平面精密研磨に用いられる研磨パッドの技術動向*

Technology Trend of Polishing Pad for CMP

儀部 晶**
Akira ISOBE

Key words CMP, polishing, pad, slurry, suede, LSI, HDD, sapphire, LCD, glass, TSV

1. はじめに

研磨とは人類がはるか石器時代から培い発展させてきた技術であり、青銅器時代、鉄器時代とその技法はまさに磨きかけられていく。そして1970年代にいよいよ硅石器時代が幕を開けるのである。研磨の観点から分けると、集積回路に用いられるシリコン基板の研磨を開始した70年代以降を旧硅石器時代、デバイスの平坦化にも研磨が用いられるようになった90年代以降を新硅石器時代と呼んでもいいかもしれない。現在では、シリコン半導体以外にも、ハードディスク用のアルミ基板、ガラス基板、LCD用の巨大ガラス基板や、LED向けのサファイア基板、パワーデバイス用のSiCやGaN基板など、研磨の応用範囲は大きく広がり、また今後も広がり続けると考えられる。ここでの研磨は平面精密研磨であり、化学機械研磨～CMPが用いられている。通常、ロータリー方式の研磨装置が用いられ、円形テーブル上に貼られた研磨パッドにスラリーを流し、回転するテーブル上に研磨対象基板を保持したヘッドを回転させながら押しつける。研磨対象やその目的により、スラリーと研磨パッドはさまざまな組み合わせが用いられるが、この二つの消耗材料が研磨性能を決定する最も大きな要素となる。本稿では、この2大要素の一つである研磨パッドについて、その種類と特徴、適用される分野、さらには研磨性能に影響を与えるパッド物性とその最新評価手法などについて解説する。

2. 平面精密研磨に用いられる研磨パッド

研磨パッドには大きく分けて、硬質発泡タイプ、不織布タイプ、スエードタイプが存在する。それぞれの特徴について解説する。

2.1 硬質発泡タイプ

硬質発泡タイプは図1に示すように、空孔を含んだパッドであり、ポリウレタン製が一般的である。空孔のサイ

ズや密度が研磨性能に与える影響は大きく、これは、スラリーの保持、供給、パッド表面粗さやバルク硬度などに影響するためと考えられる。このタイプのパッドは、図2に示すように出荷直後は表面が平滑で、このままでは研磨性能が出せない。ダイヤモンドを埋め込んだディスクやホイールによるブレイクインと呼ばれる目立て工程により表面を荒らす必要がある。また、研磨枚数を重ねることによって研磨レートが徐々に低下するために、シリコンやガラスの研磨では、このブレイクインと同様の目立て工程（ドレッシングあるいはコンディショニングと呼ばれる）を数バッチごとに行い研磨レートを維持している。一方、デバイス平坦化の場合にはより高精度な研磨量管理が必要であるため、研磨バッチごとにあるいは研磨中に同時にドレッシングを行っている。研磨と研磨の間に行う場合をex-situ ドレッシング、研磨中に同時に行う場合をin-situ ドレッシングと呼ぶ。

また、デバイス用では主に、クッション層の役割をもつ不織布パッドやフォーム層との積層パッドで用いられる。

図1 硬質発泡タイプパッドの例

図2 IC1000™パッド表面

*原稿受付 平成24年8月3日

**正会員 ニッタ・ハース株式会社技術企画室室長

図 3 不織布タイプ研磨パッドの例

図 4 スエードタイプパッドの例

パッドの表面にはスラリーの供給や研磨生成物の排出を容易にする目的で溝が形成される場合が多い。溝のパターンは XY の格子形状、同心円形状、放射形状、Perforate 形状およびそれらの複合などさまざまなものがアプリケーションに応じて適用される。

2.2 不織布タイプ

不織布タイプは、図 3 に示すように、ポリエステルなどの不織布にウレタンなどを含浸したもので、不織布のタイプや含浸させる樹脂の量などでその物性を変化させることができる。硬質発泡タイプと後述するスエードタイプの中間的な用途で用いられる場合が多い。すなわち、硬質発泡タイプは平坦性重視、スエードタイプは平滑性、低欠陥重視であるが、不織布タイプはある程度の平坦性を維持しつつ、表面平滑性や欠陥性は硬質発泡タイプ以上のものを求める場合に用いられる。

2.3 スエードタイプ

スエードタイプは、湿式成型により基材上に塗工される。図 4 に示すように、基材としては上記不織布パッドに用いられるのと同様の不織布を用いた製品と、PET を用いた製品がある。これらの基材にウレタン樹脂の DMF 溶液を塗り、凝固剤（水）と DMF を置換させることによ

り涙滴状のポアが形成される。この工程は凝固と呼ばれ、研磨性能に大きく影響するポアの形状を決定する重要な工程である。その後、洗浄乾燥工程を経るが、この時点ではパッド表面はスキン層で覆われている。これをバフにより除去することによってポアを表面に露出させる。涙滴状のポア形状のためバフ量によってポア径は変化し、また、研磨を重ねることによっても同様にポア径が変化して研磨性能に影響を与える。

3. 平面精密研磨の主な応用分野と使用パッド

3.1 シリコン基板

シリコンウエハの製造工程は、インゴットをスライスし、ラッピングによって形状を整えた後何段階かの研磨工程を経て製品が完成する。この研磨工程はウエハメーカー各社により異なっているが、概略は、硬質発泡パッドを用いた 1 次研磨、不織布パッドを用いた 2 次研磨、スエードパッドを用いたファイナル研磨に分類される。メーカーによっては硬質の不織布パッドを 1 次研磨に用いたり、1.5 次や 2.5 次研磨に当たる中間的な工程を入れたりと各社の考え方で工程フローおよび使用パッドは異なっている。1 次研磨、2 次研磨までは両面研磨機が用いられ、ファイナル研磨では片面研磨機が用いられる。

3.2 デバイス CMP

1980 年代の後半に IBM がデバイスの平坦化に研磨を用いることを開始した。その後、1990 年代前半から中盤～0.35 μm から 0.25 μm 世代～に微細化が進んでリソグラフィの焦点深度が厳しくなると、ステッパーのショット内の高さばらつきを小さくして解像度を確保する目的で日本でも CMP が広まった。当時はアルミ配線の層間絶縁膜の平坦化が主であったが、その後、上下の配線間を接続するタングステンプラグや、素子間分離のための浅溝分離 (STI)、Cu 配線形成のためのダマシン工程など応用範囲を広げていく。IBM が最初に検討した研磨パッドは IC60 と呼ばれるガラスビーズ入りのウレタンパッドであったが、その後その改良版の IC1000™ と SUBA™ の積層パッドが標準的に用いられるようになり、今に至るまでデファクトスタンダードとして使用されている。あらゆる工程に適用可能なオールマイティのパッドであったが、さすがに近年は各工程の性能要求が厳しくなっており、樹脂組成やポア構造に遡ってチューニングしたパッドの開発が進んでいる。また、メタル CMP の仕上げステップなどにはスエードタイプのパッドも用いられている。今後のさらなる微細化に対応するためには、平坦性と低欠陥性の両立が求められると考えられる。

3.3 TSV・チップ積層

デバイスの微細化に限界が見え始めてきた昨今、注目を集めているのがチップを積層することによってその容量や機能を高める 3D 化である。TSV とはスルーシリコンビアの略で、積層したチップとチップをつなぐためにチップを貫通する穴にメタルが埋め込まれた構造となっている。

この構造を実現するために以下の研磨が必要となる。①深穴にメタルを埋め込んだ後のメタル研磨、②シリコンウエハを薄く研削した後の破碎層除去のためのシリコン研磨、③ビアを裏面から露出させ、周りとの絶縁を取るために行うシリコンおよび酸化膜研磨。①、③ではIC1000などの硬質発泡パッド、②ではSUBAなどの不織布パッドが用いられる。①、③では通常のデバイスCMPと同様の装置が用いられるが、②では研削と研磨が一体となった装置～ポリッシュグラインダー～が用いられ、小径のパッドを用いてパッド側からスラリーを供給して研磨する方式が用いられている。シリコン基板、デバイス製造工程と来いよいよ後工程と呼ばれる実装・パッケージ工程でも研磨が用いられるようになってきた。この領域では今後さらなる研磨の応用分野が発展する可能性がある。

3.4 ハードディスク用ガラス、Al基板

ハードディスク用基板は2.5インチ以下用のガラス基板と、3.5インチ用のアルミ基板に大別されるが、いずれもきわめて高い表面精度が求められる。ディスクとヘッドの関係はしばしばジャンボジェットが地上1cmを飛行していると例えられるように、わずかの欠陥がヘッドのクラッシュを引き起こす。いずれも2段階研磨が用いられており、アルミではスエード+スエード、ガラスではセリア入り硬質発泡ウレタンパッド+スエードという組み合わせが多いが、上述した高い表面精度の要求に応えるために、ガラスでもスエード+スエードが検討されている。スエードパッドの場合、表面品質は良くなるが、基板の縁ダレが起きやすいので、そのバランスが重要となる。用いられる研磨装置は1次2次ともに100枚以上を同時に研磨する両面研磨装置である。

3.5 LCD用ガラス

LCDに用いられるガラスの製造方法は、フロート法と呼ばれる方式と、フュージョン法と呼ばれる方式に大別されるが、フロート法では製造上表面にうねりが発生するため研磨で仕上げる必要がある。そのサイズはテレビの大型化に伴い第10世代で2880×3130と巨大なもので、セリア砥粒を用いて研磨が行われる。ここでは表面の平滑性というよりもうねりの除去が目的であるので、セリアを含有した発泡ポリウレタンタイプのものが広く用いられている。昨今のレアアース危機の影響でセリア価格が急騰したために、セリアを含有しないものや、セリアスラリー以外で同等の性能を発揮できるスラリーとパッドの組み合わせの検討も進められている。

3.6 サファイア、SiC、GaN基板

サファイア、SiC、GaNはLEDや次世代パワーデバイス向け基板として需要が高まっている。これらはいずれも非常に加工が難しく、研磨レートも数 $\mu\text{m}/\text{h}$ や数百 nm/h といったオーダーの非常に低いものである。通常はこれらの基板の上にGaNやSiCなどをエピ成長してデバイスに応用するため、基板の表面の結晶品質がそのままエピ膜に引き継がれる。図5に示すような原子ステップが観察さ

図5 SiC (4H on-axis) 研磨後表面 AFM 観察
(適切に研磨された面では原子ステップが観察される)

れるレベルの平滑性が要求され、要求品質や前段の加工仕上げにより、不織布1段研磨、不織布+スエードパッドの2段研磨、スエード1段研磨などが用いられる。加工速度を上げるために研磨圧力を高圧とする場合が多いため、パッドの耐久性も課題となる。

4. 研磨パッドの分析技術と研磨メカニズム

これまでの研磨パッドの開発は、経験的に把握されている研磨パッドの諸物性と研磨特性の関係から方向性を定め、実際の研磨結果を確認しながらトライアンドエラーで最適化していくという手法がとられてきた。研磨性能に影響を与える研磨パッドの物性としては、硬度、圧縮率、回復率、粘弾性、厚さ、密度、ポアサイズ、ポア密度、表面粗さなどが考えられるが、ここで問題なのは、パッドの設計・製造上制御できるパラメータと、研磨性能に影響を与えるパラメータは必ずしも一致しないということである。例えば、密度は確かに研磨性能との相関が見られるが、パッド密度を決定するのはポリマー密度、ポアサイズ、ポア密度などの複合であり、密度そのものが研磨性能を決定するわけではない。圧縮率や粘弾性にしても、バルク物性と表面物性は異なると考えられ、より研磨に直接的な影響を与えると考えられる表面物性は制御が難しいのである。さらに、研磨性能への影響が強いと考えられる表面粗さにしても、通常用いられる平均粗さRaという指標はあまり当てにならない。Raはあくまでも平均の粗さを表しているに過ぎず、研磨特性に直接影響する粗さの質は表現しきれないものである。そうした状況に対して、近年、より直接的な要素を分離して測定しようというさまざまなアプローチがなされている。櫛田らは表面粗さの波長成分ごとの強さを表すパワースペクトルを用いて研磨性能との相関を検討した¹⁾。また、Lawingらはパッド表面の高さヒストグラムを用いて、ポアによる粗さ成分とドレスやグレージングによる表面粗さ成分の分離に成功し、研磨性能との相

図6 パッドの表面粗さと高さ頻度分布の関係

図7 CuCMPにおける接触面積率とスクラッチの関係

関を調べている(図6)²⁾。これらは、研磨パッドが基板に接触するのはわずか1%程度であり³⁾、パッドがどのように基板に接触するかが研磨性能を決定するキーファクターであることと関連している。もっと直接的にパッドの接触部を観察する方法をElmufdiら⁴⁾や畝田ら⁵⁾がそれぞれ提案している。図7はそうして観察された接触面積率から換算した接触圧力とスクラッチの関係を示したものである。また、鈴木らはパッド表面の粘弾性率を高速繰り返し圧縮試験のストレス-変位特性から同定する手法を提案し、表面の粘弾性率は非線形でかつバルクに比べ非常に低いことを示した⁶⁾。以上はいずれもパッドの表面の状態をより詳しく解析しようというアプローチであるが、バルク構造をより詳細に解析する手法としてはX線CTを用いて3次的に観察する方法も報告されている(図8)⁷⁾。このような新しい解析手法によって得られた新たな知見に基づいた研磨メカニズムの見直しも進められている⁸⁾⁹⁾。これまで漠然と考えられていたミクロなパッドと基板、さらにはスラリー中の砥粒との関係が徐々に明らかとなってきている。

5. お わ り に

平面精密研磨は、電子デバイスの発展とともにその応用範囲を年々広げており、また、求められる研磨特性も日々向上している。そうしたニーズに応えるための研磨パッドを開発するためには、新たな材料探索や製法開発が必要なのはもちろんであるが、多様化、高度化した要求に応えるためには従来のトライアンドエラーに頼った開発では限界があると考えられる。新しい解析手法により、直接的に研

図8 X線CT装置によるスエードパッドの解析事例～ポア部の底(0μm)から任意の高さで断面観察

磨特性に影響を与えるパッド物性が明らかとなり、研磨メカニズムの解明が進みつつある。それによって、原理に基づいた研磨パッド材料の設計とその具現化が達成されたとき、新硅石器時代の次の時代が幕を開けるであろう。

参 考 文 献

- 1) 櫛田高志, 木村景一, カチョールンルアン パナート, 鈴木恵友: 工学的フーリエ変換に基づいたCMPポリッシングパッドの表面形状評価に関する研究, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 F37, (2011) 342.
- 2) A.S. Lawing: Proc. MRS Spring Meeting, (2002).
- 3) 三橋真成, 小野秀之, 磯部晶: CMPによる平坦化研磨—パッドとウェハの接触状況—, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995) 20.
- 4) C.L. Elmufdi and G.P. Muldowney: Proc. MRS Spring Meeting, (2006).
- 5) 畝田道雄, 岡部憲嗣, 守屋紀彦, 澁谷和孝, 石川憲一: ダブルリズムを用いた接触画像解析法に基づくポリッシングパッド表面性状の定量評価手法の開発に関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 J63, (2010) 735.
- 6) 鈴木教和, 浅羽正和, 橋本洋平, 社本英二: 圧縮試験装置を用いたCMP研磨パッドの非線形粘弾性の同定, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 F38, (2011) 161.
- 7) 河井奈緒子, 中野裕之, 板井康行: X線CT装置による研磨パッドの構造解析, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 J43, (2012) 819.
- 8) M. Akaji, S. Haba, K. Yoshida, A. Isobe and M. Kinoshita: Study of Optimum Polishing Pad Surface for CMP, Proc. ICPT, (2009) 97.
- 9) 磯部晶, 羽場真一, 西澤秀明: 研磨パッドおよび砥粒のコンタクトエリアを考慮した研磨メカニズムの数量的考察, 精密工学会春季大会学術講演論文集 E07, (2011) 347.

磯部 晶

1984年京都大学原子核工学学科修士課程修了。同年日本電気株式会社入社、LSIプロセス開発に従事。2002年東京精密株式会社入社、CMP装置事業責任者。2006年ニッタ・ハース株式会社入社、CMP消耗材料開発・研究に従事。現在に至る。プラナリゼーションCMP委員会幹事。