

超 LSI デバイスウェハの平坦化 CMP に関する研究

— スラリーフリーCMP の可能性 —

Study on Planarization CMP Technology for ULSI Device Wafers

— The Possibility of Abrasive Free CMP —

小林俊裕*、多 久智*、丸川隆文*、土肥俊郎**

Toshihiro Kobayashi* Hisatomo Ohno* Takabumi Marukawa* Toshiroh K. Doy**

*日本マイクロコーティング株式会社、**埼玉大学 教育学部

*Nihon Micro Coating Co., Ltd.

**Faculty of Education, Saitama University

[概 要]

超 LSI デバイスの平坦化技術として CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術の重要性は年々高まってきている。従来の平坦化 CMP プロセスでは硬質のポリウレタンからなる研磨パッド上に研磨砥粒を含む研磨液(スラリー)を流し、被研磨物と研磨パッドを相対運動させることにより平坦化 CMP をおこなっている。しかし、従来の CMP プロセスには解決すべき点があり、また今後の加工精度の要求事項への対応が困難であるといった問題がある。この問題を解決するため新しい平坦化 CMP プロセスとして固定砥粒方式の平坦化 CMP が注目を浴びている。

本研究では、固定砥粒による平坦化 CMP を実現すべく、従来の研磨パッドとは全く異なった、極細繊維からなる織物の研磨パッドの考案・試作を行ない、同パッドを用いて研磨パッドにも研磨液にも砥粒を使用しないで研磨を行なうクーラント方式 CMP の可能性と CMP 特性の把握・評価を行なった。その結果、Cu-CMP においては研磨パッドにも研磨液にも砥粒を使用しないクーラント方式 CMP 実現の見通しを得た。ただし、SiO₂-CMP では必ずしも満足する結果が得られているわけではなく、今後の検討課題である。

Key Word : 平坦化 CMP、Cu-CMP、SiO₂-CMP、固定砥粒、アブレッシブフリー、スラリー、均一性、織物パッド、プラナリゼーション、クーラント方式 CMP(完全アブレッシブフリーCMP)、

1. はじめに

高集積化・微細化が進んでいる超 LSI 半導体デバイスにおいて、平坦化プロセスは不可欠であり非常に重要となっている。とくに化学的機械的研磨加工方法(Chemical Mechanical Polishing: CMP)は、層間絶縁膜のみならず、メタル配線、素子分離にも応用されその需要はますます広まっている¹⁾。またデバイス製造に要求される項目は年々増加し、かつ厳しいものとなっておりこの要求を達成す

るため、新しいプロセスが提案及び検討されている。平坦化 CMP については、化学的作用と機械的作用をバランスよく使いこなす必要があり、現在新しいプロセスとしてスラリーフリーの CMP が注目を浴びている。

従来の CMP では、スラリー中の化学成分が被研磨対象物と反応し、表面の改質もしくは軟化を御し、同時にスラリー中のシリカやアルミナ、セリアのような研磨砥粒が研磨パッド表面に形成された微細な空孔に捕らえられ、被研磨物表面との物理的に作用することによって、研磨が進行していると考えられている。

従来の平坦化 CMP において、微細な空孔を有する発泡性の現状の研磨パッドを用いた場合、加工屑、スラリーなどによる目詰まりにより研磨レートの低下が生じる。そのため、ドレッシングと呼ばれる目立てによって目詰まり部分を削り取る作業が行なわれる。また、一般的に半導体ウェハなどの研磨に用いる研磨パッドには発泡ポリウレタンが多用され、ドレッシング用の工具にはダイヤモンド砥粒を金属製のプレートに電着させた治具（ダイヤモンドドレッサー）が使用される。ドレッシングの際、一般的に研磨パッドの強度が局所的に弱くなっている部位があるといわれており、そのため均一なドレッシングが困難である。またダイヤモンド砥粒の脱粒により、ドレッシング後の研磨加工において被研磨物に致命的なスクラッチ（加工傷）が発生することが大きな問題となっている。

以上、従来の平坦化 CMP プロセスと問題点を指摘した。これらの問題を解決すべく LSI デバイスの配線の微細化、及びデバイス配線の複雑化への対応、プロセスコストの低減などをねらい、新たな CMP 方式及び条件が提唱されている。特にスラリーフリー CMP 方式は、廃液処理の容易性、環境及びコストにおける優位性、また、加工精度の向上の観点から注目すべき CMP 法といえる。

そこで本研究では、多くの長所を秘めている平坦化 CMP としてスラリーフリー CMP 法に着目し、次世代 CMP 技術の可能性を検討したので以下報告する。

2. スラリーフリー CMP と本研究のねらい

まずスラリーフリー CMP について整理すれば、次の 2 つの方法に大別できる。一つは、シリカやアルミナ、セリアといった研磨砥粒を樹脂バインダーで固定化したものである。これは、テープ状またはシート状に成型したパッドであって、研磨砥粒を含まない研磨液（クーラント）を供給しつつ研磨を行なうアブレッシブフリー方式の CMP である。もう一つは研磨液、研磨パッドの両者に研磨砥粒を使用しないで行なう完全アブレッシブフリー方式の CMP である。

本論文では、アブレッシブフリー CMP と完全アブレッシブフリー CMP を明確に区別するため、前者を固定砥粒方式 CMP、後者をクーラント方式 CMP と呼ぶこととし、以下整理・詳述する。

2.1 スラリーフリー CMP の分類

（1）固定砥粒方式 CMP（アブレッシブフリー CMP）

もっとも一般的で導入が容易なプロセスとしては、シリカ等の研磨砥粒をウレタン樹脂等に混合し、パッド状に成型したものをを用いる方式である。この場合、研磨パッド内には、研磨砥粒がスラリー時と同じ程度の高い分散状態で存在している必要があり、また研磨中に砥粒の脱粒等が発生すること

により、スクラッチが発生する可能性があることを留意する必要がある。また、ある程度研磨が進行し研磨パッドに目詰まり等が発生した場合は、前述のダイヤモンド砥粒からなるドレッサーによってパッド表面のコンディショニングを施す必要がある。

この固定砥粒方式 CMP については、2000 年 8 月に開催されたシンポジウムで(株)ノリタケカンパニーリミテッドより発表があった²⁾。同発表によると、研磨砥粒を発泡ポリウレタンパッド内に含浸させた研磨パッド(砥粒含浸パッド)を用いることにより、実質的に研磨パッド自体の硬度が従来品より高められている。また、研磨砥粒を含む研磨液(スラリー)と組み合わせることで従来の発泡ポリウレタンパッドの 5 倍ほどの研磨レートを実現している。しかし、砥粒を含まない研磨液(クーラント)のみで平坦化 CMP 加工を行なった場合、従来の発泡ポリウレタンパッドとスラリーとの組み合わせほどの研磨レートが得られていない。この種の砥粒含浸パッドを使用することにより、スラリーの使用量自体を減少させることは可能であると推測されるが、本研究でねらいとする高品位、高能率化を実現することは困難である。

(2) クーラント方式 CMP(完全アブレッシブフリーCMP)

本方式は、研磨液にも、研磨パッドにも研磨砥粒を含まない方式である。従来の平坦化 CMP は、スラリー中の化学成分による化学的作用と研磨砥粒による機械的作用の重畳作用によって研磨が進行すると考えられている³⁾。従って、いっさい砥粒を含まないクーラント方式 CMP において、研磨砥粒の役割を果すのは研磨パッドによる機械的作用である。

研磨砥粒を用いない、いわゆるクーラント方式による研磨に関して、2000 年 8 月のシンポジウムで日立製作所より報告があった³⁾。同発表は、Cu-CMP において酸化剤、防食剤、溶解剤からなる研磨砥粒を含まない研磨液(クーラント)を用いて、酸化、防食、溶解を順次繰り返すメカニズムにより研磨が進行していくというものである。また、このほかにも Cu 表面を酸化させたあと、容易に除去可能な錯体を生成し、それを研磨パッドで研磨していくという方法もある⁴⁾。なおこれらの報告では、研磨パッドとして硬質の発泡ポリウレタンパッドを使用しているため、反応生成物などによる目詰まり現象に起因する加工特性の不安定性、あるいはドレッシング時におけるダイヤモンド砥粒の脱粒等によるスクラッチの発生等の問題点を回避することはできない。

2. 2. クーラント方式 CMP(完全アブレッシブフリーCMP)の提案

これまで報告されている固定砥粒方式 CMP ならびにクーラント方式 CMP は、新しいプロセスとして注目されているが、とくに性能、コストの観点から両者を比較すればクーラント方式 CMP の方が多くの利点があると思われる。

そのため本研究では、性能及びコストの観点で優位なクーラント方式 CMP(完全アブレッシブフリーCMP)を可能とする新しいコンセプトの研磨パッドの考案・試作を行なった。

基本的に、クーラントのみで研磨が可能となる研磨パッドに求められる条件としては、①研磨パッド自体にクーラント(スラリー)を保持する層を有すること、②研磨パッドが研磨砥粒の機械的作用と同等の力で被研磨物に対し有効な加工作用を実現することである。

この二点を満たすことを基本方針として、特殊繊維から成る織物構造をした研磨パッド(以下 織

物パッド)を考案・作製した。図1に、本研究で試作した織物パッドを走査型電子顕微鏡 (Scanning Electronic Microscope : SEM)により観察した表面写真を示す。本研究では、この試作パッドを用いて CMP 特性を把握・評価をした。

なお、本研究では次世代 LSI デバイス配線材料の主流となる低抵抗 Cu 膜に対しての研磨特性、及び層間絶縁膜、もしくは STI(Shallow Trench Isolation)として用いられる SiO₂ 膜に対しての研磨特性について評価した。

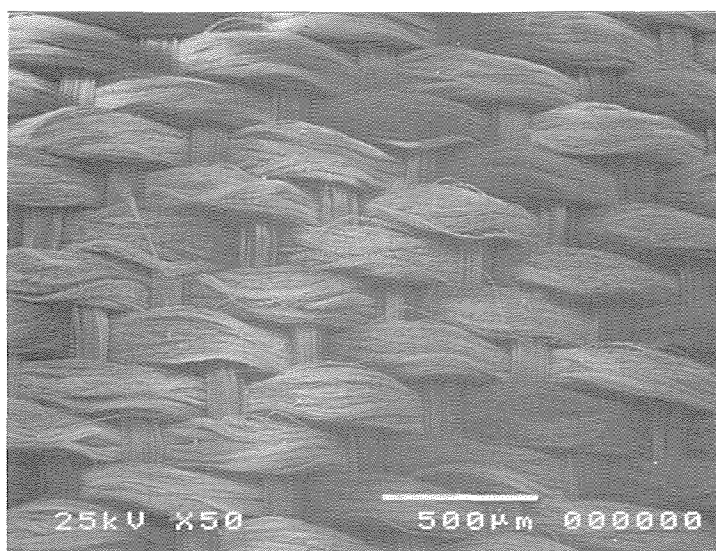


図1 織物パッドの表面 SEM 写真

3. 実験方法と評価方法

被研磨対象物には、Cu 膜及び SiO₂ 膜を取り上げた。Cu 膜は $\phi 8"$ シリコンウェハ上にシリコン酸化膜(SiO₂ 膜)を堆積させたあと、拡散防止膜(バリアメタル)であるタンタル膜を堆積、さらにその上に 800nm の Cu 膜をスパッタリングで堆積させたものである。一方、SiO₂ 膜は、 $\phi 8"$ シリコンウェハ上に P-TEOS 法にて厚さ 1500nm で SiO₂ を堆積させた。CMP 装置には Presi 社製 MECAPOL E550(定盤サイズ 550mm)を使用した。Cu-CMP に用いる際のスラリーとしては、(株)東芝より発表のあったキナルジン酸を用いたスラリー⁵⁾を使用した。また、研磨に用いるクーラントとしては同発表におけるスラリーから研磨砥粒

を除去して使用した。SiO₂ 膜の研磨には、現在弊社で開発中の CMP 用高純度セリアを用いたスラリーを使用した。

表1に、適用した加工条件をまとめて示す。

CMP 特性の比較のために、Cu-CMP、SiO₂-CMP においてもっとも一般的と思われる Rodel 社製の研磨パッド(商品名: IC1000)を用いた。一方、Cu 膜の膜厚測定は、国際電気アルファ(株)製4探針式抵抗測定器 VR-120A を使用し、SiO₂ 膜の膜厚測定は SENTECH 社製分光エリプソメーター(SE 800)を用いた。Cu 膜、ならびに SiO₂ 膜ともに表面粗の加工面の測定に

表1 CMP 研磨条件

CMP 装置	Presi MECAPOL E550	
試料	Cu 膜(800nm)	SiO ₂ 膜(1500nm)
スラリー	キナルジン酸 スラリー	高純度酸化 セリウムスラリー
クーラント	キナルジン酸 クーラント	
研磨パッド	織物パッド(図1 参照)	
	IC1000	
研磨圧力	300g/cm ²	
研磨定盤回転数	40rpm	
ワークホルダー回転数	40rpm	
スラリー流量	250ml/min	
研磨時間	60sec	

は、Digital Instruments 社原子間力顕微鏡 (Atomic Forced Microscope: AFM) Dimension3100 を使用した。

4. 実験結果とその考察

図 2 に、Cu-CMP における各種研磨パッドによる研磨レートを示す。

砥粒が含まれているキナルジン酸スラリーを利用した場合、織物パッドは、IC1000 と比較したときに 3 倍ほどの高い研磨レートを示している。また、IC1000 とスラリー、織物パッドとクーラントの組み合わせについて研磨レートを比較すると、IC1000 と織物パッドでは同等の研磨レートを有していることがわかる。これは、前述したようにクーラントまたはスラリーに含まれる化学成分が、Cu 表面に酸化層を形成し、また、その後錯体生成剤により容易に除去可能な錯体が形成され、それを織物パッドにより除去していくためと思われる。織物パッドにおいて、スラリーとクーラントでは 3 倍ほど研磨レートに違いがあることから、特殊構造から成る織物パッドはスラリー中の砥粒を効率よく保持していることがわかる。

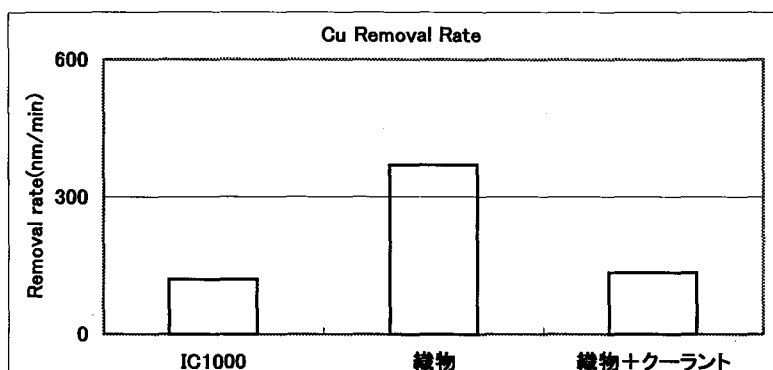


図 2 各種パッドによる Cu 研磨レートの比較

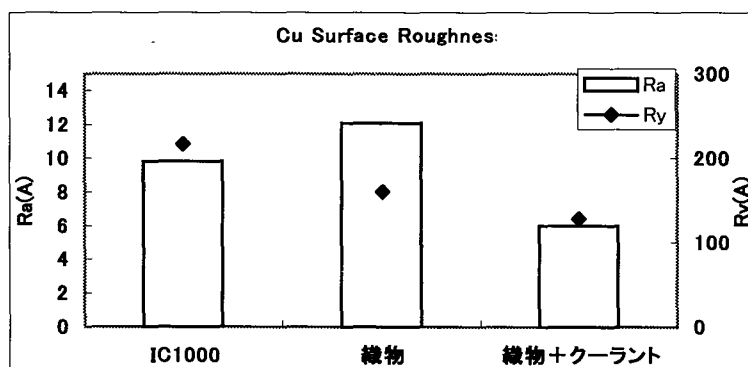


図 3 各種パッドによる Cu 加工面の表面粗さの比較

クーラント方式 CMP においても、織物パッドは、図 1 に示したような特殊構造から成るため、被研磨物との接触面積が大きくなり、その結果、IC1000 とスラリーの組み合わせよりも高い研磨レートを得ることができると推測する。

図 3 に同研磨における表面粗さ (Ra) および最大表面粗さ (Ry) の比較を示す。スラリー使用時、表面粗さ (Ra) において織物パッドの方が IC1000 より若干高い値を示しているが、最大表面粗さ (Ry) では、IC1000 よりも織物パッドの方が低い値を示している。織物パッドとクーラントを組み合わせした場合、Ra、Ry とともに低い値を示していることがわかる。光学系表面観察計によるマクロな観察、ならびに原子間力顕微鏡によるミクロな観察から、織物パッドによる加工面には、IC1000 による加工面と比較すると、スクラッチ等の少ない良好な研磨面が得られることを確認している。

図 4 には SiO₂ 膜における各種研磨パッドを用いた時の研磨レートの比較を示す。織物パッドを用

いた場合では、IC1000 を用いた場合と比較して 1.5 倍ほどの研磨レートが得られていることがわかる。

図 5 に、同研磨における表面粗さ (R_a) および最大表面粗さ (R_y) の比較を示す。 SiO_2 膜研磨時、IC1000 パッドと織物パッドを比較すると、 R_a においては同等のレベルであるが、(R_y) については、IC1000 パッドより織物パッドの方が若干ではあるが高い値を示していることがわかる。

本研究では SiO_2 膜に関しては、スラリーフリーCMP の実現にまでは至っていないが、従来品の IC1000 パッドに比べて高い研磨レートを有することから、今後のスラリーフリーCMP の実現に向けて大きく前進したと考えている。

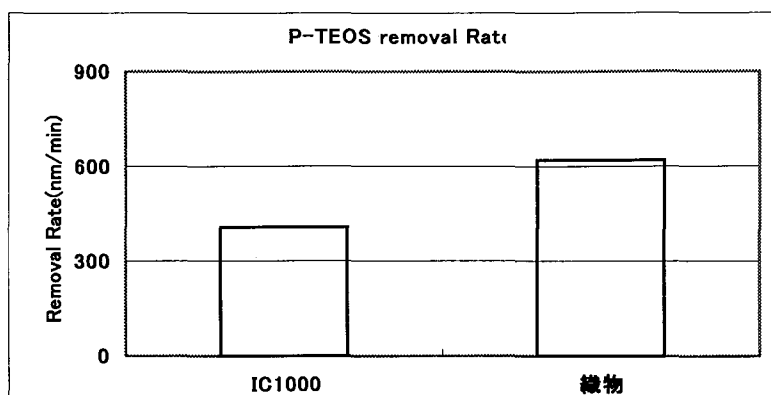


図 4 SiO_2 膜の研磨レートの比較

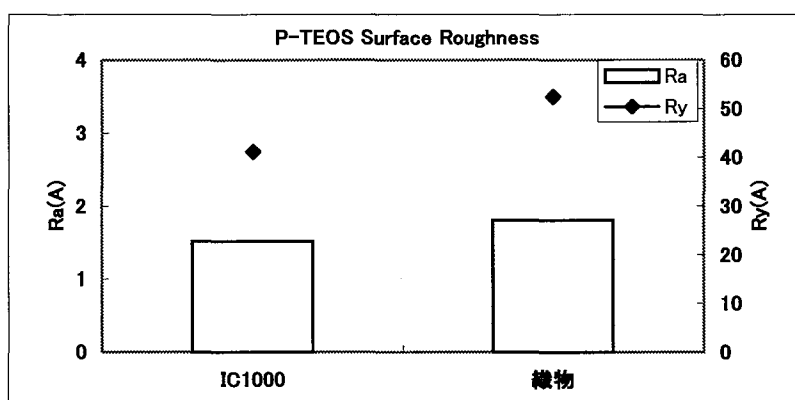


図 5 表面粗さ

5. むすび

本研究では、LSI デバイスにおける配線メタル用 Cu 膜および層間絶縁膜・STI 用 SiO_2 膜を加工対象として、試作した特殊構造の織物パッドによるスラリーフリーCMPの可能性について検討した。

一般的に、研磨進行後の研磨パッドの目詰まり時には、パッドのコンディショニングが必要であり、例えば Rodel 社の IC1000 のように硬質な発泡ポリウレタンからなる研磨パッドを用いたときには、ダイヤモンドドレッサーを使用する。これに対して本研究で開発した織物パッドでは、ダイヤモンドドレッサーを使用する必要はなく、代わりに超高圧マイクロジェット(旭サナック(株))のような装置を用いることにより、研磨パッドの洗浄、目詰まりの解消ができるという利点がある。従って、従来品の IC1000 で問題となっていたダイヤモンドドレッサーから脱粒したダイヤモンド粉末によるスクラッチ発生の心配がなく、研磨パッドへのコンタミネーションも防ぐことが可能である。

本織物パッドは反物(ロール状)で製造され、なお且つベースシートの厚み、硬さ種類などを自由に選択できるため、一般的な装置である米国アプライドマテリアルズ社の“MIRRA”のような回転定盤方式の CMP 装置のほか、ラム・リサーチのベルト状の研磨布パッドを使用する方式の CMP 装置、またアプライドマテリアルズ社(旧オブシディアン社)のロール状の研磨布を使用するような次世代 CMP 装置への適用も可能である。

本研究により、効果的クーラント方式 CMP 実用化の可能性を見出したが、クリアすべき多くの課題が存在する。本研究では、Cu 膜単体、および SiO₂ 膜単体からなるウェハを使用して確認実験を行なったが、実際の半導体デバイスウェハには、さまざまなライン&スペースで複雑に配線が形成されており、それらを研磨した際の配線部分と酸化膜との選択比、またディッシング、エロージョン等の問題も今後議論していく必要がある。

アブレッシブ(研磨砥粒)が必要か必要でないかは、必ずしも現段階では確定できない。今後のデバイスの微細化や高密度化に対応した技術として、このアブレッシブフリーCMP というプロセスを実現すべく詳細に検討していく。

・[謝辞]

本研究を進めるに当たり、日本マイクロコーティング(株)の泉敏裕氏はじめ関係者の方々、ならびに埼玉大学教育学部土肥研究室の方々に深く感謝いたします。

—参考文献—

- 1) 宮本ら:2000 年度精密工学会秋季大会 学術講演論文集「ULSI における CMP とその応用技術」(2000 年 10 月、精密工学会)、p.1
土肥:詳説・半導体CMP技術、工業調査会(2001)p.353
- 2) 石黒ら: CMP 技術の基礎と実例講座シリーズ第 12 回 CMP 用スラリーの新展開「ノリタケカンパニーにおける固定砥粒ポリシングと同用スラリー」(2000 年 8 月、グローバルネット),p.3-2-1
- 3) 近藤ら: CMP 技術の基礎と実例講座シリーズ第 12 回 CMP 用スラリーの新展開「アブレッシブレスラリーの開発」(2000 年 8 月、グローバルネット),p.3-1-1
- 4) 丸川ら:月刊 トライボロジ、No.159「半導体分野の研磨技術における最新動向」(2000 年 11 月、新樹社),p.20
- 5) 斎藤ら:精密工学会 プラナリゼーション CMP 応用専門委員会 第 13 回研究会資料「Cu 配線用バリアメタルの性質とその CMP 技術」(2000 年 4 月、精密工学会),p.39