

自己参照に基づくパターン欠陥検査法

浅海 徹哉[†] 和田 俊和[†] 酒井 薫^{††} 前田 俊二^{††}

[†] 和歌山大学システム工学部 〒 640-8510 和歌山市栄谷 930 番地
^{††} 日立製作所生産技術研究所 〒 244-0817 横浜市戸塚区吉田町 292 番地
E-mail: †{asatetsu,twada}@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp,
††{kaoru.sakai.pp,shunji.maeda.ap}@hitachi.com

あらまし 本研究では、工業製品の検査画像から欠陥を検出する手法を提案する。画像の任意の位置のパターンについて類似したパターンを探し、その位置との比較を行い欠陥候補を特定する。さらに複数の同様な別の検査画像を用い、画像間の明るさむら・サブピクセル単位のずれを吸収しつつ高速に検出を行う。本手法により、繰り返しパターンとランダムパターンが混在する半導体基板画像から、小さく低輝度な欠陥を高速に検出できることを確認した。

キーワード 比較検査, 欠陥検出, 外観検査, 自己参照

Visual Inspection of Pattern Defect Based on Self-reference

Tetsuya ASAMI[†], Toshikazu WADA[†], Kaoru SAKAI^{††}, and Shunji MAEDA^{††}

[†] Faculty of Systems Engineering, Wakayama University,
930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, JAPAN
^{††} Hitachi, LTD., Production Engineering Research Laboratory,
292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama, 244-0817, JAPAN
E-mail: †{asatetsu,twada}@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp,
††{kaoru.sakai.pp,shunji.maeda.ap}@hitachi.com

Abstract This paper presents a visual inspection method for detecting LSI wafer defects. Recently the density of LSI circuit patterns are rapidly increasing. Even in such a high density patterns, fast and accurate defect detection is still highly demanded. Some of the small defects can be analyzed only by using SEM, however, for faster detection without stopping the production lines, visual inspection using microscopic camera is necessary. The microscopic images of LSI circuit patterns can be affected by intensity variation caused by light interference in the thin layers. In most of the cases, the range of the intensity variation caused by interference is bigger than that caused by a defect. For detecting defects under such severe intensity variation, we propose self referencing image transform. Self referencing is actually a subtraction of local image from the most similar local image, which can be found by nearest neighbor search. By performing the self referencing image transforms on a defect-less die image and inspection die image, we can find the difference between these dies without affected by the intensity variation. We further extend this basic procedure so as to increase the accuracy. We tested the resulting algorithm on real images and confirmed its accuracy.

Key words Comparative inspection, Defect detection, Visual inspection, Self reference

1. はじめに

高度情報化社会における半導体やフラットパネルディスプレイ (FPD) の需要は増加傾向にあるが、その一方で過剰生産が起きやすく、現在では価格の下落が極めて深刻な問題となっている。このような状況下では生産にかかるコストを低下させることが必須であり、その基本となるのが「歩留まり」を上げることである。歩留まりを上げるとは、言い換えると不良品の発生率を極力下げることと同義である。ある薬品や装置が汚染されたことに起因して不良品が発生した場合は、早急に原因となる個所の修理や洗浄が必要になる。このためにも、製品の欠陥検査が重要であり、製造現場では、逐次、パターンの外観検査が行われている [1], [2]。ここでは、パターンが規則的に配列されていることを背景に、顕著性のある部分を欠陥として検出している。

半導体を例に挙げると、通常、検査装置は数種類に分かれ、生産ライン上で LSI パターンの異常を光学的に検出する装置、および異常の可能性のある箇所をより拡大率の高い電子顕微鏡等で詳細に観察する装置等がある。これらのうちで、生産ラインを止めることなく異常を検出する装置は特に重要であり、異常の見逃しや、過剰な誤検出が起きない光学検査装置の需要は非常に高い。しかし、LSI で用いられる微細回路の線幅は極めて細く、光学系の解像力では、欠陥による輝度値の変化はごくわずかなものとなるケースが多い。この一方で、ウェーハ上に形成される薄膜内での干渉の影響により、規則的パターンの間に大きな輝度値の変化が起きることが多く、欠陥による輝度値の変化を大きく上回る状況下での欠陥検出という困難な問題が存在している。

本報告では、自己参照に基づく、欠陥の顕著性に着目した手法を提案し、半導体の外観検査に適用した結果を述べる。

2. 検査対象の画像

この章では、本論文であつかう検査対象となる半導体基板画像について述べる。

2.1 半導体基板の構造

半導体の微細な回路は薄い円盤状のシリコンウェーハ上に実装される。この 1 枚のウェーハ上には同一の回路が基盤の目状に並べられており、この回路がダイと呼ばれる。最終的にはダイのひとつひとつを切り分けることで 1 枚のウェーハから一度に何枚もの同じチップを生産している。

2.2 検査画像の撮影方法

検査のための画像は、回路が実装され切り分けられる

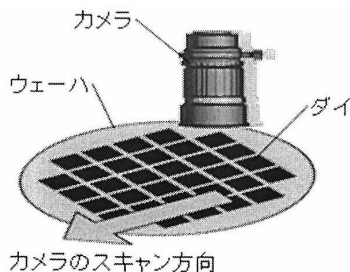


図1 画像の撮影方法

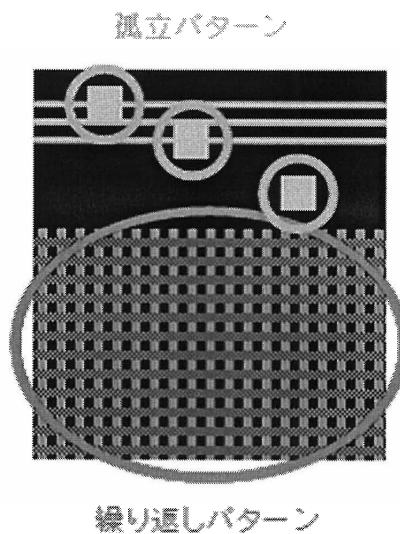


図2 繰り返しパターンと孤立パターン

前のウェーハを撮影したものである。

ウェーハ上に並べられたダイを順番にスキャンして撮影するため、同じ構造のダイ画像がひとつのウェーハから複数枚得られることになる。このため、複数枚のダイ画像 1 枚 1 枚が検査対象の画像となり、検査時にはこれら複数枚の画像セットから欠陥を探すことになる (図 1)。

2.3 検査画像の特徴

こうして得られた画像には、次に述べるような特徴がある。

(1) 電子回路を撮影したものであり、類似した局所パターンが多数あらわれる。

以下ではこの類似パターンのことを繰り返しパターンと呼ぶ。また、繰り返しパターンとは逆に、ひとつのダイ中に唯一に存在するパターンを孤立パターンと呼ぶ (図 2)。

もちろん、孤立パターンであるか否かは分析窓幅に依

存し、小さな窓幅で見れば孤立パターンと判定されるケースは少なくなる。

(2) 一つのウェーハ内で明るさのむらが現れやすい。

これは主に、半導体表面上での薄膜干渉の影響によるものである。この明るさのむらは不均一である場合が多く、補正は容易ではない。このむらのため、ダイ間に輝度値の差が生じるが、欠陥によって生じる輝度値の変化よりも大きな差が生じることが多い。ただし、明るさむらの空間的变化は比較的穏やかで、同じダイの中での明るさの変化は比較的少ない。

3. 従来手法

半導体における外観検査の従来手法として、与えられた検出対象の画像セットから2枚のダイ画像を取り出し、明るさを比較するダイ比較手法がある。これは、画像間の位置のずれをサブピクセル単位で補正することによりノイズを低減させた後[3]、対応する画素の明るさの差分が設定したしきい値よりも大きい部分を欠陥として検出する。しきい値は複数枚の画像セットからダイ間の明るさのばらつきを各画素において算出し、決定する手法などがある[4]。しかしこのようなダイ比較では、画像間の明るさのむらのノイズに埋もれた微細で暗い欠陥を検出するのは困難である。

これに対し、ダイ内では明るさむらが小さいため、ダイ内の繰り返しパターンの明るさを比較する手法も提案されている[5]、[6]。しかしこれらの方法は基本的にパターンの繰り返し周期が既知である必要があり、適応範囲は繰り返しパターンの領域に限られる。一方、非繰り返しパターンに対しては、発生頻度確率に基づいて異常を検出する手法も報告されている[7]。

4. 提案手法

この章では、まず本手法の基本アイデア、そして本手法のおおまかな流れを述べたあと詳細な検出までの手順を述べる。

4.1 基本アイデア

従来手法では、3.で述べたとおり、別のダイ画像との比較では明るさむらによって正しく欠陥を検出できない場合がある。

本手法では、

- 1つのダイの画像中では明るさむらが小さい
- 1つのダイの画像中に似たパターンが複数存在するという、対象となる半導体基板画像の2つの特徴を利用し、欠陥の検出を行う。なお、ひとつのダイ内といえども類似度の高いパターンが必ずしも存在するとは限らない。

従来手法では、検出を行うダイ画像と別のダイ画像の

画素値を比較していた。これに対し本手法では、まず一つのダイ画像内部で類似した局所画像領域を求めて差分を行う「自己参照差分」を行う。これを、正常な画像と、検査する画像の両方で行い、それぞれの結果を比較して欠陥を検出する。この手法により画像間の明るさむらの影響を受けずに欠陥を検出できる。また、類似性が低いパターンにも対応できる。さらに繰り返し周期なども既知である必要はなく、適応範囲も繰り返しパターンに限定されない。

4.2 提案手法の概要

本手法の手順としてはまず最初に基準となる画像を用いて学習をおこない、その学習に基づきそれぞれの検出対象のダイ画像について欠陥部の検出をおこなう。

ここでは検出までの大まかな流れを述べる。

4.2.1 学習

(1) 類似パターンの検索

まず学習に用いる画像として、欠陥のない基準ダイ画像 I_0 を用意する。この基準画像の任意の点 x について、同じ画像中でその部分に似ているパターンをもつ点 x' をさがし、これを x からの参照先として記憶する。

(2) 基準画像での比較

基準画像 I_0 の着目画素 x と、(1)によって得られた参照先 x' を比較し、次式で表わされる自己参照差分画像 $d_{C0}(x)$ を生成する。

$$d_{C0}(x) = |I_0(x') - I_0(x)| \quad (1)$$

ここで着目画素 x が繰り返しパターンの場合、参照先 x' は x の類似パターンとなり、基準画像には欠陥がないため $d_{C0}(x)$ の値は小さくなる。一方 x が孤立パターンの場合、参照先 x' は x の類似パターンとはならないため $d_{C0}(x)$ の値は基本的に大きくなる。以下では、この孤立パターンによって増大した自己参照差分の結果を孤立パターンノイズとする。

4.2.2 検出

(1) 検出対象の画像で比較

4.2.1(1)の学習結果をもとに、検出をおこなうダイ画像 I_i についても、以下のように自己参照差分画像を計算する。

$$d_{Ci}(x) = |I_i(x') - I_i(x)| \quad (2)$$

(2) 孤立パターンノイズの除去

x が繰り返しパターンでここに欠陥がない場合、自己参照差分 $d_{Ci}(x)$ の値は小さくなる。また欠陥がある場合は大きな値になる。一方 x が孤立パターンの場合、基準画像から得られる $d_{C0}(x)$ と同様に $d_{Ci}(x)$ も孤立パターンノイズによって基本的に大きくなり、このままでは欠陥か孤立パターンかの区別がつかない。

ここで、同一のダイであればこの孤立パターンノイズはどの画像でも同じ場所に同じように現れる。そこで画像 I_i から求めた画素の相違度 $d_{Ci}(\mathbf{x})$ と学習時に基準画像 I_0 から求めた画素の相違度 $d_{C0}(\mathbf{x})$ の差分をとることによって、孤立パターンを除去することができる。

4.3 問題点

前節で提案手法の概要を述べたが、この手順だけではまだ検出には不十分な点がある。具体的な問題点を以下に挙げる。

- 欠陥のない基準画像をどう準備するか。
- 類似パターン検索時、各画素について全探索を行っていたのでは画素数を N としたとき計算量が $O(N^2)$ となり非効率である。
- 自己参照差分の計算時にサンプリング誤差によるノイズが発生する場合がある。
- 参照先の画素に欠陥が存在する場合、誤検出が発生する。

以下ではこれらの問題点について考慮した、提案手法の詳細について述べる。

4.4 学習

本節では、学習についての詳細を述べる。

4.4.1 基準画像

まずは学習に用いる基準画像 I_0 を用意する。学習に用いる画像には欠陥がなく、特異な性質をもっていない平均的なものが求められる。

しかし欠陥の検出が目的である以上、欠陥のないことが保証されたダイの画像は基本的に事前に用意することができない。また与えられた画像セットから特異な性質をもっていないものを選定することも難しい。

そこで本手法では複数枚の検索対象のダイ画像のセットからメディアン画像を作成し、これを基準画像 I_0 に用いる。

4.4.2 類似パターンの検索

次に基準画像の各画素 $\mathbf{x}(\mathbf{x} \in I_0)$ について、比較の際の参照先となる類似パターンをもつ画素 $\mathbf{x}'(\mathbf{x}' \in I_0, \mathbf{x}' \neq \mathbf{x})$ を検索する。

ここで、類似パターン検索のための特徴量を定義する。似たパターンを検索するためには注目画素周辺の情報も必要であるため、注目画素とそこに隣接した $(n \times n)$ 画素の輝度値を用いる。ここで、 \mathbf{x} における類似パターン検索に用いる特徴量 $f_S(\mathbf{x})$ を以下のように定義する。

$$f_S(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} I_0(\mathbf{x} + \Delta_{11}) & \cdots & I_0(\mathbf{x} + \Delta_{1n}) \\ I_0(\mathbf{x} + \Delta_{21}) & \cdots & I_0(\mathbf{x} + \Delta_{2n}) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\Delta_{ij} = \begin{bmatrix} \delta x_i & \delta y_j \end{bmatrix}^T$$

$$\left(-\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \leq \delta x \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, -\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \leq \delta y \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \right)$$

ここで、 $I_0(\mathbf{x})$ は基準画像 I_0 の \mathbf{x} における輝度値とする。

この特徴量をもとに最も似たパターンを基準画像内から検索する。検査対象の画像は半導体の回路の画像なので、類似パターンは上下左右のいずれかに存在する可能性が高い。そこで類似パターンを注目画素の x, y 方向の画素から検索する。ただし注目画素そのものと注目画素に隣接している点は除外する。

ここで、点 \mathbf{x} に n 番目に類似したパターンを持つ点を \mathbf{x}'_n とし、 \mathbf{x} における \mathbf{x}'_n とのパターンの相違度 $d_{Sn}(\mathbf{x})$ を以下のように定義する。

$$d_{Sn}(\mathbf{x}) = |f_S(\mathbf{x}) - f_S(\mathbf{x}'_n)| \quad (4)$$

$d_{Sn}(\mathbf{x})$ が小さいほど \mathbf{x} のパターンと \mathbf{x}'_n のパターンは似ているといえる。

4.4.3 基準画像での比較

次に基準画像内で比較を行う。注目画素 \mathbf{x} と 4.4.2 で見つけた類似パターンをもつ点 \mathbf{x}'_n を比較し、画素の相違度 $d_{C0n}(\mathbf{x})$ を計算する。ここで、画像 I_i の \mathbf{x} における \mathbf{x}'_n との画素の相違度 $d_{Cin}(\mathbf{x})$ を以下のように定義する。

$$d_{Cin}(\mathbf{x}) = |I_i^*(\mathbf{x}) - I_i^*(\mathbf{x}'_n)| \quad (5)$$

ここで、 $I_i^*(\mathbf{x}), I_i^*(\mathbf{x}'_n)$ は $I_i(\mathbf{x})$ を $\mathbf{x}, \mathbf{x}'_n$ 周辺でそれぞれサブピクセル補正したものである。補正を行うのは、最も似た繰り返しパターンが画素単位で検索できていてもサンプリング誤差などの影響によりサブピクセル単位のずれが発生する可能性があるためである。

基準画像には欠陥はないという仮定により、ここで出てくる d_{C0n} はそのダイ固有の孤立パターンノイズだといえる。

4.5 検出

本節では、4.4 の学習結果をもとに検出を行う具体的な内容を述べる。ここで、検出対象とするダイ画像を I_i とする。

4.5.1 参照先画素との比較

検出対象の画像セットは基準画像を含めすべて同一のダイの画像である。よって検出対象の各画像で似たパターンをもつ画素を探す必要はなく、4.4.2 にて検索した参照関係がそのまま流用できる。

ここで、 I_i の任意の点 \mathbf{x} とその参照先 \mathbf{x}'_n との画素の相違度 $d_{Cin}(\mathbf{x})$ を式 (5) によって 4.4.3 と同じようにそれぞれ求める。

4.5.2 孤立パターンノイズの除去

さらに求められた画素の相違度 d_{Cin} から孤立パターンノイズを取り除く。この取り除いたものを $D_{in}(\mathbf{x})$ として以下のように定義する。

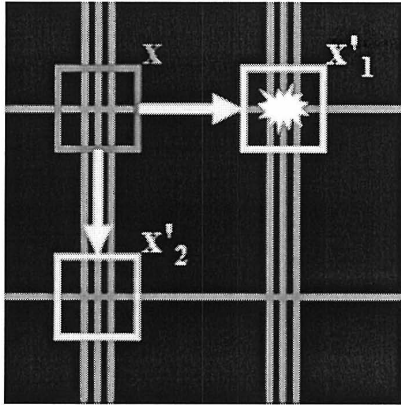


図3 参照先に欠陥がある場合

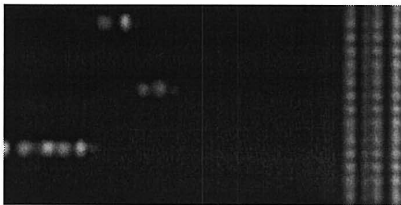


図4 基準画像 I_0 の一部分

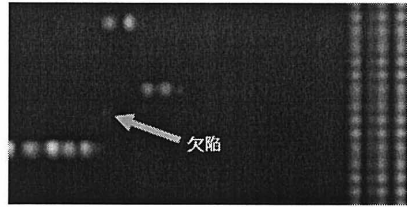


図5 欠陥のある画像 I_1 の一部分

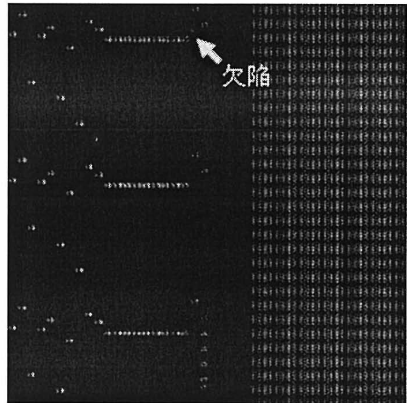


図6 ダイ間差分による結果

$$D_{in}(x) = |dc_{in}(x) - dc_{0n}(x)| \quad (6)$$

4.5.3 不適切な参照先による誤検出の排除

最後に、欠陥のある場所を参照したことによる誤検出を取り除く。

図3に示すように、注目画素 x には欠陥はないが参照先 x'_n に欠陥がある場合でも $D_{in}(x)$ は大きくなってしまふ。図3の場合、 x'_1 と比較すると $D_{in}(x)$ は大きくなり、誤検出となる可能性がある。ここでは x'_2 と比較すれば問題ない。

そこで $D_{in}(x)$ の最小をとることで不適切な参照先を取り除くことができる。最終的に画像 I_i の x における欠陥らしさを $D_i(x)$ として以下に定義する。

$$D_i(x) = \min_{m=1,2,\dots,N} D_{im} \quad (7)$$

5. 実験

この章では、提案手法の有効性を確認するための実験について述べる。

5.1 実験内容

本手法の有効性を確認するため、2枚のダイ画像で画素値の差分をとる手法との比較をおこなう。以下はこの手法をダイ間差分とよぶ。

実験を行った環境と用いた画像の詳細は以下のとおり

である。

マシンスペック	CPU: Pentium 4 3.6GHz Memory: 1GB
画像の性質	256 × 256 画素 8bit グレースケール
基準画像 (I_0 : 図4)	検出対象のダイ画像 10枚 (I_1 含む) から生成
検出対象画像 (I_1 : 図5)	欠陥部 x_d : (117, 17), $I_1(x_d) = 27$

検出対象となる画像を図5に示している。欠陥部は小さくまた画素値も小さいため、人間の目でもわかりにくい。提案手法の検索特徴サイズは $9 \times 9 = 81$ 画素、学習する参照数 N は3つまでとした。

5.2 実験結果

実験の結果、得られた画像をそれぞれ図6、図7に示す。またこれら結果のヒストグラムを図8、図9に示す。ヒストグラムの図では、欠陥部 x_d の値を矢印で示している。提案手法の実行時間は学習約5秒、検出約3秒となった。

結果を見ると、ダイ間差分では明るさむらとサブピクセルのずれの影響で欠陥部がノイズに埋もれてしまっており、差分をとった状態でも欠陥部を見分けることが困難であることがわかる(図6,8)。しかし提案手法ではこ

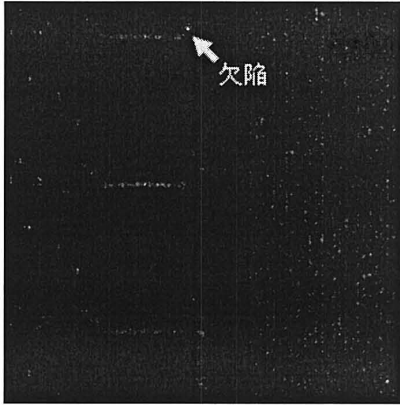


図7 提案手法による結果

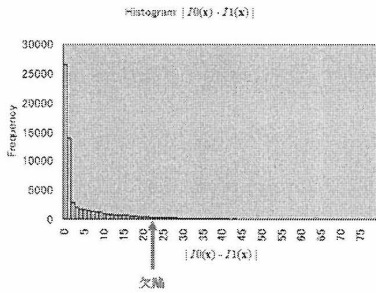


図8 図6のヒストグラム

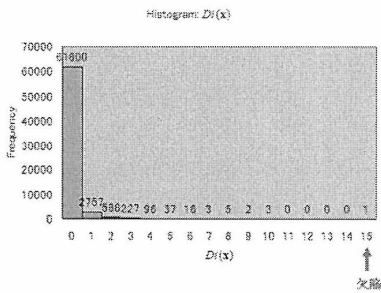


図9 図7のヒストグラム

これらの影響を抑えつつ比較ができており、欠陥部を最も強調できていることがわかる(図7,9)。

この実験より、人間の目でも見つけることが困難な欠陥部を本手法により高速に見つけられることを示すことができた。

6. まとめ

本論文では、類似したパターンをひとつのダイ画像内から検索し自己参照を利用した比較による半導体基板画

像からの欠陥検出手法を提案した。本手法では基準画像から参照先の座標、ダイ固有の孤立パターンノイズを学習し、その学習した情報をもとに比較・孤立パターンノイズの除去を行った。

さらに実験によって、人間も欠陥を見つけるのが困難な画像から微細な欠陥を感度よく高速に検出できることを示した。

今後の課題としては、最終的に導出される結果が各画素の“欠陥らしさ”であり、ほぼ輝度値のみから導出した値であるためばらつきが大きく輝度値そのものに左右されやすい。欠陥の強調はできるが閾値の設定などが難しい。パターンの相違度 d_{sn} などを用いた新しい尺度の導入が必要であると考えている。さらに学習時間をさらに短縮させるために、類似パターンを検索するアルゴリズムの再検討も必要である。

文 献

- [1] 渋谷, 前田, 堀田: “フレキシブルナイブレイズと特徴選択による欠陥分類”, VIEW 2008 予稿集, pp. 204–208 (2008).
- [2] 前田: “半導体パターン欠陥認識技術の動向”, 精密工学会中国四国支部「画像処理技術応用」講習会テキスト, pp. 1–11 (2008).
- [3] T. Hiroi, S. Maeda, H. Kubota, K. Watanabe and Y. Nakagawa: “Precise visual inspection for lsi wafer patterns using subpixel image alignment”, Proc. of 2nd IEEE workshop on Applications of Computer Vision (1994).
- [4] 浜松, 渋谷, 西山, 大島, 前田, 野口: “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).
- [5] 酒井, 前田: “複数パターンを利用した統計的はずれ検出による微小欠陥の認識手法”, 信学技報, PRMU2005 (2006).
- [6] M. Zontak and I. Cohen: “Defect detection in patterned wafers using anisotropic kernels , machine vision and applications”, DOI 10.1007/s00138-008-0146-y.
- [7] T. Honda and S. K. Nayar: “Finding “anomalies” in an arbitrary image”, Proc. of ICCV 2001, 2, pp. 516–523 (2001).