

氏名	橋山 雄一		
学位の種類	博士(情報工学)		
学位記番号	情工博第240号		
学位授与の日付	平成22年3月24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	CMPプロセスの材料除去メカニズムにおけるスラリーの基本的機能に関する研究		
論文審査委員	主査	教授	木村 景一
			〃 檜原 弘之
			〃 鈴木 裕
	荏原製作所		檜山 浩國

学位論文内容の要旨

本論文は、超 LSI 製造プロセスにおける平坦化技術である CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術における材料除去メカニズムに関する研究である。CMP 技術は超 LSI の製造プロセスに広く適用されているが、1990 年代の開発当初から超 LSI 生産工程における応用に重点が置かれ、材料除去メカニズムに関する研究は行われてこなかったため、その材料除去メカニズムについては不明の点が多かった。本研究の特徴は、これまで広く受け入れられていた機械的作用による材料除去メカニズムを否定し、スラリー中の微粒子による原子オーダーの化学的凝着作用により材料除去が進行するという材料除去メカニズムの新しい概念を、実験を主体に明らかにした点にある。

第1章では、超 LSI の微細化、高集積化を達成するために、プロセス中でのウエハ表面の平坦化の必要性について述べた。

第2章では、従来の CMP における材料除去メカニズムの考え方を列挙し、それぞれの特徴、および問題点を指摘した。従来の材料除去の考え方はスラリー中の化学成分によりウエハ表面に形成された酸化膜、水酸化膜などの化学反応膜にスラリー中の微粒子がポリシングパッド凸部のバックアップにより食い込み、引っ掻き、すなわち微小切削作用により材料除去が進行すると考えられていた。しかしながら、ナノサイズの粒子である CMP 用スラリーの微粒子は化学的反応性の極めて高い物質であり、単に機械的引っ掻き作用による材料除去作用によるばかりではなく、化学的反応性が材料除去メカニズムに重要な要因であると考えられるが、その点を考慮した考え方は示されていなかった。ここでは、スラリー中の研磨粒子の反応性を考慮した材料除去メカニズムについて実験的に検証を行う必要性について述べた。

第3章では研磨粒子がウエハ表面に作用するために重要な要素であるスラリーの流れについて検討した。スラリーの流れを可視化し、定性的な評価を行った。実験結果からスラリーは溝形状のないフラットパッドよりも溝形状を有する格子ピッチ 15mm の P15 格子溝パッドがウエハ面下へと流入しやすいことがわかった。また、フラットパッドと P15 格子溝パッドを使用した研磨実験の結果からは P15 格子溝パッドが研磨レートが高いことから、溝形状を有するパッドは作用粒子数を増大させ、研磨レートを向上させていると考えられる。

第4章ではスラリー中の研磨粒子の分布状態について観察および考察を行った。スラリー中の研磨粒子は溶液中で電気二重層構造を形成し、コロイド状となってスラリー中に均一に分散していると考えられている。そこで、実際に均一に分散しているか原子間力顕微鏡を用いて観察を試みた。SiO₂ 基板上にスラリーを滴下し、直後に粒子の配列状態を観察した。観察の結果と研磨粒子分布の考察から研磨粒子は液中に稠密状態で分散していることが推測できた。

第5章では CMP の材料除去メカニズムに対してスラリー中の研磨粒子がどのように作用しているかを考えるために、(1) 研磨粒子がウエハ表面の原子と結合しその結合した原子をウエハ表面から除去していくという分子動力学シミュレーションを基礎とした考え方、(2) ガラス研磨中の化学反応論

から研磨粒子によるウェハ表面物質の材料除去を考えた L. M. Cook の考え方、(3) 摩耗現象における凝着摩耗、の 3 つの考え方を示し、それらを基礎として CMP 中の材料除去メカニズムを考察した。スラリー中の研磨粒子がウェハ表面と接触し、両者の間に働く凝着力によりウェハ表面物質が強固に研磨粒子表面に凝着し、除去が発生していると推測し、その凝着除去現象のモデルを提案した。

第 6 章では原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた実験を行い、CMP 中の研磨粒子とウェハ表面の状態を調べた。原子間力顕微鏡で使用する探針の先端半径は SiO_2 -CMP で使用される研磨粒子とほぼ同じ大きさであることから、探針先端を研磨粒子と考え、材料除去の模擬的な実験を行った。探針先端とウェハ表面との間に働く力を測定できるフォースカープ測定から研磨粒子とウェハ表面との間に働く力とウェハ表面の化学反応層のヤング率を調べた。実験結果から、液中では探針先端がウェハ表面へと吸着され、結合する現象が観察でき、吸着力よりも結合力の方が強いことがわかった。また、化学反応層のヤング率は液中で低下しており、アルカリ性溶液中ではさらに軟化していることがわかった。次に探針先端を押し込む実験を実施し、探針先端を研磨粒子と見立て第 5 章で示した凝着除去現象が発生しているか調べた。実験結果から探針先端へウェハ表面の物質が凝着により付着していることがわかった。これらの結果から、スラリー中の研磨粒子は原子間結合力が弱まっている軟質なウェハ表面に吸着し、結合した後、凝着作用によりウェハ表面の材料を除去すると考えられる。

第 7 章では実際に CMP を行った後、スラリー中の研磨粒子の変化を観察した。粒径計測の結果と TEM の観察結果から、研磨後の粒子径が大きくなることがわかった。また、微小凹凸を持つマイクロパターンパッドを使用した研磨結果から、研磨レートを向上させるためには研磨粒子がウェハへと凝着しウェハ表面物質を除去する作用を促進することが重要であることがわかった。

第 8 章では第 3 章～第 7 章の詳細な検討から明らかとなったスラリーの流れと材料除去メカニズムの関係、実験によりスラリー中の化学成分によるウェハ表面の軟化とスラリー中の研磨粒子がウェハ表面原子を凝着除去することを確認し CMP の材料除去メカニズムの考え方を提案し、本論文の結論とした。

これらの実験に基づき、本論文で明らかになった層間絶縁膜材料に対する CMP プロセスの材料除去メカニズムは、およそ次の通りである。

- (a) 層間絶縁膜 (SiO_2 系誘電体材料) の CMP プロセスにおいて、ウェハとポリシングパッドが形成する微小厚空間にスラリーが流入し、スラリー中の化学成分によりウェハ表面に化学反応層 ($\text{Si}(\text{OH})_4$ のような水和層など) が形成される。
- (b) 水和層などの化学反応層はバルク材料と比較して分子間結合力が低下した軟質層であり、そこにスラリー中の微粒子 (SiO_2 / 粒径 20-80 nm) がスラリー流れにより衝突、接触、さらに転動し、流体の流れによる外力により離脱する。
- (c) 原子間結合力が低下したウェハ表面に微粒子が接触すると、微粒子が持つ凝着力によりウェハ表面の分子を微粒子表面に吸着し、ウェハ表面の分子を除去する。
- (d) これらの材料除去メカニズムを確認するため、 SiO_2 膜を形成したシリコンウェハに対しポリシング実験を行い、そのときに採取したスラリー中の SiO_2 微粒子を TEM により観察した。その結果、スラリー中の微粒子直径は大きくなり、粒径分布のピーク値は数 10nm 大きい方向にシフトした。この結果は、スラリー中の粒子は凝着作用によりウェハ表面の原子を吸着し直径が大きくなることを示していると考えられる。これらの実験の結果を総合し、スラリー中の微粒子の凝着作用に基づく CMP の新しい材料除去メカニズムを提案することができた。
- (e) この研究成果は、国内学会 10 件、国際会議 4 件において報告され、また、和文論文 1 編、英文論文 2 編が報告されている。

学位論文審査の結果の要旨

本論文に関し、調査委員から発表資料で示された解析と実験結果との関係、再現性の問題などについて質問がなされたが、いずれも著者から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、著者の説明によって質問者

の理解を得られた。

以上により、論文調査およ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と判断した。