

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

酒井 薫 前田俊二

日立製作所生産技術研究所 〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町 292

E-mail: {sakai.kaoru, maeda.shunji}@gm.perl.hitachi.co.jp

あらまし 半導体ウェーハパターンの外観検査においては、規則的に形成されたパターンの明るさを比較し、その差が大きい部分を欠陥として検出するが、製造プロセスに起因して発生する正常パターンの明るさの違いも検出してしまふ。そこで、複数のパターン情報を利用して、画像の散布図データの拡がりを抑制することにより、このような正常パターンの明るさ変動が発生する領域に埋没した微小欠陥を高感度に認識する手法を提案する。実験により、光学的に解像限界を超える微小欠陥の認識が可能となることを確認した。

キーワード 比較検査、欠陥認識、散布図、はずれ値検出

Recognition Method of Minute Defect Based on Statistical Outlier Detection using Plural Pattern Images

Kaoru SAKAI and Shunji MAEDA

Hitachi,LTD.,Production Engineering Research Laboratory 292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama, 244-0817 Japan

E-mail: {sakai.kaoru, maeda.shunji}@gm.perl.hitachi.co.jp

Abstract Reductions of the pattern variation noise caused by the manufacturing process are essential to recognize a minute defect on the complicated multilayer patterns of semiconductor wafers. We propose a highly sensitive comparison inspection method with noise reduction. We control the scattergram data of images by using plural images and we recognize the minute defect as an outlier. This new method can detect small defects that exceed the resolution limit in optics.

Keyword Comparison inspection, Defect recognition, Statistical outlier detection.

1. まえがき

情報化社会の進展に伴って、半導体デバイスは我々の生活に広く普及している。携帯電話に代表されるように、半導体デバイスが実装される製品は、ユーザのニーズに合わせて高機能化、小型軽量化が急速に進み、デバイスも回路パターンの微細化、高集積化が加速している。半導体産業においては、歩留り低下の原因となる欠陥を早期に見つけ、対策を行うことが重要となり[1]、欠陥検査は必要不可欠なものとなっている。回路パターンの微細化に伴い、より微小な欠陥を高感度に検出することが要求されており、パターン寸法 65nm の最先端デバイス立上げ時においては、52nm 以上の微小な欠陥を検出する必要がある[2]。

半導体ウェーハ上には設計上同一のチップ（後で切断されてひとつのデバイス素子となるもの）が規則的に形成されている。検査はこれらのチップの画像を取得し、隣接するチップの画像と比較してその不一致部、すなわち明るさの差が大きい部分を欠陥として検出する「実物同士の比較」が一般的であり、これまで、様々

な高精度画像比較方式の開発が行われてきた[3][4]。

微細化への対応としては、画像検出のための照明光の短波長化、狭帯域化を主とした高解像度化が行われてきたが、製造プロセスに起因して発生するチップ間の膜厚の違いやラフネスと呼ばれるパターンの微妙な形状差（パターン幅のばらつきやパターン端のうねり[5]）なども強調され、検出画像上で明るさの違いとなって現れ、欠陥判定上ノイズとなる。これらの成分の抑制が比較検査の大きな課題となる。

上記課題に対し、複数の正常パターン画像から統計的手法により良品画像を作成しておき、検出される画像と比較をすることにより正常パターンの明るさ変動を吸収する手法が報告されている[6]。一方、筆者らは、膜厚の違いによるチップ間の明るさの違いについて、散布図データの拡がりを抑制する手法[7]により対応を図った。また、ラフネスについては検査対象パターンの近傍にある複数の同一パターンから統計パターンを生成し、更に散布図データを利用する手法[8]により対応した。本報告では、これらの手法と同様に画像の

散布図に着目し、複数のチップの情報を利用して、散布図データの拡がり抑制を強化することにより、正常パターンの明るさ変動を許容する手法を提案する。

2. 比較検査の原理と技術課題

2.1. 検査原理

ウェーハパターンの検査方式を図1に示す。まず、照明光源からの光をステージ上のウェーハに照射し、ステージを移動させながら規則的に配列されたチップの画像を順次イメージセンサにより撮像する。そして、対象チップの画像と隣接するチップの画像を位置合せした後、明るさの差が設定したしきい値より大きい部分を欠陥として検出する。これをチップ比較と呼ぶ。本報告はチップ比較の高感度化に関するものである。

以下、検査対象チップの画像を検出画像、比較する隣接チップの画像を参照画像と呼ぶ。

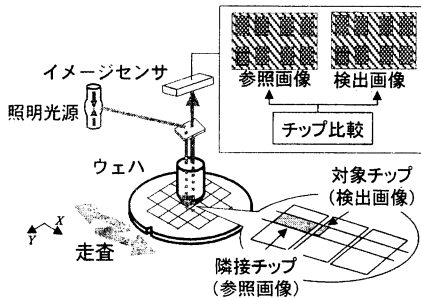


図1 半導体ウェーハパターンの検査方式

2.2. 比較検査の課題

設計上同一になるべく形成されたチップの画像は、主に下記2点の要因により実際には同一とならない。

- (1) ウェーハ上の膜厚の違いに起因する明るさむら
- (2) ラフネスに起因するパターンの明るさ変動

図2に明るさむらの例を示す。画像の寸法は640×480画素であり、画素寸法は0.2μmである。検出画像 $f(x,y)$ と参照画像 $g(x,y)$ の間で明るさが異なり、明るさの差 $|f(x,y)-g(x,y)|$ を0~255の濃淡値で示した差画像には、随所に差が大きい領域が認められるが、これらは検出すべきものではない。図3に正常パターンの明るさ変動の例を示し、欠陥検出への影響を説明する。同図は検出画像の欠陥部と対応する参照画像の信号波形をそれぞれ示したものである。図中に示す正常パターンの明るさも参照画像と違っており、その差は欠陥部と同程度ある。この場合、明るさの差に対し、欠陥のみを検出するしきい値は設定できず、欠陥を見逃すことになる。従って、このような明るさ変動を正常と認識し、これらの影響を排除することが高感度な欠陥検

出を実現する上で必要となる。ここで、図3からも分かるように、隣接チップとの明るさの比較では、正常パターンの明るさ変動か欠陥か判断がつかない。しかし、複数のチップの明るさを比べれば、正常パターンの明るさ変動の可能性を評価できる。図4は周辺5チップ分の対応するパターンの信号波形である。欠陥はそのチップでのみ明るさが変化しているのに対し、正常パターンはチップ間で明るさがばらついている。このような特徴を利用して、正常パターンの明るさ変動を許容して微小な欠陥を顕在化する手法を提案する。

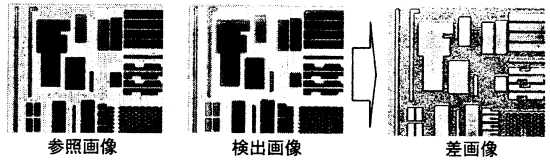


図2 比較画像間の明るさむら

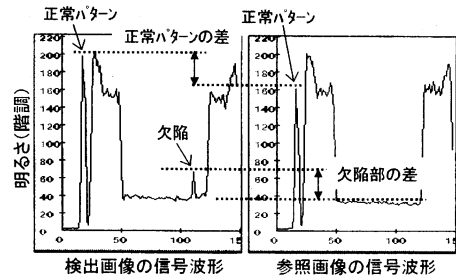


図3 正常パターンの明るさ変動の例

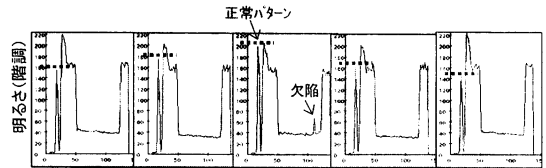


図4 5チップの信号波形の例

3. 複数パターン情報を利用した欠陥認識手法

3.1. 提案手法の概要

上記正常パターンの明るさ変動を許容し、微小欠陥の高感度検出を実現するため、以下の特徴をもつ欠陥認識手法を提案する。

- ・ 着目チップを含む近傍チップを対象に、複数パターン情報を収集し、その明るさのばらつきから画素毎に正常パターンの明るさ変動を評価する
- ・ 参照画像との間で散布図を生成し、上記明るさ変動の評価値に従い、散布図を分解する

・ 分解された散布図毎に、明るさを合わせ込み、正常部の明るさ変動を抑制し、欠陥を顕在化する

図4に示したような正常パターンの明るさ変動に対しては、明るさのばらつきに応じて画素毎にしきい値を自動設定することにより、明るさ変動の影響を排除する手法の報告[9]もあるが、本手法は、明るさ変動に埋没した欠陥を特徴的はずれ値として積極的に検出しようとするものである。既報告の欠陥検出手法[7][8]と同様に、散布図データの拡がり抑制による欠陥検出を基本としている。まず、その考え方を図5に示す。図5(a)は、横軸を検出画像の明るさ、縦軸を参照画像の明るさとして各点をプロットしたものである。明るさが等しければ、データの分布は原点を通る傾き45度の直線上にプロットされるが、本例では明るさの違いにより、拡がりが見られる。比較検査では、差がしきい値 Th 以上の領域を欠陥として検出するが、明るさむらを検出しないためには、 Th は散布図上で同図記載のようにデータの拡がりの外側に設定する必要がある。微細な欠陥を見逃すことになる。このため、データの拡がりを抑制し、低いしきい値設定を可能とする必要がある。そこで、まず、各画素の特徴量を求め、散布図データの特徴が類似する画素毎に分解する(図5(b))。次に各散布図において、データ群を線形近似し、近似直線の $gain$ (傾き)、 $offset$ (y切片) を変換係数とした階調変換を行う(図5(c))。これにより、比較する画像間の明るさを合わせ込む。図5(d)は階調変換後の画像全体の散布図である、データの拡がり抑制され、低いしきい値の設定が可能となることを示している。

上記の基本的考え方に則り、明るさ変動の影響を低減するために、本手法では、明るさ変動の評価値に応じて散布図を分解する。その基本概念を図6に示す。前節で述べたとおり、パターン情報を複数チップから収集することにより、各画素の明るさ変動の可能性を評価できる。そこで、検出画像と参照画像から生成した散布図上の各画素について、図6に示すように、複数チップの対応する画素から明るさヒストグラムを生成し、明るさのばらつき V を算出する。これが明るさ変動の評価値となる。そして、評価値 V に応じて分解された散布図のいずれかに各画素をプロットする。

これにより、明るさ変動が生じているパターンと生じていないパターンに画素のレベルで画像を分解することになる。そして、以降の処理を別々に行うことにより、明るさ変動の大きなパターンがあっても、その影響を排除することが可能となる。

3.2. 明るさばらつきによる散布図分解

正常パターンの明るさばらつきに応じた散布図の

分解方法を以下に説明する。

検出画像(図7の■部分)の各画素について、周辺の複数チップの画像(図7の網掛け部)の対応画素、例えば、▲の画素、●の画素それぞれについて、明るさヒストグラムを生成し、そのばらつき幅 V を算出する。ここで、収集画素に欠陥画素が含まれていた場合、その影響を避けるため、収集した総画素数の一定比率の画素数(欠陥の可能性が高い画素)をヒストグラム両端から除外して、上記 V を算出する。

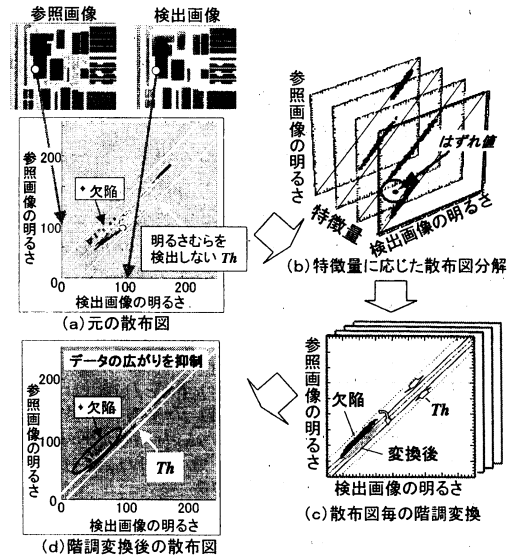
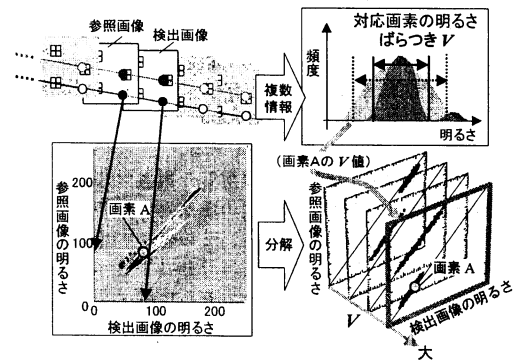


図5 散布図分解を用いた欠陥検出の基本的考え方



次に V 値に応じて散布図を分解するためのしきい値を算出する。その概要を図8に示す。まず、検出画像の各画素から算出したばらつき V 値のヒストグラムを生成する(図8(a))。次にヒストグラムを平滑化し(図

8 (b)), 極小点を探索する。極小点の探索は, (b)を2次微分して得られたグラフからピークとなる点を値の大きい順にN点選択することにより行う(図8(c))。このようにして得られた極小点を散布図分解のためのしきい値とする(図8(d))。また, 分解数の下限値をあらかじめ設定しておき, ヒストグラムの形状に特徴がない(極小点がない)場合は強制分解を行う。しきい値によって区切られた各区分をカテゴリと呼ぶ。

以上のように, 明るさばらつきV値に応じて散布図を分解することにより, 明るさばらつきの小さい領域では周囲のラフネスなどの大きい領域の影響を排除することが可能となる。しかし, 明るさ変動の大きいカテゴリに属する欠陥は依然検出できない。そこで, 明るさばらつきで分解した各カテゴリについて, 正常パターンと欠陥が識別可能な別の特徴量を用いて更に細かく分解する。ここで, 明るさむらは, ウェーハ面内の膜厚の違いに起因し, パターンの表面と裏面からの反射光が干渉して生じ, パターンが疎な平坦領域ほど顕著になる。そこで, 検出画像の各画素 $f(x,y)$ について, 参照画像の対応する画素 $g(x,y)$ との間で, 以下の特徴量を算出する。

・コントラスト

$$Cf(x,y) = \max \{f(x-1,y-1), f(x-1,y), f(x,y-1), f(x,y)\} \\ - \min \{f(x-1,y-1), f(x-1,y), f(x,y-1), f(x,y)\} \\ Cg(x,y) = \max \{g(x-1,y-1), g(x-1,y), g(x,y-1), g(x,y)\} \\ - \min \{g(x-1,y-1), g(x-1,y), g(x,y-1), g(x,y)\} \\ C(x,y) = \{Cf(x,y) + Cg(x,y)\} / 2 \quad (1)$$

・濃淡差

$$GL(x,y) = f(x,y) - g(x,y) \quad (2)$$

コントラストCは, 明るさの違いが生じやすい, パターン平坦領域か否かを評価するものである。ここでは, 着目画素の近傍領域(式(1)では近傍 2×2 画素)で最大値と最小値の差を出力するrange filterを用い, 検出画像の各画素 $f(x,y)$ と参照画像の各画素 $g(x,y)$ それぞれのrange filter出力の平均値を用いる。濃淡差GLは $f(x,y)$ と $g(x,y)$ の差(符号付き)である。

このようにして, 細かく分解した散布図毎に欠陥の検出処理を行う。図9は処理の手順をまとめたものである。三つの特徴量を演算後, その値に応じて, 特徴的に類似する画素同士にカテゴリ分けずる(散布図分解)。これは, 三つの特徴量それぞれに設定される分解用しきい値で区切られた3次元のカテゴリのいずれかに画素を投票することにより行う。図10(a)は検出画像と参照画像から生成した散布図である。(b)は三つの特徴量, コントラストC, 濃淡差GL, 明るさばらつきVを軸とし, しきい値で分解した特徴空間である。各画素を特徴量に応じて, いずれかのカテゴリに投票し, 同時に各カテゴリに投票される頻度(画素数)を計数する。これは, 各カテゴリのデータが明るさ変動を含

む正常パターンか否かの判定基準となる。そして, 各カテゴリにおいて, そこに含まれる画素から散布図を再構成する。図10(c)はひとつのカテゴリから再構成した散布図である。元の散布図(a)に比べ, データの拡がりが小さくなっている。この拡がりの小さくなった各カテゴリにおいて, 最小二乗近似に基づく線形近似を行い, 変換係数であるgainとoffsetを求める。一方, その頻度から正常か否かを判断し, 結果に応じた変換係数を適用し, 検出画像を階調変換する。

3.3. 散布図上のはずれ値検出

次に, 分解した散布図を用いて, はずれ値を検出する手順を説明する。図10(b)に示した特徴空間において, 投票される頻度が小さい, いわゆるはずれ値となるカテゴリは, この段階では欠陥とは断定できないものの正常パターンでは高い可能性が高い。そこで, 各カテゴリについて, 頻度が設定したしきい値より大きければ正常, 小さければ非正常カテゴリとする。頻度の大きさを判定するしきい値を頻度しきい値と呼ぶ。そして, 正常カテゴリには, そのカテゴリに投票される画素から算出した変換係数を適用する。一方, 非正常カテゴリには, 「最近傍決定則」(最も距離の近いカテゴリを識別結果として出力する識別方法)に従い, 正常と判断された最近傍のカテゴリの変換係数を適用する。図11は頻度に応じた各カテゴリの変換係数算出方法を示す。(a)は図10(b)に示した3次元特徴空間を, 簡単のため, 明るさばらつきによる分解をせずに2次元特徴空間にしたものである。検出画像の各画素が, 濃淡差GLとコントラストCに応じていずれかのカテゴリにプロットされている。ここで, 正常カテゴリに属す画素には, 同図(b)に示す通り, そのカテゴリのデータから算出した変換係数を適用する。カテゴリMやNのように頻度が少ない非正常カテゴリに属す画素には, 同図(c)に示す通り, 最近傍の正常カテゴリLのデータから算出した変換係数を適用する。次に, 階調変換を式(3)に従い行い, 変換後の検出画像 $f'(x,y)$ と参照画像 $g(x,y)$ の差が欠陥判定しきい値 Th より大きい画素を欠陥として検出する。

$$f'(x,y) = gain(x,y) \cdot f(x,y) + offset(x,y) \quad (3)$$

以上のように本手法では, 三つの特徴量で散布図を分解し, 階調変換をすることにより, ノイズの抑制を強化して散布図上で疎な部分を増やし, 結果としてはずれ値を高感度に検出する。また, はずれ値となるカテゴリのデータには最近傍の正常カテゴリの変換係数を適用しており, 分布の密な正常カテゴリからの距離が離れている画素, すなわち特徴的はずれ値としての意味合いが強い画素ほど, 階調変換の効果は小さくなり, 欠陥と認識される可能性が増すことになる。階調

変換は最小二乗法に基づくが、頻度しきい値によりは
ずれ値を自動的に除くため、その影響は最小限なもの
となり、ロバスト統計の一種であるM推定同様の意味
で、はずれ値の存在にロバストであると考えられる。

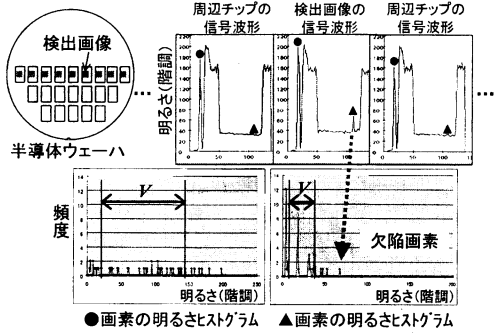


図7 明るさばらつきVの算出方法

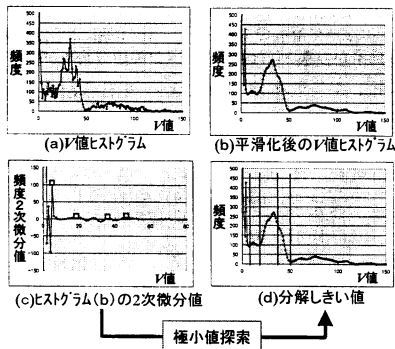


図8 散布図分解のためのしきい値算出方法

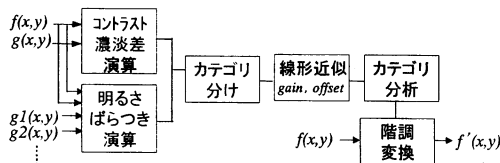


図9 本手法の処理手順

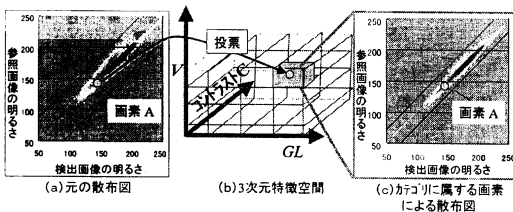


図10 明るさばらつきを考慮した3次元特徴量に基づく散布図分解

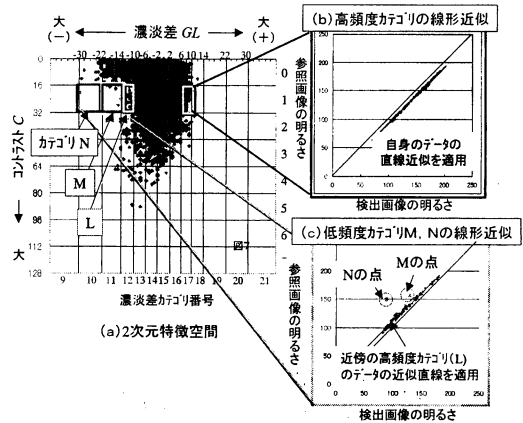


図11 カテゴリの頻度に応じた変換変換

4. 立案手法の評価結果

(1) 実験条件

立案手法の効果の確認実験を行った。明るさばらつき、コントラストのカテゴリ分けは、3~5個の範囲で画像に応じて自動で行った。濃淡差のカテゴリは、種々の明るさむらに対応するため、固定の刻みで31個に分割した。頻度しきい値は25とした。

(2) 効果

明るさばらつきがあるパターン幅90nmの多層パターンへの適用例を図12に示す。画像寸法は128×128画素、画素寸法は0.2μmである。同図(a)は、本手法適用前の参照画像との差画像及び散布図である。解像限界を超える約60nmの欠陥があるが、ラフネス等による正常パターンの明るさの違いにより散布図データは拡がっており、欠陥はその中に埋没し、検出できない。同図(b)は本手法適用後の差画像及び散布図である。S/Nは、33/50→19/9となり、正常パターンの明るさの違いを大幅に抑制でき、これにより欠陥の検出が可能となった。

処理の中間データを図13に示す。図13(a)は複数チップの対応する画素から算出した各画素の明るさばらつきV値を0~255の濃淡値で示したものである。Vが大きほど明るく表示している。正常パターンでは、ばらつきが大きいものに対し、矩形で囲んだ欠陥部はばらつきが小さいのがわかる。Vのヒストグラムから、明るさばらつきにより五つのカテゴリに分解される。図13(b)はカテゴリNo. 1~5を濃淡値で示したものである。欠陥部と正常パターンは、別々のカテゴリに投票されたことがわかる。これにより、欠陥部と正常パターンは別々に処理されることになる。

図14は明るさばらつき値Vに応じて分解された

五つの散布図のうち二つである。元の散布図上で欠陥画素の周辺にあった正常画素が欠陥とは別のカテゴリに投票され、結果として、欠陥は散布図上でデータ分布の疎な領域に位置することとなる。これにより欠陥は、はずれ値として認識される。

以上のように、複数チップの情報を使うことにより、明るさむらやラフネスといった明るさ変動のある正常パターンと欠陥を特徴空間上で分離することが可能となり、欠陥を統計的はずれ値として顕在化できる。

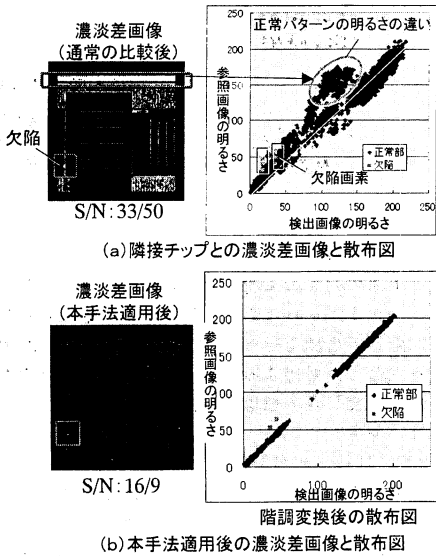


図 1 2 本手法の適用例

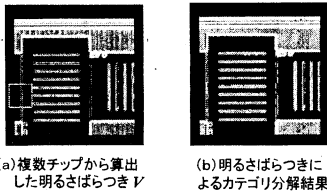


図 1 3 本手法による明るさばらつき評価例

5. まとめ

半導体ウェーハを対象に、製造プロセスに起因して生じるノイズを抑制し、微細な欠陥を認識する新たな比較検査手法を提案した。本手法は、複数の対応するチップの画像から、画素毎の明るさの変動を特徴量として算出し、対象画像を特徴量に応じて分解する。そして、分解され、カテゴリ化された画素毎に散布図上で明るさを合わせ込む。これにより、ラフネスや膜厚の違いに起因する正常パターンの明るさ変動を抑

制するとともに、これらのノイズに埋没した欠陥をはずれ値として認識する。本手法により、従来方式に比べ、正常部の明るさの違いを従来の約 1/3 以下に低減できる見通しを得た。これにより、低しきい値の設定が可能となり、高感度な欠陥検出が実現した。

今後、半導体ウェーハの検査は対象パターンの微細化に伴い、更なる微細欠陥検出のニーズが高まると予想される。パターン認識に基づきノイズ抑制の一層の強化と欠陥識別の高度化を行う予定である。

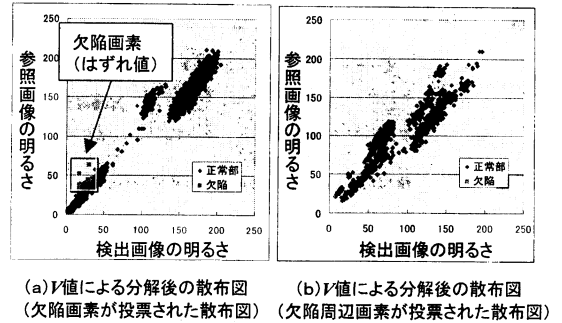


図 1 4 散布図分解による欠陥の顕在化

文 献

- [1] 中田晴己, 中前幸治, 藤岡 弘, 西山英利, "V L S I ウェーハ製造工程における検査プロセス戦略の評価", 信学論 (C), vol. J85-C, no.11, pp.1016-1027, Nov. 2002.
- [2] <http://public.itrs.net/>: "International technology roadmap for semiconductors," 2005 Edition, 2005.
- [3] 大西浩之, 佐々泰志, 永井健太, 辰巳昭治, "精密な位置合せ不要の濃淡画像比較によるパターン欠陥検査方法", 電子情報通信学会, vol. J86-D-II, no. 11, pp. 1531-1545, Nov. 2003.
- [4] S.Fushimi, H.Kubota, Y.Hara, Y.Nakagawa, "Automated Visual Inspection System for Aluminum Patterns on LSI Wafers", Proc. of Kodak Microelectronics Seminar, pp.93, 1985
- [5] Alexander E.Braun, "依然とはびこるラインエッジラフネス問題," Semiconductor International 日本版, pp.46-49, 2005.4
- [6] 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, pp.107-110, 1996.
- [7] 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," 電子情報通信学会, vol. J88-D II, no.7, pp.1173-1186, 2005.
- [8] 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 IEICE Technical Report, NLC2005-26 PRMU 2005-53, pp.11-16, Sep. 2005.
- [9] 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ーハ検査技術," ViEW2004 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp.1-5, Dec. 2004.