パターン平坦化研磨プロセスの評価技術*

原 徹**

Evaluation of Pattern Planarization Polishing Process / Tohru HARA

Key words: LSI, evaluation, pattern, planarization, AFM, polishing

1. は し が き

1960年代に開発され、1970年代にはすでに製造技術として実用の域に達したシリコンウエハ表面の低ダメージケモメカニカル研磨技術は、VLSI パターンの平坦化研磨プロセス (PPPP: Pattern planarization polishing process), 通称 CMP 技術として新たな展開を見せた。特に超 LSI では必須な平坦化プロセスと考えられ、アメリカではこの平坦化プロセスがマイクロプロセッサ、ロジック IC の生産に広く用いている。アメリカの DRAM メーカーではこの平坦化プロセスをすでに生産に用いており、韓国のデバイスメーカーもこれに続こうとしている。

配線用金属膜と酸化膜の平坦化にはコンフォーマリティの優れた CVD (化学気相反応) 技術と SOG (Spin on glass) が併用されてきた。しかしパターン寸法の更なる縮小、低誘電率酸化膜の採用に伴いこれらの平坦化技術の限界が見え、選択的なパターン平坦化研磨プロセスの採用が必要となっている。

現在までにパターン平坦化研磨プロセスに関する多くの報告があるが、研磨、研磨機、スラリーなどの研磨技術に関するものが多い。研磨されたウエハのパターン上での評価がこのプロセスでは重要であるが、報告例はごく少ない。本報告では乏しい報告、データの中から、パターンを形成したウエハに対する評価方法を中心に述べる。

2. パターン平坦化研磨プロセス (PPPP, 通称 CMP 技術) の現状

パターンの微細化に伴い、パターン平坦化研磨プロセス (PPPP) の重要性はますます高まってきた。このプロセスはシリコンウエハ表面をダメージを導入せず、鏡面に研磨する従来のケモメカニカルポリッシュとは目的要求が異なり、区別することが必要である。この平坦化研磨プロセスは大別して2つのプロセスに分けられる。第一のプロセスは主に $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のパターンで実用化されている酸化膜研磨平坦化プロセスである。平坦化研磨プロセスが重要となる微細化デバイスでは、デバイスの速度が配線間容量により決定され、この低減のため F を添加した CVD PSG 膜や、有機 SOG などの低誘電率酸化膜の選択研磨が必要となる。低誘電率有機 SOG 膜は現用の膜と異なり、フローが容易に生じないため、更に研磨による平坦化が必要となる。しかし研磨時の膜の吸湿が問題とされ、新たな低誘電率 SOG 材料の開発が待たれている。第二の研磨プロセスはこの逆に、酸化膜上に堆積した配線膜、通常スパッタ Al 膜、CVD W 膜、ポリシリコン膜、銅膜などの研磨を酸化膜と同一レベルまで進め、平坦化を図るプロセスで、第一の研磨プロセスに比べ実用上問題が多い。

このプロセスとして、最近にわかに脚光を浴びて来たのが、銅配線に対する平坦化研磨プロセスダマシンで、マイクロプロセッサの配線として実用化に近い。銅配線はエレクトロマイグレーション特性が特にすぐれ、配線抵抗が低いいため、理想的な配線材料として注目されてきた。しかし微細パターンのエッチングが困難で、この配線が必要なアスペクト比の大きなコンタクトコンフォーマリティ良く堆積ができる CVD バリア膜堆積技術が確立されていないなど、実用化にはほど遠かった。しかし、このプロセスは銅配線に対するダマシンプロセス適用により実用化の運びと

* 原稿受付 平成8年2月13日

** 法政大学工学部 (小金井市梶野町 3-7-2)
早稲田大学第一理工学部電子通信学科卒、理学博士。研究内容: 半導体プロセス、特に配線、コンタクト、SOI。著書: 半導体工学 (オーム社)、化合物半導体 (工業調査会)、超 LSI 設計入門 (産業図書)、超 LSI プロセスデータハンドブック (サイエンスフォーラム) など計 12 冊

なった。現在この銅配線ではスパッタ法により堆積された Ta や TaN などのバリア膜が用いられ、銅配線のみを CVD 法で行っても無意味である。このため、銅配線膜の堆積はスパッタまたはめっき法により行われている。

3. 研磨ウエハの評価技術

3.1 ウエハの厚さ、反りの測定

実際にパターンが形成されたウエハの厚さ、反り、研磨された膜の厚さ、平坦性をグローバルに測定することが必要である。通常シリコンウエハではフリーに放置された状態でのウエハの反りを光学的に、または接触式法でエッジファースト、センタファーストとして評価している。しかし平坦化研磨プロセスでは研磨後のウエハの反りではなく、研磨時の研磨機内でのウエハのグローバルな平坦性の維持と評価が重要である。実際の研磨時の評価が可能になると、研磨条件、例えば圧力、研磨速度、スラリーの供給条件、パッドなどの最適化を図り平坦性を確保することができ、このようなモニタ法の実現が望まれている。

特に当初 $600\text{ }\mu\text{m}\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ の厚さを有し、反りがあるシリコンウエハの表面を研磨、これらのばらつきに比べはるかに小さな 100 nm 程度の酸化膜と金属のステップを均一に研磨するのは容易でない。

3.2 終点検出

従来の半導体プロセスでは十分確立された技術とされてきた終点検出技術はここで述べている平坦化研磨プロセスでは、特に重要な技術とされ、有用な検出方法の開発が待たれている。グローバルな終点検出法として研磨機のモータ電流によるモニタ法が知られている。研磨機のモータ電流の時間変化からデジタルフィルタを用い、高周波電流を除去、終点検出を行う方法である。現在酸化膜、窒化膜、メタルなどの研磨の終点検出として広く用いられている。しかし研磨時のウエハに反りがあると、オーバエッチされる領域と、アンダエッチの領域からの電流が複雑にこの電流に影響を与え、終点検出を精度よく行えない。

この終点検出を光学的に行う方法がある。単色光をウエハ表面に照射し、膜/基板界面で生じる光の反射強度、位相シフトから終点を検出する方法である。しかし微細パターンを形成したウエハの終点検出には問題がある。フォーカスビームエリプソメータを用い入射角度、照射波長の変化により、複雑な構造の多層膜に対し、終点検出、酸化膜のエッチング厚さ、表面粗さ、工学定数の測定が可能で、この方法による SiN 膜上のポリシリコン膜、W/Ti/TiN/Si 構造の終点検出の例が報告されている。

3.3 表面観察

研磨したシリコンウエハ表面粗さは探針式と光学式により測定されている。探針式はウエハ表面の観測ばかりでな

表1 モノクロ TRXRF 法によるシリコンウエハ表面の不純物検出感度

元 素	Cr	Fe	Ni	Cu
検出感度 ($10^9/\text{cm}^2$)	9.2	7.8	6.4	3.7

く、プロセスでパターンが形成されたウエハで膜厚、段差の測定を精度よく、容易に行えるが、接触式であるため制約があり、テストウエハを用いた測定が必要となる。このため、非接触式測定である光学的反射法も用いられている。この測定では厚さ方向で高い分解能が得られ、ウエハ表面の粗さ測定に有用であるが、横方向の分解能が $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度で、微細パターンウエハ面方向の測定には限界がある。

この研磨により膜の表面に導入されたスクラッチ、ビットなどは光学顕微鏡や SEM などによって観察されている。

研磨された膜の表面に付着したパーティクルの観測は通常の半導体レーザ光の散乱を用いたパーティクルカウンタが用いられる。膜表面のパーティクル観測は浅い角度でのビーム入射により $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下のパーティクルまで測定ができるが、微細パターン上でのパーティクル測定では $0.2\text{ }\mu\text{m}$ までの測定が限界とされる。

3.4 表面汚染

この研磨プロセスで用いたスラリーやパッドから、さらには研磨後のブラッシュ洗浄によるウエハ表面の汚染が深刻な問題とされモニタが管理上必要である。ウエハ表面に残留する不純物の解析は検出感度が特に高い全反射式蛍光 X 線解析法により行われている。この検出装置では LiF モノクロメータにより得られた X 線ビームをウエハ表面に臨界角度以下の浅い角度で入射、全反射条件を実現することにより、低いバックグラウンドレベルで、高感度の不純物測定が可能となる。この全反射式蛍光 X 線によるシリコン表面での測定では不純物検出感度として表 1 に示す 10^9 atoms/cm^2 オーダが得られ、他の不純物検出法に比べ著しく高感度である。この測定では 8 インチのプロセスウエハをそのまま非破壊、非接触で測定できる装置が市販されており、特別な試料の準備が不要である。しかしこの測定に用いられる X 線の照射スポット寸法が最小で 0.1 mm で、パターン上での不純物測定には問題がある。

ウエハ表面の洗浄に用いたブラッシュからの汚染の観測を洗浄液中に含まれるパーティクル数をレーザパーティクルカウンタにより観測する。この研磨後のウエハ表面の洗浄にはブラッシュからの汚染がないアイススクラバ洗浄法も注目され、すでに実用化されている。

3.5 研磨ダメージ

この表面研磨されたシリコンウエハや、酸化膜、金属膜表面にはほとんどダメージは導入されないと考えられてき

図1 酸化膜 (PE CVD) の CMP 後の表面の AFM 写真 (研磨時間 2 分間)

た。しかしシリコンウエハに対する少数キャリアライフタイム, PAD (Photo-acoustic displacement) 法による高感度ダメージ測定の結果, この低ダメージ研磨によっても, 結晶表面にダメージが導入されることを明らかにされている。研磨された金属および酸化膜表面にもダメージとひずみが導入されることが予測される。

3.6 パターン表面での観察

パターンが形成されたウエハの評価には FE (フィールドエミッション) 型 SEM が用いられる。ウエハのまま, 非破壊, 非接触で, 高分解能で測定でき大変有用である。ウエハ表面からの傾角測定, または試料断面からの観測が可能であるが, 焦点深度の問題, 分解能の問題からパターンが形成されたウエハの測定には限界がある。

図1はアルミニウム膜上に堆積したプラズマ CVD 酸化膜の平坦化研磨表面の AFM 写真である。研磨時間 2 分間のこの AFM 写真から, 研磨された酸化膜表面は平坦でなく, アルミニウム-酸化膜界面にはスクラッチが形成されていることがわかる。図2は同じパターンの研磨を進めた場合のこの酸化膜のアルミニウム膜との段差と研磨された表面の粗さの研磨時間による変化である。堆積時 $1.1 \mu\text{m}$ あったこの段差は酸化膜研磨時間の増加により減少, 6.5 分間でこの段差が除かれ, 平坦な表面が得られた。この段差の観測を断面 SEM で行くと, 酸化膜が厚い場合には AFM による結果と良い一致が得られるが, 50 nm 以下の段差となると測定限界となり, AFM による段差測定が必要となることがわかる。一方この研磨により得られた研磨

図2 酸化膜 (PE CVD) ステップ高さや表面粗さの CMP 時間による変化

表面の粗さは, 2 分間の研磨で平均 9.2 nm に改善されたが, 研磨時間を更に増加すると, この粗さは著しく増加した。6.5 分間の研磨では酸化膜表面の粗さは 81 nm まで増加, 長時間の研磨により, 粗い表面が得られることがわかる。

3.7 膜堆積による評価

これらのパターン平坦化研磨プロセスでは, シリコンウエハのように, 必ずしも平坦な表面が必要なわけではない。研磨された表面には, 表面反応が優れた酸化膜, W や WSi_2 などの膜が堆積される。この膜堆積では鏡面状態の表面に比べ, ある程度荒れた表面のほうが, 核生成密度が高いため, コンフォーマリティの優れた膜の堆積が期待

できる。膜の表面に対する要求も金属配線のように縦方向に電流が流れる場合と、酸化膜のように、コンフォーマリティだけが問題、リーク電流が少なければよい場合とで異なる。このように研磨された膜表面に対する要求は、プロセスごとに異なり、要求は必ずしも明らかでない。

この点を明らかにするには、実際に膜の堆積を行い、場合によってはデバイスを作成し、膜の表面状態、コンフォーマリティ、粒界成長などのプロセス評価を行い、最適研磨条件を明らかにすることが必要である。

4. ま と め

平坦化研磨プロセスの評価技術について述べた。このプロセスは微細パターンで特に必要となるため、評価も従来行われてきた方法と異なり、実際に用いられる $1/4\ \mu\text{m}$ のプロセスでの評価が行われるべきである。しかし実際に評価技術はほとんど確立されていないのが現状である。

書 評

光が創るマルチメディア新時代

編 著 河田 聡・桑野幸徳

発 行 三田出版会

本書は、来るべきマルチメディア時代に主役となる、光技術全般を網羅した解説書である。解説書というとその道の専門家向きと思われるかもしれない。確かに応用物理学会シンポジウム資料をもとに執筆されているが、対象は応用物理の専門家にとどまらず、光技術の素人にも良くわかるように平易に解説されている。簡単に内容を紹介しよう。

本文はマルチメディア社会の全体像に始まり、光通信、光情報処理、光記憶、ディスプレイについて解説されている。まず第1章で、想定されるマルチメディアサービスが示され、そこで要求される情報量を具体的な数字としてはじき出し、その必然的結論として、電子技術の延長では不可能で、光技術が必要となることが述べられている。続く各章では順に、まず現状の光技術と問題点、それを解決する将来技術が解説されている。例えば記憶の章では、まず現状光ディスクの記録原理を述べ、その高密度化の限界が光の波長にあることを説く。さらに続く各節では、ニアフィールド走査光学顕微鏡(NSOM)や、短波長化技術、多層記録技術等、波長限界を越えて記録する技術が解説される。このうち、特に有望なNSOMは、光技術によって駆逐されたレコード針の復活にはかならないと説明されている。

マルチメディアを専門とする人はもちろん、マルチメディアや光技術に興味をお持ちの方々にも参考となる一冊であろう。

目次

- 1 “光”はマルチメディア時代の光(デジタルと光の時代がやってきた、超マルチメディアに向けた技術課題、ほか)
 - 2 “光”は超高速で制御する(電気信号と光信号はどちらが速くて使いやすいか? 超短光パルスを生み出すには? ほか)
 - 3 “光”通信が情報量を増大させる(光ファイバーが新たな時代を作る、ソリトン制御で伝送距離は無制限になる、ほか)
 - 4 “光”メモリーで記録の壁を突き破れ(光記録の原理と限界、レコード針の復活? ニアフィールド光学、ほか)
 - 5 “光”デバイスは情報伝送・処理が得意(光デバイスは通信システムを変える、面発光レーザーは有望な光源、ほか)
 - 6 “光”演算が開く情報処理(画像処理は光が最適、光コンピュータへのチャレンジ、ほか)
 - 7 “光”ディスプレイは人にやさしい(液晶ディスプレイは光シャッターの集合体、次世代素子の本命は多結晶シリコンTFT、ほか)
- (評者：NTT・保坂 寛)
(A5判, 224ページ, 2800円)