

学位論文題名

電子機器の製造における外観検査のための画像取得と
その処理に関する研究

学位論文内容の要旨

製品の外観検査の本質的な課題は欠陥と良品を分離することであるが、多様な検査対象において、様々な欠陥を良品と完全に分離することは技術的な障壁が高い。電子機器の製造において、特に検査が困難なものとして、電子基板のはんだ付接続部の検査と半導体ウェハ上の微小欠陥検査があげられる。

前者のはんだ外観検査では良品製品における形状ばらつきが大きく、高い欠陥検出性能を低い虚報率で実現するには検査対象の立体形状を正確に推定した欠陥抽出が必要である。また、高いスループットが要求を満たすため、高速検出が可能な光学的な検出が不可欠になる。光学的な方式で立体形状を検出する方式としては光切断法等の従来手法が知られていた。しかし、はんだ付け部は極めて反射率が高いため、計測すべき領域からのほとんどの光が検出系と異なる方向に反射され、別の領域を照明して検出系での検出が困難になったり、あるいは隣接したはんだ付け部からの反射光を誤検出する等により形状を正確に検出することが困難であった。

後者の半導体ウェハ上の微小欠陥検査においては、検査対象欠陥が数 10nm と、CCD や CMOS などの Si をベースにした一般的なセンサーが感度をもつ数 100nm の波長に対して極めて小さくなってきており、光学的には解像することが不可能になってきている。しかし、高いスループット要求を満たす検出系としては、光学的な検出方式しか選択肢はない。この結果、欠陥と虚報の混在した欠陥候補を光学検査装置で検出し、スループットは低い为数 nm の解像度を有する走査式電子顕微鏡 (SEM) を備えた欠陥レビュー SEM による欠陥候補の実欠陥と虚報の弁別、さらに分類といった 2 段ステップによる検査方式が採られるようになってきている。しかし、電子線は物理的な特性が光学式とは異なるため、高い解像度をもつにも関わらず光学式で顕在化できる欠陥を検出できない場合がある。その典型的な例が半導体ウェハの透明膜中に存在する膜中欠陥である。電子線は膜中には侵入できないため、膜中欠陥が存在した際に発生する表面の緩やかな凹凸を顕在化する必要があるが、一次電子の照射に伴う総二次電子数は、急峻なエッジ部がないと大きく変化しないため、一般的な SEM 検出系では顕在化させることができない課題があった。上記のような課題に対して、本研究では複数のセンサーからの出力を統合して、検出対象の立体形状を検出、あるいは顕在化させ克服する。

はんだ検査技術においてはスポット状の照明光を、この照明系の光軸と同軸の検出系で検出して、焦点ずれにともなう検出系におけるスポット径の拡大を利用した距離計測系である多段焦点検出系を開発して、この課題を解決した。この検出系は、照明系と検出系が同軸であることを利用し、照明位置から反射した光が基板面は他のはんだ付け部に照明して明るく検出される二次反射をカットして、二次反射による距離計測誤差を抑制した。また、焦点を互いにずらした複数の検出系で同時に並行検出を行うことにより、焦点法の課題であった撮影時間の短縮を図った。

また、この複数の、焦点面から非等間隔な距離に配置された複数の検出系で同時に検出された明度より、検出対象の距離を演算するアルゴリズムを開発し、少ない検出系の数でも距離分解能を確保できるようにした。さらにピーク強度も内挿補間により算出できるようにして、距離画像と明度画像をともに検出できるようにした。

検査アルゴリズムでは、この距離画像と明度画像をもとに、はんだ付け部がブラックに覆われたような当初想定していなかった状態で発生した距離画像におけるノイズを、明度画像と距離画像を併用して除去するアルゴリズムを開発した。このノイズが除去された距離画像と明度画像より、リード、電極部、パッド部、はんだ付け部を認識し、データベースに登録された各電子部品の設計形状データと比較して実装仕様と検査対象の実装状態を比較して欠陥を検出するアルゴリズムを開発した。

多段焦点検出系として備えた検出器の数は 16、距離検出レンジは 1.5mm、距離計測精度は照明系のビーム

ウェストにおいて $5\sim 10\mu\text{m}$, 水平方向画素サイズは $15\mu\text{m}$ である。開発したアルゴリズムを、多段焦点検出系と組み合わせ、実ラインで性能評価を行い、欠陥検出率 100%(80/80), 虚報率 0.13%(230/171925), 検査データ生成時間 1 分以内を確認した。

半導体ウェハ上の微小欠陥検査においては、SEM においてこの低段差欠陥を顕在化させるための検出条件の最適化を行った。電子を上方と左右の低角から検出する 3 検出器の構成において、欠陥を顕在化させるための最良の検出立体角を検討したところ、この欠陥コントラストを最大化させる検出立体角は欠陥の表面凹凸にはほとんど依存せず、画像に重畳するノイズの性質によって変化することを明らかにした。画像に重畳するノイズのショットノイズの割合が大きいくほど検出立体角を大きく設定することができるが、その最大の検出立体角は低仰角側から 60 度付近であり、線形なノイズが増えるに従って、検出立体角を小さくしなければならないことを明らかにした。また、少ない電子数でも欠陥を顕在化して検出する検査アルゴリズムを構築した。開発したアルゴリズムの特徴は以下のとおりである。

(1) 複数の検出系で撮影した画像より、それぞれ隣接するチップと比較して差分を算出し、これを多次元の特徴ベクトル空間で表し、多次元空間にプロットされた差分ベクトルを、先見的に判明している欠陥のモデルデータと、画像に重畳しているノイズ分布をもとに一次元データとして射影して欠陥を顕在化させる、領域別射影弁別法。

(2) LPPM における課題である、参照画像の空間周波数が高い場合の感度低下を最小にするために開発した、参照画像と検査画像の両方を振動させて振動差分画像を算出するサブピクセル対応 BD-LPPM。

(3) 単純差分画像より、LPPM、あるいは BD-LPPM のノイズ分布を推定し、適正なしきい値を決定するアルゴリズム。

低段差欠陥の代表であるマイクロクラッチが多発した工程の SEM 画像 170 枚に対して開発したアルゴリズムの欠陥検出性能を評価し、従来の SEM 像のみからの欠陥検出、領域別のマハラノビス距離に基づく欠陥検出と性能を比較した。この結果、開発したアルゴリズムは欠陥の再検出率は 97.8%, 虚報除去率は 87.5%, 総合正解率で 97% と、実用に耐える性能を得ることを確認し、従来型の SEM による検出を模擬したアルゴリズムの欠陥再検出率 78%, 虚報除去率 38%, 総合正解率は 66%, マハラノビス距離を使って欠陥を検出した欠陥の再検出率 82.6%, 虚報の除去率 25%, 総合正解率は 71.8% に比較して性能の向上を図ることができることを確認した。

最後に、今後のより汎用的な画像からの欠陥検出を目的に、一般画像より、先見的な知識や比較によらずに異常部を、評価パターンをその周辺パターンに条件づけた確率により定式化する手法を提案し、提案方式により、人間が特異であると感じる領域を自動的に抽出できることを検証した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	五十嵐	一
副 査	教 授	金 子	俊 一
副 査	教 授	金 井	理
副 査	教 授	北	裕 幸

学 位 論 文 題 名

電子機器の製造における外観検査のための画像取得と その処理に関する研究

電子機器の品質を保つために、製造時における外観検査が重要な役割を果たしている。外観検査においては、得られた信号からさまざまな欠陥を正しく同定して、良品と欠陥品を弁別することが重要である。本論文は、はんだ外観検査と半導体ウェハの微細欠陥検査のために、著者が新しく提案した検査方法とその評価結果について詳しく論じている。

第1章では本研究の背景および目的について述べている。まず、電子機器の製造における製品信頼性の確保と製品歩留まりの向上を目的とした自動外観検査装置に対する要求について述べている。自動外観検査装置においては、欠陥と良品とを良好に分離可能な画像を撮影することと、この画像から高い精度で欠陥を検出することが不可欠である。本章では、このための技術として、立体的な形状を顕在化する画像のセンシング技術と、この画像処理技術の概要と課題について述べている。

第2章では、電子機器の製造における高信頼性を実現するための、電子部品の実装検査技術について述べている。特に表面実装基板のはんだ付け部を含んだ検査のために、著者が開発した焦点法を用いた多段焦点検出技術について述べている。ここでは本研究で検討した、少数の検出器によって良好な距離検出精度を実現するための光学系の最適化方式と、距離画像の算出方法について述べている。次いでこの検出系で得られた距離画像と濃淡画像を統合して実現したノイズ除去アルゴリズム、検出立体形状と部品設計データとの比較に基づく検査技術について述べている。これらの検討結果にもとづいて開発した検査システムを評価した結果、開発した多段焦点検出光学系の高さ検出精度は $5\sim 10\mu\text{m}$ 、高さ検出レンジは 1.5mm 、検出データレートは 2M 画素/sであることを示した。また、欠陥検出率 100% ($80/80$)、虚報率 0.13% ($230/171,925$)、検査データの生成時間が1分以内であることを確認している。

第3章では半導体デバイスの製品歩留まりの向上を目的とした、複数検出器を統合した半導体外観検査技術について述べている。このなかで、特に半導体デバイスの欠陥観察用の電子顕微鏡であるレビュー SEM(Scanning Electron Microscope)における、検査対象表面の凹凸を顕在化するための検出条件の最適化のための検討について述べ、最適な低角検出器の電子を捕集する検出立体角は、ノ

イズの条件によって変化するが、ノイズがショットノイズのみで表せる場合に検出立体角は最大になり、その角度が低角から 60° 程度になることを明らかにしている。また、このレビュー SEM に備えられた 3 つの検出系を、検出すべき欠陥の各 SEM 検出系に捕捉される電子数の期待値で設定された欠陥モデルと、撮像された画像に重畳するノイズをもとに統合して、高感度な欠陥検出を実現する検査アルゴリズムについて述べている。これらの検討結果に基づいて開発した検査アルゴリズムを評価して、欠陥検出成功率 97.8%(28/32)、虚報除去率 87.5%(165/170)、総合欠陥検出成功率 97.1%(165/170)を確認している。

第 4 章では、設計データとの比較や良品画像比較によらない欠陥検出の実現を目指し、一般的な画像より特異部を検出するアルゴリズムの検討結果について述べている。ある評価パターンの特異性を、その周辺パターンが存在した場合の発生確率として表し、一般的な風景画像や半導体パターンから、人間が着目するような領域を自動的に抽出するアルゴリズムを提案している。条件付き確率を高速に算出するため、周辺パターンを DCT 圧縮と KLT 圧縮により縮退した表現方法を適用し、評価パターンに対しては線形予測からの残差の ICA 表現を用いた。処理時間は 700MHz の Pentium を搭載した PC において、20～70 秒であった。

第 5 章では第 1 章から第 4 章に述べた研究内容で得られた結論をまとめ、また、本研究によって開発された技術によって、電子部品の製造工程の外観検査において達成した成果について述べている。

これを要するに著者は、はんだ外観検査と半導体ウェハの微細欠陥検査のために、新しい検出手法と欠陥弁別アルゴリズムを提案し、さらにそれらの有効性を示しており、外観検査分野の発展に対して貢献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(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。