

半導体プラナリゼーションCMP技術の展望

黒河, 周平
九州大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/7167109>

出版情報 : Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 84 (3), pp.213-216, 2018-03-05. The Japan Society for Precision Engineering

バージョン :

権利関係 :

半導体プラナリゼーションCMP技術の展望*

The Overview and Future Prospects for Planarization CMP Technology

黒河周平**
Syuhei KUROKAWA

Key words

CMP, planarization, semiconductor, chemical mechanical polishing/planarization, device wafer, abrasive grain, slurry, memory, SiC

1. はじめに

CMP (Chemical Mechanical Polishing/Planarization) は研磨技術から発展し、化学反応を援用して対象基板の表面を改質するとともに、機械的研磨と組み合わせることで超精密平坦化を実現する技術であり、1990年ごろに半導体の平坦化加工に採用され始めて以来、半導体デバイス製造において、必要不可欠なプロセスとして定着している。一方でCMP技術は、半導体ウエハや各種基板の加工技術として活用され続けているにもかかわらず、加工に及ぼす要因や要素が多く、それらが複雑に絡み合っているため、経験に基づいたノウハウによって成立している側面が強い。今後のデバイス・プロセスにおいてより高度な精密平坦化加工を行うには、サイエンス化を図り、その加工メカニズムを解明し、経験則を裏付け、新たな発想と組み合わせ、困難な課題を克服していく必要がある。

ここでは、研磨技術から始まるその歴史的発展経緯を概観し、現状必要となっている技術課題を述べるとともに、将来を展望する。

2. 研磨技術とCMP

研磨は太古の昔から経験に基づき行われてきた加工法であり、こすり合わせる操作により、古くは勾玉や銅鏡、刀の研磨、また、中世以降は望遠鏡や顕微鏡などの光学レンズ研磨などに応用されてきた。

機械工学的な立場から分類すると、研磨加工は除去加工の中の精密仕上げ加工や超精密加工の一種に分類される。これは、材料除去量は少ないものの、加工精度が良いという意味の加工法である。その中で、ラッピングやポリシングといった研磨加工技術は、砥粒加工法に分類されることが多い。図1に砥粒加工法の系統図を示す¹⁾。

砥粒加工法は固定砥粒加工法と遊離砥粒加工法に大別さ

れる。固定砥粒加工法の代表的なものに研削加工があり、これは砥粒を結合材で固定した砥石を用い、砥石を強制的に切り込むことで、砥粒が切れ刃の役割をして加工物表面を少しずつ削り取る加工法である。砥石の切り込みがそのまま除去量に反映されることから、強制切り込み方式とも呼ばれる。強制切り込み方式は、切れ刃の転写技術と見なされるため、その加工精度は切れ刃(砥粒)の位置制御精度に大きく左右される。したがって、研削加工の場合は、加工機器である研削盤の精度が加工精度に直結するため、加工精度を上げるためには、ひたすら研削盤の精度を上げる必要がある。

一方で、研磨加工は遊離砥粒加工法に分類される。これは研削加工とは異なり、砥粒が液体中に分散している格好となるため、砥粒の切り込みを直接制御することができない。その代わりに、研磨圧力を制御することで除去量を制御する。そのことから、強制切り込み方式に対し、圧力切り込み方式とも呼ばれる。機械的研磨加工の場合は、除去量は圧力に比例するという経験則が成り立つ。いわゆるプレストンの経験則と呼ばれるもので、砥粒と加工物の間の動摩擦係数を一定と仮定すれば、研磨圧力に摩擦係数をかけた値(=せん断応力)と、研磨工具と加工物との相対速度の積で表される量に、研磨速度は比例するという式である。これは、とりもなおさず機械的投入エネルギーに比例した一部のエネルギーが研磨による材料除去に使われていることを表している。

ポリシング加工法の一種であるCMPは、この遊離砥粒による機械的除去作用に加えて、化学的作用を援用した加工法である。化学的機械研磨とも呼ばれ、化学的作用によ

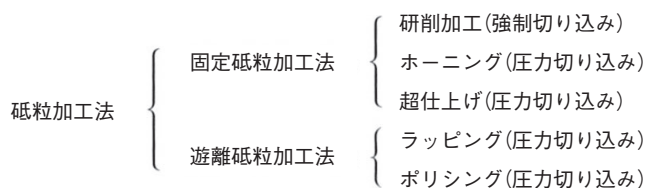


図1 砥粒加工法の分類¹⁾

*原稿受付 平成30年1月18日

**正会員 九州大学大学院工学研究院(福岡市西区元岡744)

り加工物の表面を改質しつつ、機械的作用と合わさって加工が進むものと解釈されている。特に、化学的作用により形成された表面改質層の凸部を優先的に上から順次除去していくと、少ない加工量で加工面全体を均一に平坦化(planarization)することが可能となる。このことを利用して、半導体のデバイスウエハの平坦化加工に応用され、デバイスウエハの製造プロセスに欠かせない技術へと発展してきた。そのため、このような平坦化を積極的に行う用途においては、CMPはChemical Mechanical Planarizationと表記されることが多い。

3. CMPの歴史的發展経緯

光学レンズなどのポリシングでは、かつては酸化鉄(Fe₂O₃)や酸化セリウム(CeO₂)粉末などを水に分散させたスラリーと、粘弾性のある樹脂の一種であるピッチをポリシングパッドとして用い、高品質な鏡面仕上げを可能としていた。しかし、この方法をシリコンウエハに適用するには、微細なスクラッチ痕などの表面欠陥が問題となり、半導体基板への適用には不十分なものであった。この問題を解決するためには、できるだけ機械的作用を抑え、化学的作用を積極的に用いた方が有効であることが明らかとなってくる。

ベアシリコンウエハのCMPでは、pHを調整した化学薬液中に微細なシリカ(SiO₂)粒子を砥粒としてコロイド状に分散させたスラリー(コロイダルシリカスラリー)と、微細な空孔(ポア)が表面に多数存在する滑らかな軟質ポリウレタンなどをポリシングパッドとして使用することで、極めて高品質な鏡面が得られることが分かってきた。スラリー自体が水よりも多少高い粘度を有しており、軟らかいポリシングパッドとウエハの相対運動により界面にスラリー層が形成され、摩擦とせん断による発熱も伴い、シリコン表面に水和層が生成する。また、コロイダルシリカ砥粒の形状が球形に近いことから、機械的作用が極めてマイルドになることと、化学薬液によるエッチング作用も伴って、化学的複合ポリシングが実現できているものと解釈されている²⁾。このことから、CMPは、まさにラブミーテNDER(Rub me tender:優しくこすって)が基本であることが理解できよう。

一方、超LSIデバイスの高性能化は、MOSトランジスタの高集積化を進めることによって発展してきた。いわゆるMooreの法則である。限られた面積でトランジスタ数を増やし、かつ高速動作を進めるためには、基本素子の微細化を進めるとともに、高集積化を図る必要がある。そこで、配線による信号遅延の問題も併せて解決する方法として、配線の多層化が高集積化のキーとなってきた。

多層配線技術の発展で不可欠となってくるのが、リソグラフィの焦点深度を確保するための平坦化処理である。微細化のためにはフォトリソグラフィにおける解像度の向上が不可欠であり、そのため露光に用いる光の波長を短くする必要がある。ところが、光の波長を短くすると、焦点深

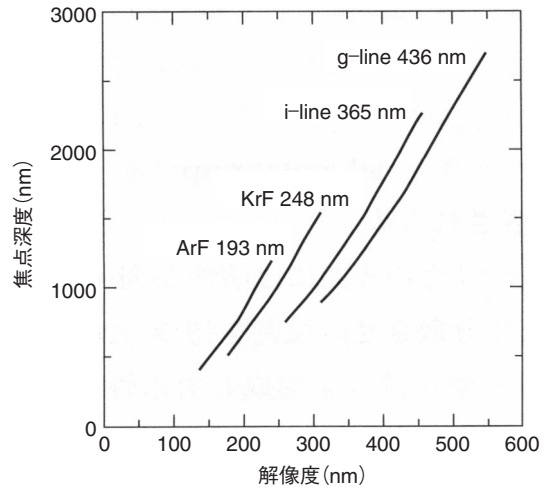


図2 解像度と焦点深度の相関³⁾

度も浅くなり(図2)、わずかな凹凸があるだけで、凹部と凸部で同時に焦点合わせをすることが困難となる。多層化が進むとわずかな凹凸が積み重なって大きな凹凸になってしまう、露光におけるフォーカスマージンの確保がますます困難となる問題が顕在化してきた。端的に言えば、超LSIにおける多層配線化では、層間絶縁膜の表面が焦点深度よりも平坦でなければ露光ができないということである。ここに、表面の凹凸を除去する平坦化処理技術が不可欠となり、CMPの導入が行われたわけである。

これまでベアシリコンウエハの加工プロセスに限られていたCMP技術を、平坦化を目的に積極的に導入したことで、超LSIに代表されるデバイスの性能は格段に向上した。多層配線化のための層間絶縁膜の平坦化以外にも、微細素子の分離技術としてのSTI、さらに埋め込み配線法としてIBM社が提案し、1991年に発表したダマシン配線技術も、平坦化CMPを積極的に応用して初めて実現したものである。半導体デバイス製造工程へのCMP導入の歴史をまとめると、以下のようになる⁴⁾。

- (1) IBM社が多層配線を研究する際に、デバイスのCMP技術を開発。そのころに「ダマシン」が名付けられ、1991年にタングステン配線のダマシン配線で最初の国際学会発表。エッチバック技術の一つとしてCMPと名付けられた。1993年に最初のCuダマシン配線を発表。
- (2) 1990年代後半から徐々にCMP工程が追加。特に、130~180nm世代から本格的に導入されたCu配線工程でCMP技術が必須となった。そのため、装置技術やスラリー・パッド・洗浄剤などの消耗資材の技術も進化。1995年ごろから2005年ごろまでの約10年間に最もCMPの開発が進んだ。

4. CMPの技術課題

これまでに述べてきたとおり、CMP技術は平坦化加工法として半導体デバイスや各種基板の加工技術として活用

され続けているにもかかわらず、実際には加工に及ぼす要因や要素が多く、それらが複雑に絡み合っているため、その加工メカニズムの詳細はいまだに不明な点が多い。実質、経験に基づいたノウハウによって成立しているといってもよいのが現状である。困難となる理由の一つは、化学的複合ポリシングのため、加工対象となる材料が異なれば、異なるアプローチが必要となる点にある。例えば、スラリー一つとってみても、砥粒材料であれば、用途に応じてコロイダルシリカ、フュームドシリカ、焼成セリア、コロイダルセリア、酸化マンガ、アルミナなど数多くあり、そのほか、スラリーの砥粒濃度、砥粒の純度、スラリー流量、pH、分散剤、酸化剤、防食剤、溶解剤などの添加剤など、その違いは多岐にわたる。さらに、ポリシングパッドとの関係もあり、そこに機械的加工条件も加わることになるため、系は極めて複雑となる。その上、機械的研磨加工の基本法則であるプレストンの経験則でさえ、成立しない系は少なからず存在する。逆に、非プレストニアンの性質を積極的に利用し、加工速度を制御する工夫を施すことさえある。

製品歩留まりを上げるためには、スクラッチや残留異物の低減、平坦性の向上、腐食対策などが不可欠となる。CMP 工程は、いわばウエハ表面にスラリーという泥水を接触させるという汚い工程であるため、異物の混入による欠陥の発生には常に気をつかう必要がある。スクラッチであれば、極力ゼロにするという目標があるものの、スラリーパーティクルや残留異物など極力小さいものまで管理し、ウエハ上にわずかししか発生しないスクラッチをも検出する必要がある。そのための欠陥検査技術の向上や、異物除去のための洗浄技術の向上も不可欠となる。

また、デバイス構成材料が多岐にわたることも大きな課題である。例えばルテニウムの登場のように常に新しい材料が導入され続けており、異種材料の組み合わせによる選択比の制御やガルバニック腐食の対策、リセスの問題にも対応する必要がある。さらにデバイス構造の変化にも対応する必要がある。FinFET (魚のひれ「Fin」のような構造をもつ電界効果トランジスタ) のように 3 次元構造を作成する開発も行われており、この場合 Fin の突き出し量の高い均一性とパターン依存性の少ない研磨技術の開発が求められる⁵⁾。

これに加え、2 次元平面での面積拡大には限界があるため、半導体チップどうしを積層する 3 次元高集積化技術の開発も行われている。チップどうしを最短距離で接続することで異なるテクノロジーノードの組み合わせも可能となり、高機能かつ高速動作を実現するもので、そこには配線接続貫通電極 (TSV) 形成の製造工程における CMP 技術の開発も求められている。すなわち、ウエハどうしの接合を行うための Cu の突き出し量の制御を平坦化により実現するという重要な課題がある。

今後、IoT やクラウドコンピューティング、機械学習などの技術背景においては、HDD から NAND フラッシュ

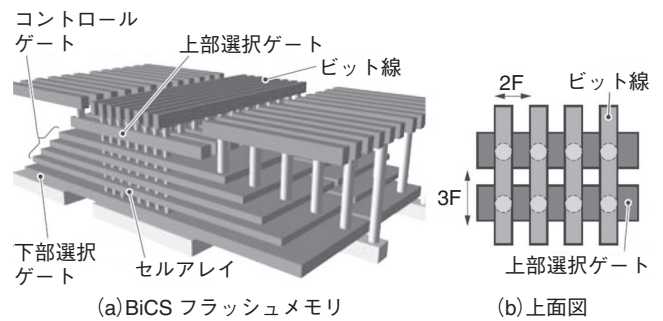


図3 BiCS FLASH™の積層構造⁶⁾

メモリへの急速な置き換えも想定されている。2020年には44ゼタバイト、2030年には200ゼタバイトとも予測されているメモリの需要に応えるために、さらなる高集積化へのチャレンジとして不揮発性3Dメモリの開発も行われている。例えば東芝メモリの3次元フラッシュメモリ (BiCS FLASH™) は、積層数によらずリソグラフィやエッチングの工程数を一定にできるメリットがあり期待されている。その実現には、多積層成膜、超高アスペクト加工、超高段差平坦化などが必要であり、それでいて高生産性を確保する必要があり、CMPプロセス技術の難度も格段に上がっている (図3)⁶⁾。

5. CMPの将来展望

次世代デバイス・プロセスへのCMP技術適用拡大は不可避となっており、近年実用化が進み始めた次世代パワーデバイス材料であるSiCやGaNの高効率研磨は大きなトピックとなっている。例えばSiCであれば、バンドギャップがSiの約3倍、絶縁破壊電界が10倍以上、高温動作 (650℃の動作報告あり)、高い熱伝導性 (SiCはCu並み)、大きな飽和電子ドリフト速度などが特徴であり、この結果、SiCやGaNを使えば、パワー半導体のオン抵抗を下げ (1kVで1mΩcm²)、電力変換回路の電力損失を大幅に削減することが可能となる。その効果は、例えば、日本では総電力消費の約50%がモータで消費されていることから、各種モータやエアコンなどでインバータ化やインバータの高効率化を推進すると、日本だけで原子力発電所4基分 (CO₂排出量1000万トン) の省エネ効果が期待できる、との試算がある。既に、2012年に地下鉄東京メトロ銀座線において、SiCショットキーバリアダイオード+SiのIGBTで、600Vのハイブリッドデバイスとして、38.6%の省エネを達成、2014年には小田急線に1500VフルSiCインバータが搭載されている。2020年にはJR東海で3300V新幹線車両用駆動システムに採用される予定で開発が進められている。

これらの次世代パワーデバイス材料では、結晶欠陥の少ない結晶成長法が開発されてきてはいるものの、その有用な性能の裏返しとして、加工の長時間化がネックとなっている。これらは加工技術においては典型的な超難加工材料

であり、研削加工の工具側に位置する高硬度材料を、加工対象ウエハとして高能率研磨していかなければならないという困難な課題に直面している。その高能率研磨のアプローチとして、強酸化剤を利用する方法⁷⁾、プラズマ加工を利用する方法⁸⁾、触媒エッチングを利用する方法⁹⁾、紫外線照射を援用する方法¹⁰⁾、レーザー照射を援用する方法¹¹⁾、溶融アルカリを利用する方法¹²⁾など、多岐にわたるアプローチが試みられており、精力的に研究が行われている。また、高硬度材料であるため、インゴットからウエハ化するスライシング工程での時間短縮を図るために、ワイヤソーの高能率化¹³⁾やレーザー照射を利用したスライシング方法¹⁴⁾などユニークな方法も開発されてきている。

一方、CMP技術のサイエンス化を図るためには、加工メカニズム解明のためのシミュレーション技術も重要である。EHL理論を用いたパッドとウエハの接触解析¹⁵⁾、スラリー流れの解析¹⁶⁾、コンディショニングのシミュレーション¹⁷⁾、さらにはスラリー作用モデルの構築も重要である。これまでに砥粒凝着説¹⁸⁾やフェレ径モデル¹⁹⁾などの提案がなされており、それらモデルの妥当性の検証が待たれているところである。そのためには、パッドとウエハの接触領域の観察、スラリー砥粒の流動状態やウエハ・パッド相互作用領域での挙動観察、ポリシングパッドの表面解析や目詰まり観察・解析²⁰⁾など、現実に起こっている現象の正確な把握が不可欠である。なおこれらは、マイクロスクラッチの発生要因などとも密接な関係をもっていると考えられている。

これ以外にも、これまでの技術にとらわれない新しい加工技術の探求に加え、CMP技術の新しい応用分野の探索も必要である。新しい応用の探索については、平坦化とは異なり、3Dプリンタに代表される3次元積層造形物に対する仕上げ研磨技術の必要性がクローズアップされてきていることを受け、3次元積層造形精密後加工技術に関する調査研究分科会²¹⁾も立ち上がっており、その活動成果に大いに期待したい。

6. おわりに

本稿では、CMP技術の歴史的発展経緯を概観し、その技術課題を述べるとともに、将来展望を試みた。このほかにも、太陽電池、LED、MEMSなど、ここでは紹介しきれなかったCMPの応用技術に関するトピックスがまだまだある。技術課題克服や将来期待される技術の具体的事例については、この後の「解説」記事に譲るとして、本稿がCMP技術者の今後の研究・開発の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 有浦泰常, 鈴木俊男, 鬼鞍宏猷, 仙波卓弥, 黒河周平: 機械製作法II, 朝倉書店, (2007) 80.
- 2) 土肥俊郎: 詳説半導体CMP技術, 工業調査会, (2001) 40.

- 3) 精密工学会プラナリゼーションCMPとその応用技術専門委員会: 半導体CMP用語辞典, オーム社, (2008) 89.
- 4) 精密工学会プラナリゼーションCMPとその応用技術専門委員会: サマーキャンプ 16 配付資料, (2016) 59.
- 5) 檜山浩国: 半導体産業を取り巻く技術課題と今後の展望, 砥粒加工学会誌, **57**, 1 (2013) 11.
- 6) 田中啓安, 青地英明, 仁田山晃寛: 低ビットコストで大容量な3次元構造のNAND型フラッシュメモリ, 東芝レビュー, **63**, 2 (2008) 28.
- 7) 黒河周平: 強酸化剤を添加したスラリーによる加工, 砥粒加工学会誌, **61**, 8 (2017) 422.
- 8) 山村和也: プラズマ援用研磨によるSiCのダメージフリー仕上げ, 砥粒加工学会誌, **61**, 8 (2017) 430.
- 9) 佐野泰久, 有馬健太, 山内和人: 触媒表面を基準面とする化学研磨法の開発, 砥粒加工学会誌, **61**, 8 (2017) 426.
- 10) 坂本武司, 山口桂司: UVアシスト研磨による超平滑加工, 砥粒加工学会誌, **61**, 8 (2017) 434.
- 11) C. Wang, S. Kurokawa, T. Doi et al.: The Polishing Effect of SiC Substrates in Femtosecond Laser Irradiation Assisted Chemical Mechanical Polishing (CMP), ECS Journal of Solid State Science and Technology, **6**, 4 (2017) P 105.
- 12) 本明拓也, 金子祥大, 山田洋平, 池野順一: 溶融アルカリ(NaOH)によるSiCの高速鏡面化に関する研究, 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2016) 223.
- 13) 加藤智久: 総論: パワーデバイス用SiCウエーハの加工技術, 砥粒加工学会誌, **61**, 8 (2017) 418.
- 14) 平田和也, 西野曜子, 森重幸雄, 高橋邦充: 新しい加工原理によるSiCのレーザースライシング1: 加工メカニズム, 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2016) 635.
- 15) 橋本洋平, 鈴木教和, 浅羽正和, 樋野励, 社本英二: 研磨パッドの微細凹凸接触を考慮したCMPプロセスのEHL解析, 精密工学会誌, **79**, 1 (2013) 73.
- 16) K. Amagai, K. Kakegawa et al.: Observation and Modeling of Liquid Film Flow on Rotating Disk for CMP Cleaning Process, Proc. of the Int. Conf. on Planarization/CMP Technology, ICPT2015 (2015) 209.
- 17) 黒河周平, 江上和貴, 土肥俊郎, 大西修: CMPコンディショナの砥粒配置とパッド表面状態の解析, 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2012) 75.
- 18) 木村景一, カチヨーンルンルアン・パナート, 橋山雄一, 鈴木恵友: SiO₂系膜のCMPにおける材料除去メカニズムの研究: 第1報 スラリー中のSiO₂微粒子の材料除去作用, 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2010) 147.
- 19) A. Isobe, M. Akaji and S. Kurokawa: Proposal of New Polishing Mechanism Based on Feret's Diameter of Contact Area between Polishing Pad and Wafer, Japanese Journal of Applied Physics, **52**, 12 (2013) 126503-1.
- 20) M. Kitamura, S. Kurokawa, Y. Tokumoto et al.: Proposal of Cleanliness Evaluation Method of CMP Pad and Investigation of Cleaning Effect by the High-Pressure Jet, Proc. of the Int. Conf. on Planarization/CMP Technology, ICPT2015 (2015) 24.
- 21) 精密工学会 プラナリゼーションCMPとその応用技術専門委員会, <http://www.planarization-cmp.org/>, (2018).



黒河周平

九州大学大学院工学研究院教授。1992年九州大学大学院工学研究科生産機械工学専攻博士後期課程修了。同年九州大学工学部採用。1994年同助教授昇任。2007年同准教授を経て現在教授。1998年ドイツ連邦共和国アーヘン工科大学客員研究員。日本機械学会フェロー。博士(工学)(九州大学)。