

氏名	うめはら やすとし 梅原 康敏
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	シス博 第116号
学位授与の日付	平成31年3月25日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	ナノフォーカス X線の単一透過像に基づくシリコン貫通 ビアの三次元形状検査法に関する研究
論文審査委員	主査 教授 諸貫 信行 委員 教授 久保田 直行 委員 准教授 菅原 宏治 委員 教授 梅田 和昇（中央大学）

【論文の内容の要旨】

電子回路を形成したシリコンチップを重ねて立体的な配線をすることで実装面積を小さくする高密度三次元積層回路素子の開発が行われている。その立体配線部分には複数のチップ間をつなぐため、チップに微細な貫通孔を設けて銅を充填したシリコン貫通ビア（配線）が実用化され用いられるようになった。

その製造工程にはエッチング工程、バリアー／シード層形成や銅めっき工程が含まれ、その製造条件や製造装置自体の変動により、ビアの形状変動や充填した銅の中に空洞が発生することがある。これらは最終的な製品の信頼性を損なうため、製造工程の早期に発見する必要がある。そのため製造工程中のシリコンウエーハの非破壊検査に対する要求は強く、しかも製造工程中に直接組み込める検査（インライン検査）が望まれている。

近年、高出力X線源とX線走査機構を用いたCT技術によるシステムによって、ビアの三次元形状を詳細に測定した事例が報告されている。しかしながら、ビアを形成した試料をCT技術で検査するためには、X線源と試料の位置・角度を変えながら多くの高倍率X線透過像を撮像することが必要で、長い時間たとえば10時間程度を要するとともに、スキャンのための装置の各運動機構の精度が制約となり、サブミクロンレベルの精度を保証して検査することは容易ではない。

一方、サブミクロンの分解能を持つナノフォーカス X線顕微鏡システムが開発され、検査対象となる直径 5 μm 、長さ 50 μm 程度の大きさのビアの外形状や、そこに内在する直径 0.5 μm 程度の空洞もその透過像から観察できるようになってきている。もし1枚のX

線透過像に基づいてビアの検査を行えば、高いスループットでインライン検査も可能と考えられるが、その方法論の検討や原理検証、および精度評価はこれまで行われていない。そこで本研究では、(1)予め想定したビア幾何モデルの透過シミュレーション画像から機械学習を行い、実際に得られる1枚の透過画像からビアの寸法形状を推定する方法論を提案するとともに、(2)この手法の不確かさについての要因分析を行って精度改善の方向性を明らかにし、さらに(3)銅めっき後のビアの寸法形状と内部空洞欠陥寸法までを定量的に測定できることを示すことを目的とする。

第1章は緒論であり、研究の背景である三次元積層素子におけるシリコン貫通ビア形成のための製造工程、すなわち深堀エッチング直後の状態のビアの形状検査から配線として電気信号を伝導する銅をビアに充填するめっき工程における検査法の課題を解説し、本研究の目的と方法論の有用性および工学的位置付けを示す。

第2章ではエッチング直後の貫通ビアについて1枚の透過像からビアの寸法を推定する方法論を述べている。ビアの形状は円柱と円錐台が直列に接続した簡易的な構造としてモデル化し、このモデルの透過像のシミュレーション像を計算で求め、これらを教師データとして学習した測定システムで1枚の透過像から寸法形状を推定する方法を提案した。この実画像を用いた検証の結果、使用するX線像の光学分解能 $0.25\ \mu\text{m}$ 程度に対し、 $0.1\ \mu\text{m}$ 程度の再現性で貫通ビア直径の推定が行えることを示した。

第3章では、提案システムの不確かさの要因分析と各要因の寄与度合いを調べ、更なる精度改善のための指針を議論している。機械誤差、電気ノイズ、計算アルゴリズム、寸法が既知の試料を用いた校正等を不確かさが発生する要因として分析を行っている。まずは、本提案方法で直径が $10\ \mu\text{m}$ 深さが $90\ \mu\text{m}$ 程度のビアに対して測定を行い、断面SEMによる測定値との平均二乗誤差を調べ、その結果ビアの直径と深さについて、それぞれ 0.81 、 $0.95\ \mu\text{m}$ となり、サブミクロンでの推定精度が期待できることが確認された。そして、先の要因分析によるシステム全体の不確かさは同様にビアの直径と深さに対してそれぞれ 0.54 、 $0.99\ \mu\text{m}$ 程度であると見積もられ、実測の誤差と同等レベルであることが示された。不確かさの要因として校正精度と電気ノイズの影響が大きいことが明らかになり、更なる精度向上のためにはこれらの改善が必要であることを明らかにした。

第4章は、銅めっき後のビアとビア中の空洞欠陥の検査に本手法を応用した結果について述べている。ビア中の空洞の形状を予め分類し、空洞形状が回転対称の場合について空洞を含むビアのシミュレーション画像による機械学習を行った後に実画像から形状推定計算処理を行った結果、直径が $5\ \mu\text{m}$ 、深さ方向 $50\ \mu\text{m}$ 程度のビアの内部の直径 $1.2\ \mu\text{m}$ 深さ $2\ \mu\text{m}$ 程度レベルの大きさの空洞の寸法と容積を推定できることがわかった。さらに応用の議論として、検査結果と発生の要因となる製造工程の課題を関連付けて上流工程へフィードバック制御を行うことができれば、欠陥の発生を低減することが可能であることを示した。

第5章は結論であり、本研究で得られた結果を総括するとともに今後の半導体製造工程のインライン検査の発展性について述べている。