

論文の内容の要旨

専攻名 システム創生工学

氏名 石垣裕之

近年、高度な自動化やAIが急速に発展し、我々の日常生活への応用が進んでいる。数年前は近未来映画の中のことと思われた自動車の自動運転も当たり前になりつつある。自動運転に限らず、複雑で高度なシミュレーションや正確な音声認識等、我々の生活をより快適にするこれらの先進的な技術が近年次々と実現している理由の一つに、半導体デバイスの小型化・高性能化の著しい発展が挙げられる。半導体デバイスの高性能化により、複雑で膨大な量の計算を現場で高速に処理することが可能となったためである。これらの技術は今後も発展することは明らかであり、従って、半導体デバイスの小型化・高性能化は今後も進み続けることは容易に想像できる。半導体デバイスを効率良く小型・高性能化する手法の一つに、複数の異なる種類の半導体チップをシリコンインターポーザと呼ばれるシリコン製の基板に搭載（接合）することで、複雑な処理を可能とする一つの半導体デバイスを形成する方法がある。ここで、シリコンインターポーザと半導体チップを接合するのにマイクロバンプが使われる。マイクロバンプとは鏡面を持つ半球状の金属突起であり、高さ10~20 μm 、直径約20 μm 程度の微細な金属端子である。半導体チップとシリコンインターポーザ間に多数形成され、平面同士の接合を担うため、高さの均一性が重要である。しかしながら、マイクロバンプは鏡面を持つ微細な球面であるため計測が困難で、半導体デバイスの製造ラインの速度に対応できる全数検査可能な検査装置が無いのが現状である。現在は抜き取りによる検査が行われているが、安定した品質と直交率を向上させるためには全数検査が望ましいことは明らかである。

このような状況を鑑み、本論文は、ますます小型・高性能化する半導体製造業界において、半導体デバイスの高性能化を担うマイクロバンプによる半導体チップの接合プロセスに、インライン検査が可能な高速性と高精度を両立する計測システムを提案するものである。本計測システムに必要な要件は高速・高精度に鏡面計測が可能であり、産業的な利用を目的とするため、外的要因による振動等に強いシステムであることである。これらの要件を満たす計測システムとして著者は近接2波長を用いたデジタルホログラフィによる瞬時撮像3次元形状計測システムを提案した。本システムは高速高精度な鏡面計測が可能で、様々な画像処理に応用可能であるデジタルホログラフィを用いた干渉計測を基本とする。また、10~30 μm のダイナミックレンジを確保するため、波長差2~4nmの近接2波長による2波長法を採用した。耐振動性として、2波長による計測を別々の撮像装置に瞬時撮像可能なシステムとした。ここで、一般的な2波長瞬時撮像システムには2つのビームの合成と分離プロセスが存在するが、ダイクロイックミラー等では波長差が僅か2~4nmの場合、高い波長選択性を持って分離できないという問題がある。そこで、本論文ではこの問題に対し、参照光の光路と物体光の光路を共通とする2つの干渉計を、光源が向かい

合わせになる形に配置する対向設置と呼ぶ光学システムを提案し、解決した。更に、偏光イメージセンサを用いて並列位相シフトデジタルホログラフィを実装し、システム全体を小型化した。本論文ではこのシステムを構築する原理の説明と、構築したシステムの性能評価を示すものであり、その構成は以下の通りである。

第1章ではマイクロバンプ検査の重要性と、マイクロバンプ検査システムに要求される条件を示し、それらを満たす検査システムとそのシステムの実現に向けた課題を示す。さらに、各課題に対して解決方法について述べる。

第2章では課題解決のための基本手段であるデジタルホログラフィの原理について述べる。本計測システムに適したホログラム生成プロセスとホログラム再生プロセスについて検討し、数ある手法の中から最適と思われるものを選択する。

第3章では対向設置の光学系にデジタルホログラフィを組み合わせたシステムとして、光源に低コヒーレンス光源（LED）を用い、ホログラム生成法としてフーリエ変換法を採用したシステムを構築した。このシステムにおける計測に必要な各種調整手法等を示し、基本性能評価結果について示す。

第4章ではLED+フーリエ変換法のシステムをさらに工業的な使用に適したものとするため、光源をレーザーに変更し、ホログラム生成方法に偏向イメージセンサを用いて並列位相シフト法を実装することで、より高速・高精度化したシステムを構築した。偏向イメージセンサのキャリブレーションについて述べ、実際のバンプ計測を行い、外部共焦点レーザー顕微鏡と比較した結果を示す。

第5章では偏光を利用しない干渉計における対向設置を提案し、基本性能評価を行う。

第6章ではこれまでの結果を総括し結論を述べ、更に、製品化に向けた展望について述べる。