

【論文審査の要旨】

半導体回路パターンの微細化による高集積化が限界に近づきつつあり、複数のチップを重ねた立体配線による高密度化が多く取り入れられるようになってきた。これに伴い、シリコンチップを貫通した配線（TSV: Through Silicon Via）製作の信頼性に対する要求も厳しくなっている。典型的な TSV の大きさは直径 $5\ \mu\text{m}$ 長さ $50\ \mu\text{m}$ 程度であり、シリコン基板にエッチングで孔をあけ、銅めっきで充填して製作される。エッチング後の形状は理想的な円筒形ではなく複雑な三次元形状となり、また、めっき時に発生する空洞が信頼性を下げるなどの課題があり、検査の重要性が増している。

これらを非破壊で検査するために超音波や X 線を用いた方法が検討されているものの、超音波法では解像度が十分ではなく、また CT (Computed Tomography) による方法では長時間を要するとともに、走査のための運動精度が最終精度を低下させる等の理由で実用化に至っていない。

本論文では、細いビーム径を得られるナノフォーカス X 線源を用いた 1 枚の透過画像に基づく TSV の形状寸法測定と、めっき内の空乏欠陥検査法を提案している。これを実現するためには、X 線透過像から輪郭情報を抽出するための画像処理法を開発するとともに、単一透過像から TSV 外形やめっき後の欠陥の三次元形状寸法を推定するためのモデルと画像の関連付け、および精度を低下させる要素の特定と改善等の課題を解決する必要がある。本論文では一部数値実験を用いながらこれらの解決を試み、以下のような成果を得た。

(1) 単一透過像に基づく TSV 形状寸法推定法の確立

テーパが連なった形状として TSV をモデル化し、その X 線透過像を模擬生成する手法を提案した。次いで、これらの画像を用いた機械学習を適用して 1 枚の透過像からエッチング後の TSV 形状寸法を推定する方法を提案し、直径 $10\ \mu\text{m}$ 長さ $90\ \mu\text{m}$ の TSV に対して実証を行った。さらに、銅めっき後の内部欠陥検査にも適用できるようにこの方法を拡張した。めっき部の欠陥は複雑な三次元形状をもち、それぞれの原因は明らかにされている。そこで、X 線透過像に基づいてこれらの分類を行うとともに、回転対称の欠陥について前述の方法を適用して寸法の把握が可能であることを示した。なお、寸法の校正は TSV を収束イオンビームで切断して電子顕微鏡観察した結果と推定結果を対応させて行われるものである。

(2) 系統的な不確かさ要因分析の検討

前述の手法による検査結果には撮像装置の解像度の他、電気ノイズ、画像処理のアルゴリズム、機械的な位置決め精度、および校正法などの多数の因

子が影響する。これらの不確かさを系統的に分類・分析し、要因毎の不確かさを定式化するとともに、試作機の場合の不確かさを定量化した。この結果、達成精度は TSV 外形、内部欠陥ともに直径方向で $0.1 \mu\text{m}$ 程度と十分な精度であることを示した。さらに、今後改善すべき要素として電気ノイズの低減と校正法が挙げられることを明らかにした。これらの手順は一般性を有し、他の精密機械の精度向上に資することもできるものである。

(3) 応用可能性の検討

提案する方法によれば CT 法に比べて大幅な時間短縮が可能であるため、複数の工程間に検査を組込んで前後工程の調整を図ることで最終製品の信頼性を向上することが可能となる。そのようなシステム化の可能性も検討した。

以上のように、本論文では半導体チップに設けた貫通配線の検査を 1 枚の X 線透過像に基づいて行う手法を新たに提案・検証するという学術的意義を有するとともに、半導体分野以外の精密機械への応用可能性という工業的な価値も有する。よって、本論文は博士（工学）の学位を授与するに十分な価値があるものと認められる。

(最終試験又は試験の結果)

本学の学位規則に従い、最終試験を行った。公開の席上で論文発表を行い、審査委員他による質疑応答を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、専門科目についても十分な学力があるものと認め、合格と判定した。