

半導体ウェーハ外観検査における 欠陥情報処理技術の研究

学位論文内容の要旨

半導体分野における競争力の維持には、製品の早期市場投入と低コスト生産が重要である。このため、半導体製造ラインにおいては、インラインウェーハ検査により早期に製造プロセスの異常を発見し、不良原因を推定、対策することにより歩留りの早期立ち上げおよび安定化を図っている。インラインウェーハ検査の情報は、検査装置の高感度・高速化が進むに従い増大している。そのため、検査で得られる欠陥情報をもとに、歩留り向上に有効な情報を効率良く抽出する技術が求められている。

本研究では、まず、点群分布パターン識別に基づく欠陥分類技術を開発した。ウェーハ外観検査装置によって出力された欠陥の座標情報に基づいて、欠陥をクラスタ欠陥、環状、塊状、線状、円弧状の4つのクラスからなる広域分布欠陥、ランダム欠陥のいずれかに分類するものである。

クラスタ欠陥は、隣接距離が決められたしきい値以下である欠陥をラベリングの要領で接続することにより検出する。前処理としてボロノイ図を作成しておくことにより、隣接欠陥のみ距離を調べればすむため、効率向上が図れる。

環状および塊状分布欠陥は、欠陥点群の密度の偏りによって生じるパターンを顕在化し、有意形状へのあてはめによりパターンを判定することにより検出する。第一のステップでは、局所密度の頻度分布に基づいて算出した最適画素サイズで欠陥密度を画素値の濃淡で表す密度画像を作成し、判別分析法を用いてこれを二値化する。第二のステップでは、二値化によって得られた画像をもとに、テンプレートマッチングにより適合パターンを探し、パターン内外の密度コントラストのチェックによりパターン検出の可否を判定する。テンプレートを基本形状の組合せで定義することにより、高速なマッチングを実現した。製造ラインで得られた916枚のウェーハを用いて本アルゴリズムの評価を行い、パターン検出正解率93.3%、このときの過検出率3.9%と実用上問題のないレベルであることを確認した。

線状分布欠陥は、欠陥点の座標に基づく直線のパラメータ空間への投票である、ハフ変換を利用して検出する。ハフ変換画像のピークに対応する位置に線状分布があるかどうかをチェックする。そのため、ピークに対応する直線の周辺を含めた領域の密度画像を作成し、二値化により直線候補領域を見つける。線らしさを表す特徴量を算出し、そのしきい値処理により直線として検出可能かどうか判定する。線らしさを表す特徴量として、全体が長いこと、隙間が短いこと、直線領域の両側にはパターンがないことを一つの数値で表した評価値、充填度、ばらつきなどを考案した。上記と同じ916枚のウェーハマップを用いて評価を行い、パターン検出正解率95.1%と良好な結果を得た。このときの過検出率が18.7%と高いが、運用に合わせた感度調整により、実用可能と考える。

円弧状分布欠陥は、線状分布と同様、円弧のパラメータ空間への投票によって検出する。まず、円弧上の任意の2点の垂直二等分線が必ず円弧中心を通るという特性を利用して、欠陥点群の任意の2点の垂直二等分線の軌跡をxy空間に投票して、ピークサーチにより円弧中心候補を見つける。次に、円弧中心を原点とした極座標変換を行い、水平な線分に変換された円弧を検出する。本アルゴリズムにより、円弧状分布欠陥発生ウェーハ16枚のうち、14枚(87.5%)について識別が成功することを確認した。

ウェーハ22枚によるアルゴリズム全体の計算時間の評価において、平均6125欠陥に対し2.9秒という結果を得、実用上まったく問題ないことを確認した。

次に、欠陥分布識別に基づくレビューサンプリング技術を開発した。欠陥をクラスタ欠陥、広域分布欠陥、ランダム欠陥に分類し、それぞれから最適な数をサンプリングする手法である。ランダム欠陥中の欠陥発生比率の推定、クラスタ欠陥および広域分布欠陥の主モード欠陥(大多数を占める欠陥種)特定が可能なサンプリング数を統計的信頼度に基づいて決定した。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)、クラスタ欠陥においては正解率86.4%(51/59)を確認できた。これにより少数のレビュー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。本技術は製品に搭載されている。

また、欠陥分布情報に基づく問題工程特定技術を開発した。インライン検査のウェーハマップから広域分布欠陥を検出することにより異常を検知し、装置着工履歴情報を利用してその原因となった装置を特定する。異常検知されたウェーハを着工した装置の装置QCマップと照合し類似分布パターンを検出する、装置・製品QC情報照合解析と、異常検知されたウェーハと近い時期の同じ検査工程のウェーハマップを類似分布と非類似分布に分類し、それらの経路の解析を行う共通経路解析の二つの手法を提案した。目視判定による評価で、提案の解析手法で問題装置の特定が可能であることを確認した。その上で、解析の自動化を目的として、ウェーハ面内の相対的な密度分布を表す密度画像の比較により類似度の定量化を行う欠陥分布照合アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムを実ラインで取得したデータに適用し、目視により装置・製品QC情報照合解析で問題装置を特定できた事例12件の分布照合正解率91.7%、問題装置候補なしと判定された事例22件の虚報率0%という評価結果を得た。また、目視により類似分布と非類似分布を分類し、共通経路解析で問題装置を特定できた6事例について、類似分布と非類似分布を100%正しく判定できた。以上により、提案の解析手法を自動化できる見通しを得た。

最後に、半導体ウェーハ検査装置のリアルタイム欠陥分類について検討した。リアルタイム欠陥分類はレビューの省力化のために行われている。ルールベース型の欠陥分類は、ユーザにとって理解しやすいため好まれている。しかし、欠陥クラス数や特徴量が多くなると、分類に有効な特徴量を見つけてしきい値を設定するのは困難である。そこで、ルールベース型の分類ルールを教示に基づき自動生成するアルゴリズムを開発した。2つに分けることを再帰的に繰り返し、決定木を構築する。特徴量と欠陥クラスの振り分け方をエントロピーに基づいて決定し、しきい値をカイ2乗統計量に基づいて決定する。6クラス186欠陥のデータを用いて適用評価したところ、分類正解率は86.6%となり、アルゴリズムの有効性を確認できた。生成された分類ルールは複雑すぎないため理解しやすく、熟練者にとっても納得できるものである。

以上をまとめると、本研究では、半導体ウェーハ検査で得られる欠陥の位置情報に基づく欠陥分布パターン識別技術とそれを利用したレビューサンプリング技術および問題工程特定技術の開発を行った。また、半導体ウェーハ検査のリアルタイム欠陥分類を対象として、決定木を利用した分類ルール自動生成技術の開発を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 川 泰 夫
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 山 下 裕
副 査 准教授 田 中 孝 之

学 位 論 文 題 名

半導体ウェーハ外観検査における 欠陥情報処理技術の研究

半導体製品の歩留り維持・向上のためには、製造途中のウェーハの外観検査により異常を発見し、原因究明および対策を行うことが重要である。検査装置は半導体デバイスの微細化に伴って高感度・高速化が進み、その結果膨大な欠陥情報が出力されるようになった。しかしエンジニアによる解析の量的限界から、大部分の情報は死蔵される。そのため、これらの欠陥情報の有効活用が強く望まれている。

本論文はこの要望に応えるため、半導体ウェーハ外観検査で得られる欠陥情報を基に、歩留り向上に有効な情報を抽出する技術を提案している。

まず、点群分布パターン識別に基づく欠陥分類技術を開発した。これは、ウェーハ上の欠陥をその分布状態によって、局所密集欠陥、広域分布欠陥およびランダム欠陥に分類する技術である。局所密集欠陥は距離に基づいて識別するが、ボロノイ図利用により計算効率向上を実現した。広域分布欠陥は、分布パターン形状の多様性に対応するため、環状、塊状、線状、円弧状の4クラスに分類し、それぞれを識別するためのアルゴリズムを開発した。環状および塊状分布は、密度に応じた適正な画素サイズで分布状態を画像化した上で、テンプレートマッチングにより識別を行う。線状および円弧状分布は、パラメータ空間への投票に基づき識別を行う。半導体製造ラインで得られたウェーハマップを用いた実験により、それぞれのアルゴリズムの有効性を確認した。従来技術と比較して、欠陥密度の多様性と分布パターン形状の多様性に同時に対応可能である点で実用性が高い。本技術は、薄型ディスプレイ、ハードディスク基板などの外観検査、機能検査の結果である欠陥マップの解析にも適用可能である。

次に、欠陥分布識別を利用した高効率レビューサンプリング技術を開発した。ランダム欠陥中の欠陥発生比率の推定、局所密集欠陥および広域分布欠陥の主モード特定が可能なサンプリング数を、従来技術では考慮されていなかった統計的信頼度に基づいて決定し、実験により少数のレビューでウェーハ全体の欠陥発生状況を把握できることを確認した。本技術は点群分布パターン識別に基づく欠陥分類技術とともに、製品に搭載されている。

次に、欠陥分布パターンに基づく問題工程特定技術を開発した。これは、製品検査のウェーハマップを基に異常を検知し、装置着工履歴情報を利用して異常原因装置を特定する技術である。製品 QC マップをそのウェーハの着工装置の装置 QC マップと照合し類似分布を検出する装置・製品 QC 情報照合解析と、製品 QC マップと近い時期の同じ検査工程の製品 QC マップを類似分布と非類似分布に分類し、類似分布ウェーハの共通着工装置を問題装置とする共通経路解析の二つの解析手法を立案した。目視判定による評価で、これらの解析手法で問題装置の特定が可能であることを確認した。また、ウェーハ面内の相対的な密度分布を表す密度画像の比較により類似度を定量的に評価する欠陥分布照合アルゴリズムを開発した。半導体製造ラインで取得したデータに適用して高い正解率が得られることを確認し、提案手法を自動化できる見通しを得た。本技術は、従来技術で必要とした学習やライブラリ登録の作業が不要という点で実用性が高い。

さらに、近年重要性が高まってきたリアルタイム欠陥分類を対象として、ルールベース型欠陥分類の自動ルール生成技術を開発した。これは、特徴量と欠陥クラスの対応付けの教示に基づいて決定木学習を行い、if-then ルールに変換するものである。決定木を欠陥分類に適用する際に必要となる多クラスへの対応としきい値の決定を考慮した決定木学習アルゴリズムを新たに開発し、評価実験によりその有効性を確認した。本技術は、手動でしきい値の調整やルールの追加が可能であるため、特定の欠陥の見逃しが低くなるよう調整するといった重要なニーズに応えられる点で教示型分類より優位である。また、既存装置への適用を考える場合、オフラインで自動生成したルールを手動で既存装置に入力すればよく、容易に実現可能である。

以上を要するに、著者は、半導体ウェーハ外観検査を対象として欠陥分布と欠陥種類に着目した欠陥情報処理技術を開発し、製造ラインで得られた実データを用いた実験により技術の有用性を確認した。これにより、製造産業に対して、欠陥情報を基に異常原因の特定を効率よく実施するための有益な手段を提供した。この結果は、画像処理およびパターン認識の応用技術、特に外観検査技術の発展に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。