: 65nm ノード対応高性能明視野光学式ウェーハ外観検査装置「HA-3000 形」, 日立評論, 86, 7(2004)27.
- 51) 宮崎陽子: 東京精密のウェーハ検査技術と装置, 電子ジャーナル Technical Symposium(2005).
- 52) 竹田健祐, 金子俊一, 田中孝之, 酒井 薫, 前田俊二, 中川泰夫: 内挿型増分符号相関に基づくロバストなサブピクセル画像照合法, View2004(2004).
- 53) K. Takeda, S. Kaneko, T. Tanaka, K. Sakai, S. Maeda, Y. Nakagawa: Robust Subpixel Image Alignment by Interpolation-based Absolute Gradient Matching, Proc. of FCV2005(2005).
- 54) K. Takeda, S. Kaneko, T. Tanaka, K. Sakai, S. Maeda, Y. Nakagawa: Interpolation-based Absolute Gradient Matching and Its Application for LSI Wafer Inspection, QCAV 2005, May18-20(2005)221.
- 55) K. Watanabe, Y. Takagi, K. Obara, H. Okuda, R. Nakagaki, T. Kurosaki: Efficient Killer-Defect Control using Reliable High-Throughput SEM-ADC, Proc. ASMC(2001)219.
- 56) 高木裕治, 渋谷久恵, 細江直樹: 欠陥点サンプリング技術を利用した外観検査手法, VIEW2001(2001)99.
- 57) K. Kaemmer, G. Bonsdorf, M. Tuckermann, J. Kavanagh: Using real-time defect classification to investigate post-CMP cleaning processes, MICRO Magazine 20, No.9(2002).
- 58) T. Honda, R. Nakagaki, O. Kenji, Y. Takagi: Fuzzy selective voting classifier with defect extraction based on comparison within an image, Proceedings of SPIE, 6788(2007).
- 59) 渋谷久恵, 岡部隆文: ルールベース型欠陥分類における自動ルール生成技術, SSII2005(2005).
- 60) 渋谷久恵, 岡部隆文, 中川泰夫: 決定木を利用した欠陥分類ルールの自動生成技術, 画像電子学会, Vol.36, No.5,(2007)731.
- 61) 加藤丈和, 野口真身, 和田俊和, 酒井薫, 前田俊二: パターンの近接性に基づく 1 クラス識別器, MIRU2007(2007)762.
- 62) 佐野真道, 加藤丈和, 和田俊和, 酒井薫, 前田俊二: パターンの近接性と密度推定に基づく 1 クラス識別器, MIRU2008, IS3-6(2008)464.
- 63) K. Kondo, K. Kikuchi, S. Hotta, H. Shibuya, S. Maeda: Defect Classification Using Random Feature Selection and Bagging, Proc. of FCV2008, Jan.(2008)76.
- 64) 堀田政二, 菊地啓, 近藤和樹, 渋谷久恵, 前田俊二: 特徴選択とベイズ決定則を利用した欠陥分類, 電気学会 情報処理・産業システム情報化合同研究会 IP-08-13(2008)1.
- 65) 浅海徹哉, 加藤丈和, 和田俊和, 酒井薫, 前田俊二: 顕著性に基づく外観検査のための異常検出アルゴリズム, MIRU2008, IS5-2(2008)546.
- 66) 中川泰夫: 特集解説「変貌するマシンビジョンアプリケーションー外観検査技術の進展ー」, 電気学会論文誌C, 121, 5(2001)824.
- 67) 高木裕治, 中川泰夫: 産業応用におけるマシンビジョンの現状, O plus E, Vol. 24, No.12(2002)1342.
- 68) C. Huang, C. Young, H. Liu, S. F. Tzou, D. Tsui, A. Tsai, E. Chang: Using Design Based Binning to Improve Defect Excursion Control for 45nm Production, Semiconductor Manufacturing, ISSM 2007(2007).
- 69) K. Kikuchi, K. Kondo, S. Hotta, H. Shibuya, S. Maeda: Class Unbalanced Defect Classification Using Multistep Learning, Proc. of FCV2008, Jan.(2008)82.
- 70) 岡部孝弘, 佐藤いまり, 丁瓊, 佐藤洋一: 照明変化に伴う輝度変化の類似度に基づく物体形状復元, MIRU2007(2007)333.
- 71) 松山隆司: フェロー記念講演「人間とは? 知能とは?」, 信学技報 PRMU2006-188, Vol. 106, No.469(2007)25.
- 72) Carol A. Boye: Industry Survey on Nonvisual Defect Detection, Proceedings of SPIE, Vol.5041(2003)173.
- 73) 渋谷久恵: 欠陥分布パターン照合に基づく問題工程特定技術, 動的画像処理実用化ワークショップ DIA2008(2008).
- 74) K. Tamaki, N. Miyashita, H. Tsuchiyama, N. Uchida, M. Aoyagi, H. Oshita: Practical Configuration of Virtual Metrology for CMP Process Control, AEC/APC Symposium Asia 2007, IDMS-O-008(2007).