

| | |
|---------|---|
| 氏名 | Phaisalpanumas Pipat (タイ) |
| 学位の種類 | 博士 (情報工学) |
| 学位記番号 | 情工博甲第301号 |
| 学位授与の日付 | 平成27年3月25日 |
| 学位授与の条件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 学位論文題目 | Study on Variable Rotation Polishing Method in Chemical Mechanical Polishing (CMPにおける可変回転ポリシング法に関する研究) |
| 論文審査委員 | 主査 准教授 鈴木 恵友 教授 林 英治 // 伊藤 高廣 // 岡本 卓 |

学位論文内容の要旨

本論文ではCMP (Chemical Mechanical Polishing, 化学的機械的研磨) において定盤の回転運動を逆方向に可変する機構を新規に設計製作し、性能検証を行なうことにより、研磨速度の向上とともにドレッシング処理を行わない場合でも研磨速度の低下が抑制可能な可変回転ポリシング法を提案した。従来の研磨法では定盤の回転方向が一定方向であるため、処理間数の増加によりポリシングパッド表面形状が平滑化し、研磨速度が低下する。そのため、研磨速度の低下による生産性の低下や、研磨速度が変動することによる研磨表面のばらつきなど半導体デバイスを製造するうえで深刻な課題が生じてきた。特に近年、半導体デバイスはトランジスタや配線パターン寸法の微細化や、配線の多層化、さらには3次元化などが進行しているため、研磨性能に求められている要求水準はより厳しくなっている。これまで研磨速度を回復させる手段としてドレッシング処理が採用されてきたが、同時にダイヤモンド粒子をウレタン素材のポリシングパッドに擦りつけるため、ポリシングパッド表面が除去されてしまう。このポリシングパッド表面が除去されることにより、研磨処理枚数が増加するに従いポリシングパッド自体の膜厚が薄くなり最終的には下層パッドが表層に露出するため使用不可となる。現時点ではポリシングパッドの寿命は数百枚程度である。ここでポリシングパッドの寿命が短い場合、CMPにおける製造コストは、ポリシングパッド自身が高価な消耗部材であることや交換時にCMPプロセスを停止による製造設備の稼働時間の低下などにより高くなる。そのため、ポリシングパッドの長寿命化に関するこれまでの開発としては、ドレッサの種類や加圧条件、線速度などを最適化することでドレッシング表面の除去量、いわゆるカットレートを低減させる手法が主流であった。しかしながら、これらの方法では、研磨処理によるポリシングパッドの平滑化やダイヤモンド粒子による表面除去などの本質的な問題自体を解決するのではないため、根本的な対策ではない。そこで本研究では定盤の回転運動を逆方向に可変する機構を新規に導入することにより、研磨速度の向上とともにドレッシング処理を行わない場合でも研磨速度を維持可能な可変回転ポリシング法を開発した。本研究では、従来方式では2分程度でも既に研磨速度が低下してしまうのに対して、可変回転ポリシング法の

導入によりドレッシング処理を行わない場合でも10分程度研磨速度が維持できることを確認している。そのため可変回転ポリシング法では、量産装置で再検証をする必要はあるもののポリシングパッドの寿命を4倍程度まで向上させることが可能となる。また本研究では、逆方向における角度依存性についても評価した。ここでは逆方向の角度を0度から360度まで評価しており、角度が増加するにつれて研磨速度が維持できる時間が長くなることを確認した。したがって、今後可変回転ポリシング法の逆方向の回転角度を最適化することによりポリシングパッドの長寿命化が期待できる。

可変回転ポリシング法のもう一つの特長は、従来の研磨法と比較して高い研磨速度が実現可能なことである。高い研磨速度の利点としては、研磨時間を短縮することで生産性を向上し、製造コストを低減することが可能な点である。これまで研磨速度を向上させるためには研磨圧力を高くすることや、ポリシングパッドと被加工面間の相対速度を速くすることが一般的に行われてきた。しかしながら、研磨圧力を高めた場合、ディッシングやエロージョンの問題が発生するため、半導体素子自体の性能低下の原因となる。一方、相対速度を速くした場合、スラリー供給が不十分になりスクラッチや欠陥の誘発など別の問題が生じてくる。そのため、従来法における最適な研磨条件を設定するためには、研磨速度の向上と同時に、ディッシングおよびエロージョン、そしてスクラッチや欠陥の抑制を両立可能な研磨圧力、相対速度を設定するのが必要である。しかしながら、可変回転ポリシング法の場合、同一の研磨圧力や相対速度においても、逆回転の角度が大きくなるにつれ、研磨速度が向上する。具体的には逆回転の回転角が360度の場合、従来と比較して38%まで向上することを確認した。

本論文では、可変回転ポリシング法による研磨速度が向上とドレッシング処理がない状態で研磨速度が維持される原因についても考察した。これらの原因を明らかにするため、CMPにおける材料除去メカニズムに関して理解することは必要であるが、ポリシングパッドと被研磨面の間隔は数 μm 程度、の微少領域で、直接的に材料除去現象を観察することは困難である。したがって、本研究ではウェーハ面内におけるスラリー流れの分布や、スラリー液層厚さの影響、そしてポリシングパッドの表面アスペリティーなど研磨速度に影響すると考えられる因子を抽出し、研磨速度の関係について評価した。

ウェーハ面内におけるスラリー流れの分布の観察については、スラリー流れを可視化するためウェーハの代わりに透明な石英基板を用い、スラリーの代替として蛍光液を用いた。ここでは、定盤中央から蛍光液を滴下し、石英板の上面から紫外線を照射し蛍光を発生させることで、蛍光液が石英基板内に侵入した部分の蛍光を高速度カメラで観察した。研磨装置としてはマルトー製のドクターラップを改造して用いた。改造内容としては研磨装置の加圧部分と高速度カメラの固定角度である。加圧部分の改造内容としては、加圧部分に光を透過させる加工部を増設したことである。研磨装置の加圧機構は真鍮製の錘を採用しているため、石英基板裏面に紫外線や蛍光が透過しない。そのため加工ヘッド部分を円筒状にして、その下部に石英基板を固定した。ここではスラリー流れを観察するため、光ファイバーにより円筒の中まで紫外線を導入した。一方、高速度カメラは専用の角度を製作し、円筒の上側に設置した。ここでは石英基板下面に蛍光液が侵入した際、紫外線励起により発生する蛍光の強度分布を高速度カメラにより取得した。その結果、可変回転ポリシングのほうが高い研磨速度であるにも関わらず、従来の研磨方式のほうが可変回転ポリシングよりスラリー流量分布がより均一

であることを確認した。したがって、一般的にスラリー流量分布が研磨速度に支配的と考えられてきたが、別の要因によって影響されることを確認した。

ここでは研磨方式によりスラリー流量分布に変化が確認されたため、スラリー層厚さに対する影響についても評価した。スラリー液層厚さについては、加工ヘッド上にシリコンウェーハを接着し、シリコン面の高さをレーザ変位計より測定することにより算出した。具体的にはスラリー滴下前後におけるシリコン面の高さの差をスラリー液膜の厚さの値として採用した。その結果、スラリー液層厚さが従来方式では $9\ \mu\text{m}$ であるのに対して、可変回転方式では $8\ \mu\text{m}$ であった。当初、研磨速度が向上した原因として、可変回転ポリシングにおいてはスラリー液層が薄くなることにより、被加工面に対する剪断力の増加を予想していたが、スラリー液膜厚さに大きな変化は見られなかったため主な要因ではないと結論づけた。

そのため、本研究においてはスラリーではなく、ポリシングパッドに着眼した。これまでの研究ではポリシングパッドの接触面積が被加工面の面積に対して数パーセント程度と非常に低いことが報告されている。したがって、ポリシングパッドの表面アスペリティーが研磨速度に支配的と予測し、従来の研磨方法と可変回転ポリシングによる表面アスペリティーの変化について評価した。ポリシングパッドの評価法としては研磨後のポリシングパッドを切り取り、共焦点レーザ顕微鏡でポリシングパッドの表面画像を取得した。その結果、従来の研磨方法ではポリシングパッド表面形状において、研磨時間とともに表面形状が平滑化した。このとき、研磨速度の低下が見られたことからポリシングパッドの平滑化が研磨速度に影響を与えることが確認できた。一方、可変回転ポリシングにおいてはポリシングパッド表面に存在する突起形状が維持されていることが確認できた。ここでは研磨速度が維持されていることからポリシングパッド表面に存在する突起形状が研磨速度に影響していることを明らかにした。可変回転ポリシングにおいてポリシングパッド表面に存在する突起形状が維持する原因としては回転方向がそれぞれ逆方向であるため、表面突起形状が平滑化される前に反対側に回転されることによって突起形状が回転方向に追従して湾曲しているものと考えられる。したがって回転方向を変化させることで、ドレッシング処理を行わなくてもポリシングパッドの表面アスペリティーが維持できることを確認した。

次にポリシングパッド表面における突起形状に関して定量的に評価するため、共焦点レーザ顕微鏡から得られた画像から高さ方向に対するヒストグラムを作成した。従来の研磨法においては、研磨前に観測された $7\ \mu\text{m}$ ～ $15\ \mu\text{m}$ の領域で確認されたブロードなピークが研磨後確認されなかった。一方、可変回転ポリシングにおいては研磨後においてもブロードなピークが確認でき、研磨時間が増加しても大きく変化することはなかった。そのため可変回転ポリシングポリシングパッドにおける表面の突起形状が維持されることを確認した。

学位論文審査の結果の要旨

本論文で開発した可変回転ポリシング法は、CMP (Chemical Mechanical Polishing, 化学的機械的研磨) において定盤の回転運動を逆方向に可変することを特徴としている。本研究では、変回転ポリシング法が従来の研磨方法よりも研磨速度が向上するとともにドレッシング処理を行わない場合でも研磨速度の低下が抑制可能であることなど非常に有意義な結果が得られた。CMPにおける材料除去メカニズムに関しても、従来の研究においてはスラリー中の微粒子や化学的作用に着眼した研究が主流であったが、本研究の着眼点としてはポリシングパッドの表面形状による効果に関して議論がなされており、学術的にも有意義な結果が得られた。

また、本論文に関して、調査委員から可変回転ポリシングにおける材料除去メカニズムに関する考察や、ウェーハサイズが大口径化した場合の問題点、そして、本技術の応用例などについて質問がなされた。これらの質問に対しても、いずれも著者から満足 (明確) な回答が得られた。また、公聴会においても、多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。ここではタイのキングモンクット大学の学部長や複数の教員も参加しており、彼らからも高い評価を受けた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士 (情報工学) の学位に十分値するものであると判断した。