

学位論文題名

半導体CMPプロセス制御のための研磨レート予測モデル 構築手法に関する研究

(Polishing Rate Predictive Model Building Method for Semiconductor CMP
Process Control)

学位論文内容の要旨

今日、様々な機器に搭載されている半導体システム LSI は、高速化や高機能化の市場要求に伴い、高集積化の一途を辿ってきた。微細化と多層化の進む半導体システム LSI の製造難度は年々上昇しており、新製品をできるだけ早くかつ廉価で市場投入するためには、製造歩留りを速やかに立上げかつ高歩留りを安定的に保つことが求められている。

半導体製造工程は、一般にシリコンウェハ上に多数の集積回路チップを作り込む前工程と、個々のチップを切り出し、モールドに封止して半導体製品を仕上げる後工程に分かれている。前工程では、成膜、研磨、ホトリソグラフィ、エッチングなどの様々なウェハプロセスを組み合わせ、微細回路パターンを形成する。半導体製品の不良の大半は、微細加工を必要とする前工程で発生するため、前工程の製造プロセスの微細加工精度を向上し維持することが重要である。

過去には、前工程で必要とされる微細加工精度は、製造装置の開ループ制御によって達成されていた。すなわち、レシピと称される製造装置の圧力、温度、加工時間などの適切な設定値の組み合わせを、所望の加工精度を達成する条件出し実験によって見出し、その後は変更を加えることなく製造が続けられた。近年、半導体 LSI の微細化が進展すると、開ループ制御では製造装置の加工精度を維持することが困難になり、閉ループ制御が用いられるようになった。加工結果を寸法検査装置によって計測し、徐々に変動する加工レートを推定して加工時間の調整にフィードバックすることで加工精度の維持が図られた。この方式は、半導体製造の分野で Run-to-Run APC(Advanced Process Control) と称され、先端半導体 LSI を製造する全てのラインに普及した。さらに半導体 LSI の微細化が進展すると、時間を要する寸法検査装置の計測値のフィードバックでは、加工レートの変動に追いつくことが困難になってきた。そこで、製造装置の状態を即時計測して加工寸法あるいは加工レートを予測することにより、遅延する寸法計測を代替補助する「仮想計測」と称する技術が提案されるに至った。

本論文では、上述した背景の下、半導体システム LSI の微細化に伴い、前工程の中で重要な役割を果たしているプロセスの 1 つである CMP(Cheical Mechanical Polishing) プロセスを対象として、CMP-APCのための「仮想計測」を実現する研磨レート予測モデルの構築に関連する従来の取組みの技術課題を明らかにし、この課題に対する解決策について論じた。様々な機器に搭載される半導体システム LSI を製造するには、多品種小量生産が必要になる。CMP 装置の研磨レートは、主に消耗部材の劣化によってトレンド変動する他、半導体製品の品種毎の材料、パターン寸法、パターン密度などによる被研磨特性の違いによってオフセット変動する。従来は、製品品種毎にデータを層別し、製品品種毎の研磨レート予測モデルを構築していた。研磨レート予測モデルの形態を製造装置の状態計測値を説明変数とする回帰モデルとした場合、従来の最小 2 乗法によって、履歴データからモデルパラメータである切片と係数を同定することができた。しかし、データ層別による製品品種別の研磨レート予測モデルの構築では、統計的に必要十分な履歴データが蓄積されるまで予測

モデルを構築できないという課題があった。また、消耗部材を交換した際に、研磨レートが元の初期状態に復帰しないことがあるのに対して、研磨レート予測値は初期値に復帰してしまうという課題があった。

上記課題を解決する本研究における成果を以下にまとめる。

(1) 研磨レート予測モデルを構築するためには、予測モデルの説明変数を選択する必要がある。まず、Wavelet 信号波形弁別により、研磨レート変化と共起性のある消耗部材交換などのイベントを明らかにした。つぎに、研磨レートを目的変数に、CMP 装置関連データを説明変数にした縮退回帰分析を行い、説明変数の複数の候補を抽出した。最後に、グラフィカルモデリングを適用して、説明変数候補相互の相関構造を明らかにして説明変数を選択した。

(2) 消耗部材や製品品種と言った制御対象の個体差に対応して研磨レートを予測するモデルの形態を、従来の回帰モデルからマルチレベルモデルに拡張した。マルチレベル研磨レート予測モデルを構築するために、説明モデル同定ステップと予測モデル同定ステップからなる構築手法を提案した。制御対象の個体差に対応した複数のモデルパラメータを同定するために、共通手続きとして MCMC 法 (Markov chain Monte Carlo methods) を利用したパラメータ同定を行う。具体的には、パラメータ DAG (Directed Acyclic Graph) モデルの設計、階層ベイズモデルへの変換、データ尤度関数の設定、パラメータ事前分布の設定、MCMC サンプリングシミュレーション、事後分布からのパラメータ同定を順に行う。

(3) 2種類の消耗部材であるドレッサとパッドの劣化の影響を同時に受ける CMP プロセスの研磨レートを、消耗部材の使用時間から連続的に予測するモデルを、提案する予測モデルの構築手法を用いて構築した。パッド交換時のエージング (初回目立て) 状態をドレッサ使用時間から予測する消耗部材個体差モデルをマルチレベル形態の研磨レート予測モデルに組み込み、その複数の個体差パラメータを確率変数として、製造ラインから収集した少量履歴データを用いて MCMC 法により同時一括で同定した。CMP-APC シミュレーションによって研磨量制御の精度を評価し、提案手法の有効性を検証した。

(4) 消耗部材劣化の影響と、異なる研磨速度を持つ多品種製品の連続投入の影響を同時に受ける CMP プロセスの研磨レートを、消耗部材の使用時間から連続的に予測するモデルを、提案する予測モデルの構築手法を用いて構築した。品種個体差切換モデルを装置消耗部材起因のトレンド変動を予測する品種共通の研磨レート予測モデルに組み込み、その複数の個体差パラメータを確率変数として、製造ラインから収集した多品種少量履歴データを用いて MCMC 法により同時一括で同定した。パラメータ事後分布の分析により、モデル切片にのみ製品品種個体差パラメータを組込めば良いことを明らかにした。CMP-APC シミュレーションによって研磨量制御の精度を評価し、計測遅延外乱にロバストな制御系を構築可能なことを検証した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 小 野 里 雅 彦
副 査 准 教 授 田 中 孝 之

学 位 論 文 題 名

半導体CMPプロセス制御のための研磨レート予測モデル 構築手法に関する研究

(Polishing Rate Predictive Model Building Method for Semiconductor CMP
Process Control)

本論文では、半導体システム LSI の微細化に伴い、前工程の中で重要な役割を果たしているプロセスの 1 つである CMP(Cheical Mechanical Polishing) プロセスを対象として、CMP-APC (Advanced Process Control) のための「仮想計測」を実現する研磨レート予測モデルの構築に関連する従来の取組みの技術課題を明らかにし、この課題に対する解決策について論じている。様々な機器に搭載される半導体システム LSI を製造するには、多品種小量生産が必要になる。CMP 装置の研磨レートは、主に消耗部材の劣化によってトレンド変動する他、半導体製品の品種毎の材料、パターン寸法、パターン密度などによる被研磨特性の違いによってオフセット変動する。従来は、製品品種毎にデータを層別し、製品品種毎の研磨レート予測モデルを構築していた。研磨レート予測モデルの形態を製造装置の状態計測値を説明変数とする回帰モデルとした場合、従来の最小 2 乗法によって、履歴データからモデルパラメータである切片と係数を同定することができた。しかし、データ層別による製品品種別の研磨レート予測モデルの構築では、統計的に必要十分な履歴データが蓄積されるまで予測モデルを構築できないという課題があった。また、消耗部材を交換した際に、研磨レートが元の初期状態に復帰しないことがあるのに対して、研磨レート予測値は初期値に復帰してしまうという課題があった。

上記課題を解決する本論文記載の成果を以下にまとめる。

(1) 研磨レート予測モデルを構築するためには、予測モデルの説明変数を選択する必要がある。まず、Wavelet 信号波形弁別により、研磨レート変化と共起性のある消耗部材交換などのイベントを明らかにした。つぎに、研磨レートを目的変数に、CMP 装置関連データを説明変数にした縮退回帰分析を行い、説明変数の複数の候補を抽出した。最後に、グラフィカルモデリングを適用して、説明変数候補相互の相関構造を明らかにして説明変数を選択した。

(2) 消耗部材や製品品種と言った制御対象の個体差に対応して研磨レートを予測するモデルの形態を、従来の回帰モデルからマルチレベルモデルに拡張した。マルチレベル研磨レート予測モデルを構築するために、説明モデル同定ステップと予測モデル同定ステップからなる構築手法を提案した。制御対象の個体差に対応した複数のモデルパラメータを同定するために、共通手続きとして MCMC 法 (Markov chain Monte Carlo methods) を利用したパラメータ同定を行う。具体的には、パラメータ DAG(Directed Acyclic Graph) モデルの設計、階層ベイズモデルへの変換、データ尤度関数の設定、パラメータ事前分布の設定、MCMC サンプリングシミュレーション、事後分布からのパラメータ同定を順に行う。

(3)2 種類の消耗部材であるドレッサとパッドの劣化の影響を同時に受ける CMP プロセスの研磨レートを、消耗部材の使用時間から連続的に予測するモデルを、提案する予測モデルの構築手法を用いて構築した。パッド交換時のエージング(初回目立て)状態をドレッサ使用時間から予測する消耗部材個体差モデルをマルチレベル形態の研磨レート予測モデルに組み込み、その複数の個体差パラメータを確率変数として、製造ラインから収集した小量履歴データを用いて MCMC 法により同時一括で同定した。CMP-APC シミュレーションによって研磨量制御の精度を評価し、提案手法の有効性を検証した。

(4) 消耗部材劣化の影響と、異なる研磨速度を持つ多品種製品の連続投入の影響を同時に受ける CMP プロセスの研磨レートを、消耗部材の使用時間から連続的に予測するモデルを、提案する予測モデルの構築手法を用いて構築した。品種個体差切替モデルを装置消耗部材起因のトレンド変動を予測する品種共通の研磨レート予測モデルに組み込み、その複数の個体差パラメータを確率変数として、製造ラインから収集した多品種小量履歴データを用いて MCMC 法により同時一括で同定した。パラメータ事後分布の分析により、モデル切片にのみ製品品種個体差パラメータを組込めば良いことを明らかにした。CMP-APC シミュレーションによって研磨量制御の精度を評価し、計測遅延外乱にロバストな制御系を構築可能なことを検証した。

以上、玉置研二氏提出の学位論文に述べられている主要技術は、半導体生産工程の高品質化のための基本的要請の一つである CMP-APC を対象として、仮想計測の概念に基づく研磨レートに対する動的・複合的パラメータ回帰手法の構築に関するものである。論文中においては、十分な研究調査・考察に基づく論理的検討によって、有効性の高い手法を提案している。論文審査委員会はこの学位請求内容が技術的価値を有し学術的価値についても学位付与に十分であると判断し、同氏が博士(情報科学)の授与に値するものであることを認める。