欠陥点サンプリング技術を利用した外観検査手法

正員 高木 裕治* 非会員 渋谷 久恵*
非会員 細谷 直樹*

Defect Monitor Method Based on Sampling Review Plan

Yuji Takagi*, Member, Hisae Shibuya*, Non-Member, Naoki Hosoya*, Non-member

Hi-speed and highly sensitive visual inspection tools are in practical use in the field of semiconductor wafer inspection. Defect review is a critical step to grasp the defect condition, that is, to know what types of defects are occurred on the wafer. However, it is not practical to review whole defects on the wafer because of a quantitative gap between the detected defects and defects to be reviewed within certain practical time. To bridge this gap, a visual pattern detection algorithm of spatially distributed defect points and an optimum defect sampling plan are proposed. Experimental result shows that partial defect review is enough to grasp the defect occurrence condition all over the wafer. by applying the proposed method for defect review.

キーワード：パターン分類，点群分布，欠陥検査，最適サンプリング

Keywords : pattern classification, point set, defect inspection, optimum sampling

1. 緒言

半導体の微細化が進み，パターン設計ルールは $0.1\mu\text{m}$ に達しようとしている。製造プロセスの前工程では，設計ルールを下回る寸法の欠陥管理が重要といわれており，問題となる微細欠陥を検出するために，欠陥検査装置の高感度化が進み，検出欠陥数も増大している。半導体検査装置ではウェーハ上の欠陥発生位置を検出できるものの，その種類までは正確に識別できない。このため，検査後に SEM を用いた欠陥の詳細観察（SEM レビュー）を行い，発生した欠陥の種類を把握したうえで，適切な問題工程対策を実施している。

SEM レビューを効率よく行うため，欠陥検出位置にて欠陥の SEM 画像を自動的に撮像し，欠陥を自動分類する ADC(Automatic Defect Classification)機能搭載のレビュー SEM が開発されている⁽¹⁾。1 時間あたり数百欠陥のレビューが可能であり，従来手動で行われていた SEM 観察に比べ 10 倍から 20 倍もの数量の欠陥の情報を得ることができる。

一方，半導体検査装置のスループットは欠陥検出感度 $0.1\mu\text{m}$ で，1 時間に 10 枚のウェーハを検査することが求められている⁽²⁾。検出欠陥数は製造プロセスの状態に依存するものの，1 ウェーハあたり数百から数千に及ぶこともある。これらの検出欠陥の中には，異物，スクラッチ（傷）など

多様な欠陥が存在し，更にこれらの欠陥は歩留まりに影響するものと，影響しないものに大別される。どのような欠陥が存在しているのかを把握するために SEM レビューを行うが，欠陥検出数が時間換算で $10^3 \sim 10^4$ のオーダーであるのに対し，レビュー可能な欠陥は 10^2 オーダーであり，数量的に 1 桁から 2 桁の違いがあるため欠陥全数をレビューすることは不可能である。

ところで，欠陥の発生はその製造プロセスの特性と深く関連しており，ウェーハ上の欠陥点の分布状態にも製造プロセスの異常が反映される。この分布特徴を捉えて，分布状態に応じて欠陥をサンプリングしレビューすることで発生欠陥の全体像を把握することができる⁽³⁾。

欠陥点の分布状態に基づいて欠陥点を分類するためには，座標点データとして与えられる欠陥点情報を用いて，密集度による識別，及び分布の粗密に応じて形成されるパターン形状の識別が必要である。パターン形状はパターンを形成する点群と，その周囲の点群との相対的な密度の違いによりマクロな形状として目視により容易に識別できるものである。図 1 に点群の分布事例を示す。

点群により形成される領域のセグメンテーションに関しては，点群の分布を直接画像化し画像処理により領域を検出する方法が提案されている^{(4)~(6)}。これらの手法は画像処理の手法を適用して領域を抽出するものであるが，多様な密度で形成される点群パターンを適切に画像化するための画素サイズの設定に課題が残る。またロバスト推定法を適用したクラスタリング問題として解決を試みた方法⁽⁷⁾もあ

* 株式会社 日立製作所 生産技術研究所
〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292
Hitachi, Ltd. Production Engineering Research Laboratory
292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama, Kanagawa 244-0817

図1 点群の分布事例

Fig. 1. Example of distributed point data set.

るが、計算量の面で実用化に課題が残る。

これらの課題を解決するために、点間の距離に基づき、効率のかつ定量的な点群密集度の把握を可能とするため、Voronoi 図を利用し、各点の局所密度を定義した。更に密度に関して標準化された密度画像を生成し、点群により形成される有意形状パターンを抽出する手法を検討した⁽⁸⁾。

以下本報告では、欠陥分布特徴識別手法、及び分布状態に応じて最適なレビュー数を決定する手法について説明し、発生欠陥の部分的なレビューで、その全体像を把握することが可能であることを示す。

2. 欠陥分布パターンの識別

欠陥分布のパターンは、多数の欠陥が数十 μm ～数百 μm 以内に存在する局所密集欠陥、ウェーハサイズのレベルでマクロな形状として識別される広域分布パターン欠陥、及び欠陥群として有意な形状を持たないランダム欠陥の3種類に大別される。以下、分布形態に有意性のある局所密集欠陥、及び広域分布欠陥の識別方法について述べる。

〈2・1〉 局所密集欠陥識別 座標 (x, y) 平面内に存在する n 点の点 $p_i = (x_i, y_i)$ に対し勢力圏 $V_n(p_i)$ を、

$$V_n(p_i) = \{p = (x, y) | d(p, p_i) < d(p, p_j), \forall j \neq i\} \dots\dots\dots(1)$$

と与えたとき、この勢力圏で平面を分割したものがVoronoi 図である。一つの勢力圏を与える点をその勢力圏の母点と呼ぶ。図2に入力点(母点)とそのVoronoi 図の例を示す。母点を与える勢力圏の境界線はVoronoi 辺と呼ばれ、境界線を挟んで接する二つの勢力圏の母点の垂直二等分線の一部で構成されている。Voronoi 図を構成するアルゴリズムには計算量 $O(n^2)$ の逐次添加法と $O(n \log n)$ の分割統治法が知られている⁽⁹⁾。本適用課題では、検出された欠陥座標点は検査装置の検出順に出力されるので、近傍点は出力順で近い位置にあることが期待できる。このため近傍点を探索する手間を軽減した場合において、平均的に $O(n)$ が期待できる逐次添加法を採用した。

Voronoi 図のデータ構造において、ある1点 $p_i = (x_i, y_i)$ に対する最近傍点は、指示点の勢力圏 $V_n(p_i)$ を構成するVoronoi 辺を一巡して巡れば、簡単に見つけることができ、点間距離により局所的に密集している欠陥群を容易に識別することが可能である。

〈2・2〉 広域分布パターン欠陥識別 勢力圏 $V_n(p_i)$ が与える面積 $S(V_n(p_i))$ は、その面積内に1点のみ点が存在する面積と捉えることができる。これより、点 $p_i = (x_i, y_i)$ に

図2 ボロノイ図

Fig. 2. Voronoi diagram.

おける局所的な点密度 $D(p_i)$ は

$$D(p_i) = 1/S(V_n(p_i)) \dots\dots\dots(2)$$

で定義できる。

次に、点群分布により形成されたパターンを顕在化するために、点群密度の分布状態の画像化を行う。画像化を図る際に留意しなければならないのは、注目したい点群分布を適切に表現できる画素解像度の設定である。1画素に対応する対象領域の内に存在する点の数に応じて画素値を決定するが、画素サイズを小さく取ると、領域を形成する点群密度が低い場合、画素値として反映されないという問題があり、画素サイズを大きく取ると、領域形状を適切に表現できないという問題がある。与えられた点群データの密度に応じて動的に画素サイズを調整するため、式(2)で定義した各点の点密度の頻度分布から、点密度のモード値 D_{mode} を検出し、画素サイズPixelSizeを、

$$\text{PixelSize} = \sqrt{N/D_{mode}} \dots\dots\dots(3)$$

と定める。これにより1画素に N 個の欠陥が含まれる画素が最多数になるような画素サイズを持つ画像を定義できる。 N は任意の数である。各画素値は画素内に存在する点の数に比例した値を設定する。

密度画像に対ししきい値処理を施すことにより、相対的に密度の高い点群パターン形状を顕在化し、パターン画像を得る。注目する領域と、それ以外の領域では異なる点分布密度、すなわち画素値を持つので、2つの領域のクラス間分散とクラス内分散の比を最大にするしきい値設定法を適用した。

図3に入力点群分布パターンと、その密度画像と画像サイズ、そしてパターン画像の生成例を示す。併せて画像サイズを固定化した上で同様の手法でパターン画像を生成した結果を示す。点群パターンの粗密に応じて画素サイズを調整することにより、パターンの顕在化が有効に行われている。

次に顕在化されたパターンの識別方法について述べる。半導体のプロセスではウェーハを回転させて処理する工程で特徴的に現れる環状に分布する欠陥、ガス雰囲気中での処理工程で特徴的に現れる塊状に分布する欠陥などが知られている。

本検討では環状、塊状の二つの代表的な分布形状の識別

図3 密度画像およびパターン画像生成例
Fig. 3. Pattern extraction using density image.

図4 テンプレート基本パターン
Fig. 4. Template elemental pattern.

を試みた。これらの形状は実際には発生場所、領域の大きさは一意ではなく、また環状に関しては完全な環を形成するものから、部分的な環を形成するものまで、その分布形状は多様性を持つ。また、パターン画像の画像サイズは欠陥分布密度により変化する。このようなバリエーションに対して効率的なパターンマッチングの処理手法の開発が課題となる。

全てのバリエーションに対応するテンプレートパターンとのマッチング処理を効率的に行うために、環状あるいは塊状のテンプレートパターンを基本要素形状の組み合わせで表し、基本要素ごとに対象パターンとの画像一致度を計算した。実際のマッチング値はこの要素ごとの計算結果を用いて行い、多数回の画像マッチング処理を省く。図4に環状・塊状における基本要素形状を示す。格子で区切られた一区画が基本要素形状である。テンプレートはこの基本要素形状の組み合わせにより表される。例えば、環状パターンは、半径方向及び、円周方向に分割した基本要素形状で

図5 パターン検出評価結果
Fig. 5. Pattern detection evaluation result.

表し、円環の幅、半径、扇形の中心角と回転の全ての組み合わせによりテンプレートを生成した。

マッチング処理は、一回の画像走査で基本要素形状の領域*i*毎にマッチングスコア s_i を算出しておき、これから各テンプレートパターン*k*のマッチングスコア S_k を次式を用いて計算する。

$$S_k = \sum_i a_i^{(k)} s_i \dots\dots\dots (4)$$

$a_i^{(k)}$ はテンプレートパターン*k*が領域*i*を含むとき1, 含まないとき-1とする。

マッチングスコア s_i は(一致画素数) - (不一致画素数)として算出する。入力されるパターン画像はそのサイズが可変であるから、基本要素領域もパターン画像のサイズに応じて用意しておく。

〈2・3〉 パターン検出性能評価結果 ウェーハサイズレベルのマクロな広域分布パターンは、製造現場において検査結果の目視確認により必要な対策が講じられている。図5にプロセス状態要調査と指摘されたウェーハマップデータ88件に対し、広域分布パターンの検出の性能を評価した結果を示す。横軸は注目パターン領域内の欠陥密度と領域外の欠陥密度比である。各欠陥密度比の代表的な事例をCase A, Case B, Case Cに示す。95% (84/88)の事例について発生パターンを捉えており、実用的な性能を有することを確認できた。処理時間は欠陥数10000個で6秒(PentiumIV1.4Ghzで実行)であった。検査装置からSEMレビュー装置へのウェーハの搬送時間が分オーダーであることから、十分実用的な時間であることを確認した。

3. サンプリング点数の適正化

与えられた欠陥点群より局所密集欠陥、広域分布パターン欠陥を識別する手法を2章で述べた。一般的に欠陥の密集度が高くなるほど、そこにある欠陥は同一の原因に起因している可能性が高くなる。図6は半導体デバイスの配線層を検査した結果得られた欠陥を全数SEM観察し、欠陥の種類毎に発生頻度をまとめたものである。図6に示す欠陥A, B, Cは異物(Particle)であり、その外観により種類が分かれる。欠陥D, Eはパターン欠陥(Pattern)であり、その発生原因により欠陥の種類が異なる。局所密集欠陥(Spot Defect)では80%以上が欠陥クラスE、広域分布パターン欠陥(Macro Defect)では60%以上が欠陥クラスAで占

められていることが分かる。このように、ある領域に特定の欠陥種類が偏在するとき、この欠陥種類をこの領域の主モード欠陥と以降呼ぶこととする。ウェーハ上に発生している欠陥の全容を把握するためには、局所密集欠陥や、広域分布パターン欠陥では、発生欠陥の主モード特定が重要である。また、それ以外のランダムに分布している欠陥では、どのような欠陥種類がどの程度発生しているかを正確に把握することが重要となる。

〈3・1〉 欠陥発生頻度の推定 検出された欠陥数を N とし、そこから任意の数 n 個サンプリングしたとき、この中に存在するある特定の欠陥 A が x 個あったとする。このときの標本比率 $\hat{p} = x/n$ の分布は二項分布に従うが、

$$np(1-p) \geq 10 \quad \text{.....(5)}$$

の条件を満たす範囲で検討する場合、近似的に正規分布として取り扱うことができ、このとき近似的に平均値を p 、分散を $\sigma^2 = p(1-p)/n$ と考えることができる。ただし、 p は真の比率である。正規分布の上側確率 α を与える確率変数を Z_α としたとき、確率 β で $\hat{p}$ が分布する区間は、 $\alpha = 1 - \beta/2$ であるから、

$$[p - Z_{1-\beta/2} \cdot \sigma, p + Z_{1-\beta/2} \cdot \sigma] \quad \text{.....(6)}$$

で与えられる。よって $\hat{p}$ の p に対する不確定さ e は確率 β で、

$$e = Z_{1-\beta/2} \cdot \sigma = Z_{1-\beta/2} \cdot \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad \text{.....(7)}$$

である。式(7)を n でまとめると、

$$n = p(1-p) \cdot (Z_{1-\beta/2})^2 / e^2 \quad \text{.....(8)}$$

となり、これより推定する頻度の不確定さ及びその信頼度(確率)を与えることにより、サンプリングすべき欠陥数(標本数)を求めることができる。式(8)によれば n は $p = 0.5$ のとき最大値をとることが分かる。実際の欠陥構成比率 p は様々であり、 n は最大値をとる $p = 0.5$ で考えなければならない。一方、 $p = 0.5$ のとき式(5)より、 $n \geq 40$ である。信頼度 80%、推定比率誤差 10%、即ち $\beta = 0.8$ 、 $e = 0.1$ でサンプリングを試みると、式(8)よりサンプリング数 n

は 41 であり、これは式(5)の条件を満たす。

〈3・2〉 主モード欠陥の特定 欠陥の密集度が高い場合、欠陥は同一の原因に起因する可能性が高い。ウェーハ 13 枚で検出された局所密集欠陥 1179 点、広域分布パターン欠陥 464 点について、特定欠陥の占有率を調べたところ、局所密集欠陥の場合で 80%、広域分布パターン欠陥の場合で 76%であった。これを前提とした上で、ある特定の欠陥種類の標本比率が 50%以上であればその欠陥を主モードと定め、サンプリング数を検討した。前節の考え方にに基づき、真の比率を p としたとき、標本比率 $\hat{p}$ が信頼度 β で $\hat{p} \geq 0.5$ を満たすのに必要なサンプリング数 n は、 $e = p - 0.5$ と便宜的に考えることができるので実用上、

$$n = p(1-p) \cdot (Z_{1-\beta/2})^2 / (p-0.5)^2 \quad \text{.....(9)}$$

と考えることができる。式(9)は p が 0.5 に近くなると無限大に発散するが、実際的には欠陥密集度の高い場合 p は 0.5 より大きな値をとる。本検討でも、局所密集欠陥では $p = 0.8$ 、広域分布パターン欠陥では $p = 0.7$ であることを実験的に確認した上で、サンプリング数は各々領域毎に $n = 3$ 及び 9 とした。

4. 評価結果

図 7 は図 6 に示したウェーハに関し、2 章に示した方法により欠陥点を分類し、ランダム分布の欠陥に関し、3 章で示した方法で決定した欠陥数に基づき欠陥をサンプリングし、その欠陥種類別比率をまとめた結果である。図 7 (a) はランダム分布の全欠陥を実際に観察し、欠陥種類別の比

図 7 ランダム欠陥レビュー結果

Fig. 7. Review result (random defect).

表 1 サンプリングレビュー評価結果

Table 1. Sampled defect review result.

Wafer No.	Defect Class	Detected Defect No.	Sampled Defect No.	Rate Estimation		Major Defect Estimation	
				Error	Macro	Spot	
1	8	239	53	0.09	1/1	1/1	
2	8	192	53	0.08	1/1	1/1	
3	4	668	89	0.07	1/1	13/13	
4	5	107	41	0.07	-	-	
5	8	187	69	0.05	-	7/8	
6	8	284	53	0.06	-	4/4	
7	5	221	44	0.07	-	0/1	
8	6	160	56	0.06	-	5/5	
9	9	806	65	0.09	-	6/8	
10	9	832	80	0.05	-	12/13	
11	6	327	41	0.04	-	-	
12	8	664	50	0.06	-	2/3	
13	7	115	47	0.03	-	0/2	
Summary	4~9	4802	741	≤0.09	3/3	51/59

図 6 欠陥全数観察結果

Fig. 6. Defect review result.

率を調べた結果、図7(b)は本手法による結果である。欠陥クラスCで最も大きな誤差が生じているが、誤差9ポイントで比率推定ができています。

また、表1はウェーハ13枚により実験した結果をまとめたものである。検出総欠陥数4802欠陥に対し、欠陥レビュー数はその15.4%にあたる741欠陥であり、そのときランダム欠陥における比率推定誤差は9ポイント以内、広域分布パターン欠陥における主モード特定は正解率100%(3/3)であることを確認した。局所密集欠陥における主モード特定は正解率86.4%(51/59)であった。局所密集欠陥多発ウェーハはプロセス管理上注意のいるものであるが、複数の異なる原因に基づく局所密集欠陥領域が多数存在することは現実的に少ないため、局所密集欠陥に対する対策を講ずる上では、一部の領域の主モードを特定できていればよい。このことから、得られた結果は実用上十分なものであると考えられる。

5. まとめ

半導体ウェーハ欠陥の最適なレビュー欠陥サンプリング方法について検討した。座標をその密集度によりランダム分布、局所密集分布、広域分布パターンの3種類に分類し、分類毎に統計的信頼度に基づいた欠陥サンプリング方法を検討した。ウェーハ13枚、4802欠陥に対し15.4%にあたる741欠陥をサンプリングし、ランダム欠陥における比率推定誤差は9%以内、広域分布パターン欠陥における主モード特定は正解率100%(3/3)、局所密集欠陥においては正解率86.4%(51/59)を確認できた。これにより欠陥を全数観察することなく部分的な欠陥観察でウェーハ全体の欠陥発生状況を把握できる見通しを得た。今後は、欠陥サンプリング後のレビュー機の欠陥自動分類処理も取り入れ、早期異常発見および原因プロセス特定を指向した検査情報処理手法を検討していく。

(平成15年7月8日受付、平成15年11月5日再受付)

文 献

- (1) K. Watanabe, Y. Takagi, and T. Kurosaki : "Efficient Killer-Defect Control using Reliable High-Throughput SEM-ADC", Proc. The 12th Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp.219-222 (2001)
- (2) "Defect Reduction", International Technology Roadmap for Semiconductors (2000) Update

- (3) F. Mizuno and S. Isogai : "A method for yield prediction using a SEM-ADC", In-line Characterization, Yield Reliability, and Failure Analyses in Microelectronic Manufacturing, pp.332-342 SPIE. Vol.3743 (1999)
- (4) S. S. Gleason and K. W. Tobin : "Directional-based Dilation for Connection of Piece-wise Objects: A Semiconductor Manufacturing Case Study", International Conf. on Image Proc., Sep. (1996)
- (5) K. W. Tobin, S. S. Gleason, and T. P. Karnowski : "Feature Analysis and Classification of Manufacturing Signatures on Semiconductor Wafers", Int'l Soc. For Optical Eng. 9th Symposium on Electronic Imaging, San Jose CA, Feb. (1997)
- (6) M. Ono, K. Nemoto, and M. Ariga : "An Effective Method for Yield Enhancement using Zonal Defect Recognition", Proc. Intl' Symposium on Semiconductor Manufacturing '97, pp.E25-E28 (1997)
- (7) J. M. Jolion, P. Meer, and S. Bataouche : "Robust clustering with application in computer vision", IEEE Trans. PAMI. 13(8), pp.791-802 (1991)
- (8) H. Shibuya and Y. Takagi : "Practical Pattern Detection from Distributed Defect Points on a Semiconductor Wafer", Proc. MVA2002 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.10-13 (2002)
- (9) 伊里(監), 腰塚(編) : 計算幾何学と地理情報処理, bit 1986年9月号別冊, 共立出版, 東京 (1986)

高 木 裕 治

(正員) 1984年東京大学工学部計数工学科卒業。同年、㈱日立製作所入社。同社生産技術研究所にて外観検査自動化における画像処理、パターン認識技術の研究、開発に従事。1996~97年南カリフォルニア大学(USC)客員研究員。現在、生産技術研究所検査システム部主任研究員。精密工学会、計測自動制御学会各会員。

洪 谷 久 恵

(非会員) 1987年東京大学教養学部基礎科学科第一卒業。同年、㈱日立製作所入社。同社生産技術研究所にてはんだ付外観検査、ブラウン管の画質検査など、多数の画像処理応用の検査装置開発に従事。現在、半導体向け情報解析技術の開発を進めている。生産技術研究所検査システム部主任研究員。情報処理学会会員。

細 谷 直 樹

(非会員) 1989年東京工業大学工学部制御工学科卒業。同年、㈱日立製作所入社。同社生産技術研究所にてブラウン管、データプロジェクタ、TFT液晶パネル等、主に画質検査装置の開発に従事。現在、半導体検査装置の応用技術の開発を進めている。生産技術研究所検査システム部研究員。計測自動制御学会会員。