

半導体基板の超精密加工/CMP 技術と将来型加工プロセスのブレークスルー

九州大学 グローバルイノベーションセンター 土肥俊郎

Breakthrough technologies in the ultra-precision polishing/CMP for semiconductor substrates and its machining process

Global Innovation Center(GIC), Kyushu University Toshiro K. Doi

An innovative polishing method is proposed herein for hard-to-process semiconductor substrates in the fabrication process of next-generation-green devices such as SiC, GaN and Diamond. Our polishing method features two main technologies. One is a breakthrough polishing pad, "Dilatancy pad", composed of special fillers and viscoelastic materials, which is integrated into a high speed/pressure processing machine equipped with a bowl feed method. SiC substrates have been subjected to the experiment using this innovative machine with dilatancy pad, and found excellent in both efficiency and quality in any processing conditions. The other is a cutting-edge plasma fusion CMP technology, a combination of CMP and Plasma-CVM, developed especially for a realization of high efficiency and high quality processing of diamond substrates as such substrates are extremely difficult to achieve high quality processing however even improved processing conditions are applied to. It is our hope that this breakthrough processing technology could contribute to the fabrication of future-oriented intelligence opto-electronics devices.

1. はじめに

半導体産業も 90 年前後までの世界を先導していたあの活力が“今は昔”の遠い話になったように響く。LSI デバイスの配線多層化における平坦化加工処理に、CMP (Chemical Mechanical Polishing) 法を先駆けて導入したのは“ものづくり立国”日本ではなかった。米国の先駆的かつ地球発想が、今や中国、シンガポール、韓国を含めたアジアの国々でも沸々と沸き立っているなかで、過去の苦い同じ轍を踏むことなく、今、日本の半導体産業の再生を目指して努力をしなくてはならない。ムーアの法則が基になっているという“シンギュラリティ (技術的特異点)”が 2045 年に想定され、人類の生活を根本的に変える「情報革命」が訪れ人類が経験したことのない人工知能の世界の幕開けと言われている¹⁾。いうまでもなく、それは半導体産業が必須・基盤となる。

そういったことをも念頭に、半導体基盤技術の一つと位置付けられるシリコンデバイスにおける平坦化 (Planarization) CMP (Chemical Mechanical Polishing) を中心とする今日の課題と、将来デバイスに不可欠の超難加工材料/化合物半導体やダイヤモンド基板の高効率加工プロセスについて考え将来に備えたい。私見を交えながら、多くの山積する将来的課題を乗り越えるブレークスルーについて考察し、それが将来にかける加工技術の提言・指針の一助となればこの上ない。

2. LSI デバイスに関わる平坦化 CMP の発展経緯、そして 3D-IC 並びにポスト Si デバイス動向

20 世紀における研磨技術は、1947 年に発明されたトランジスタの登場によって大きく進化した。従来の機械的研磨作用のみでは Ge や Si などの半導体結晶を平滑な無擾乱鏡面に加工することが困難であって、結晶が有する特異な特性を發揮できず化学的 (溶去) 作用を複合化したのであった。この化学的複合研磨が 1960 年代中頃に米国 IBM, ベル研究所などから提案された CMP、MCP (Mechano-Chemical Polishing) であって 1970 年代以降に急速に発展した。超精密 CMP 技術は高品質・半導体シリコン (Si) による IC, LSI, 超 LSI デバイスの超高密度・微細化と大口径ウエハ化に併せて、CMP 技術は極めて重要な役割を担う一方、驚異的進化を遂げた。1980 年代には CMP 導入による半導体 Si 基板の超精密加工プロセスはアトミックオーダーの平滑・無擾乱鏡面・高精度平坦化を成し遂げ一層高度化・洗練された。その実績は多くの他材料への超精密加工する際の加工法・条件モデル/模範となって大きなインパクトを与えてきた。

1990 年代になると超精密 CMP 技術の実績から、超 LSI デバイスの多層配線用の平坦化加工処理法に 응용された。この平坦化 CMP 技術は今や不可欠の重要技術と定着し、装置のほかパッド、スラリー、洗浄、制御・計測 (エンドポイント検出含む) などの多方面にわたる要素技術の発展を促しつつ大きなビジネスチャンスを与えることとなった。さらに配線メタルに Al 合金から Cu 配線が採用されると埋め込みダマシ配線が一般化して電気めっき技術とともに CMP 技術はさらに高度化し、装置であれ消耗品であれ、日本人のものづくり“匠の技”を發揮するに至った。

ITRS ロードマップにあったように、超 LSI の超微細化・高密度化が進む状況の中で一つの大きな壁に打ち当たる。配線パターン幅が微細化され MPU ゲート長 10nm 以下を狙うとき、露光の波長を

パターンに合わせて小さくしなければならず、EUV をも用いなければならず技術的・コスト的にも限界に達する。そこで、Moore の法則に従った集積度の向上を狙うのではなく別方向の考え方も出てきた。それが“More than Moore”であって、三次元的デバイス (3D-IC) はじめ DRAM やフラッシュメモリに代わる新規不揮発性メモリ²⁾、電源効率の向上を狙う高周波パワーデバイス、白色 LED、新奇 MEMS、量子デバイスなどの研究開発である。そこに登場するのが、Si の物性限界を大幅に打破できるポスト・シリコン/或いは次世代 LED と言われている次世代型半導体材料 SiC や GaN である。これら結晶基板を用いると、様々な特異な優れた耐電界、耐温度等の耐環境性を有し、高耐圧超低ロスのパワーデバイス・高周波デバイス、超高速電子デバイスや高効率・長寿命の青色や緑色の発光ダイオード (LED)・レーザダイオード (LD) などの実現が可能となる。さらに、特に将来型の究極的デバイスあるいは前述のシンギュラリティ問題¹⁾に最有力の半導体ダイヤモンド結晶が、夢のグリーンデバイスとして期待されている³⁾。

3. 超難加工基板の高効率加工に向けたブレークスルー

SiC, GaN やダイヤモンドなどの結晶基板は極めて硬く化学的にも安定しているため、Si 基板のように単純に化学的複合加工/CMP で高能率加工は極めて困難である。機械的に極めて硬いので粗加工・前加工にはダイヤモンド粒子を適用せざるを得ない。続く仕上げ加工ではコロイダルシリカで無じょう乱鏡面にしようとしても、Si 基板の加工プロセスの数 10 倍以上、ダイヤモンド基板に至っては数 100 倍以上の長時間を要するのが実情である⁴⁾。

これら超難加工材料の製造プロセスの中で、コロイダルシリカによる最終仕上げ工程が律速となる。そのために、コロイダルシリカのようなスラリーの改良を図ろうとする。他方、その直前の加工で表面粗さやスクラッチや加工変質層が僅少化できる加工法・条件を確立し、コロイダルシリカポリシングで除去すべき量を徹底的に低減して負担軽減する考え方もある。

ところが、加工条件の改善だけでは高効率加工が極めて困難である場合がある。とくにダイヤモンド基板の加工に対しては、単純な砥粒加工法では生産ベースに見合う高効率化は不可能に近い。この場合は、新規加工法導入による挑戦的加工プロセスを考案・構築せざるを得ない。

以上の基本的考え方を踏まえて、筆者らがやっている事例を紹介する。

3.1 加工条件改良型の加工プロセス⁴⁾

単純に難加工性材料の高能率加工には高圧・高速回転を可能とする加工装置の開発がよい。筆者らは通常の加工装置の出力負荷に比べて 10 倍前後 (加工圧力 P: 1MPa, 回転数 v: 1,000 min⁻¹) に相当する装置を設計試作した。加工負荷 pv を高くすると、パッド面の温度が上昇するので、冷却のためだけではないが液中加工方式を導入している。開発当初の狙い通り、加工負荷 (pv) 増加とともに安定して加工レート上昇を確認している。

前述のように、高能率・最適加工プロセスの構築でもう一つ重要なことは、仕上げ工程における除去量 (加工時間) の僅少化を図り負担軽減できる直前加工法を構築することである。筆者らは現状のメタル定盤に代わる新しい概念の粘弾性樹脂パッド“ダイラタンシー・パッド” (商標登録) を考案した。このパッドによ

て加工能率の増大化のみならず加工面の品質、形状精度など同時に向上を成し遂げる“スマート加工”を提案した。考案したダイラタンシー現象を発現するダイラタンシー・パッドを適用すると、従来パッドの数～20倍以上の加工レートと良好な加工面が得られる。飛散スラリーによる加工能率低下を抑制対策として疑似固定砥粒加工形態とし、加工点における通過粒子数（作用砥粒数）を多くして加工能率を著しく向上させることができる。基板表面のスクラッチ数を調べると圧倒的にスクラッチの少ない高品位面である。さらに TEM による加工ダメージ（加工変質層）深さ評価によれば、メタル定盤の約 1/10 と大幅軽減が達成されていることを確認している。

以上から、仕上げの直前工程の加工条件改良型の加工プロセスによって、仕上げ加工（コロイダルシリカによる超精密加工）工程に負担をかけない中間加工プロセスを構築できたので、加工全体のプロセス時間を大幅に短縮することを実現できる。

3.2 革新的将来加工プロセスの構築に向けて⁵⁾

将来型超難加工材料に対する超精密加工プロセスの考え方は、高能率・高品位加工を可能にする CMP と P-CVM (Plasma-Chemical Vaporation Machining) を融合した加工法である。すなわち、ポリシング/CMP などによって疑似ラジカル場を形成させながら平坦化加工 (in-situ 疑似ラジカル形成と平坦化加工) を施すと同時に、等方性の高能率エッチングを加工原理とする P-CVM による無歪加工を行う。その際、 O_2 , SF_6 などの反応性ガスの雰囲気下における CMP と P-CVM の融合作用によるシナジー効果を期待して高効率・高品位化を図る。この考案加工法を“プラズマ融合 CMP (plasma-fusion CMP)”法 (商標登録) と呼称する。

これまでに A タイプ (基本型プラズマ融合 CMP 装置) と B タイプ (挑戦型プラズマ融合 CMP 装置) の 2 機種を開発している。前者は、CMP 用定盤とその中央の開口部に P-CVM 用のライン状大気圧プラズマ発生部を配置し、CMP と P-CVM をサイクリックに交互加工実施するタイプである。

B-type の in-situ 将来型融合加工装置は、等方性エッチング P-CVM 法に微細な凹凸解消 CMP 法を想定した場合、定盤/研磨ヘッドの回転運動中に加工基板に対して連続的かつ均一にプラズマを発生させる必要がある。プラズマ発生マイクロ電極を多数内蔵させた定盤 (パッド) を、加工基板に対して高密度のプラズマが作用するように設計し、CMP 用スラリーが該電極には入らないようにプラズマ用ガスで制御する構造としている。プラズマ融合 CMP 装置により SiC, GaN 基板の加工を試みたところ、CMP 単独、P-CVM 単独加工の相和よりもはるかに大きな加工レートが得られた。表面粗さは、加工条件の適正化により向上できる。

ダイヤモンド基板の検討では、作用プラズマ密度を高めるため、高投入電力、マイクロ電極との間隙ならびに反応ガスについても検討を行っている。想定通り O_2 を反応ガスとして用いた場合のダイヤモンド基板の P-CVM 加工では、 SF_6 ガスによる加工よりも加工レートと表面粗さ Ra の改善率がともに高く、酸素プラズマの方がダイヤモンドの加工に適す。その一例を紹介すると、CMP 単独では加工レートがほとんどゼロ (1.9nm/hr) であるが、P-CVM と CMP を同時に行うプラズマ融合 CMP 加工ではシナジー効果が発揮された高い加工レート (670nm/hr) を得ている。これらの結果から、開発したプラズマ融合 CMP 加工は、CMP による平坦化性能と P-CVM による高効率エッチングの利点を反映し、ダイヤモンド基板であっても高効率・高品位の加工を実現できることを実証した。今後、さらに詳細が実験により加工メカニズムを追究し汎用性ある超難加工材料の将来型の加工技術として確立していく。

4. 革新的オプトエレクトロニクス部品創出に向けて

21 世紀に入って各方面でテクノロジーが突出され、思いつくまに MEMS センサー、自動運転、IoT, AI, 3 次元デバイス・実装、ロボティクス医療機器、3D プリンティング、等々、多くのキーワードを上げられる。これらオプトエレクトロニクス分野は先進諸国を中心に開発競争が激しいが、その革新的部品製作には特に半導体デバイス応用が付き物であって超精密加工技術の適用を必須とする。半導体産業分野を例に平坦化 CMP に代表されるように超精密加工技術を例に考えると、将来の高性能デバイス創製の鍵を握っていることは間違いないが、さらに 3D プリンティングの後処理加工⁶⁾を含めて 3 次元的な任意曲面加工技術も必要となる。

現在精力的に進められている 3 次元デバイス・実装を例にする

と、機能性材料の平坦化 CMP による超薄膜化した 3 次元デバイス概念が以前から提案⁷⁾されてきたが、将来的には異種機能性材料基板の超精密接合が必須となる。そのためにもますます超薄膜化を可能とする超平坦化 CMP を中心とする超精密加工技術が不可欠である。いろいろな材料を適用するこれからの高性能半導体デバイスは、SOC (System on Chip) と SiP (System in Package) の融合に象徴される高機能化に進むことは間違いない。前述したシンギュラリティ¹⁾を見据えれば、回路機能ブロックの立体配置化を提唱していた CUBIC (Cumulatively Bonded IC) デバイス⁷⁾の概念を深化させて、図 1 のような時空を超越するような第 3、第 4 の Future breakthrough 軸から人工頭脳 (知能) 化へと一層深化すること、これが革新的なオプトエレクトロニクス部品・システムと想定する。つまり、3 次元デバイス・実装概念がベースとなって、さらに超高速・超高性能・知能化して人間の“脳”に近づけようとする構想図である。究極のデバイスとしてここでも平坦化 CMP、特に SDT-CMP (Silicon Device-Thinning CMP) と自由曲面加工、そして大口径基板の超精密接合技術⁵⁾などを駆使・適用してなければ薄膜化デバイスの積層を実現できるものではない。

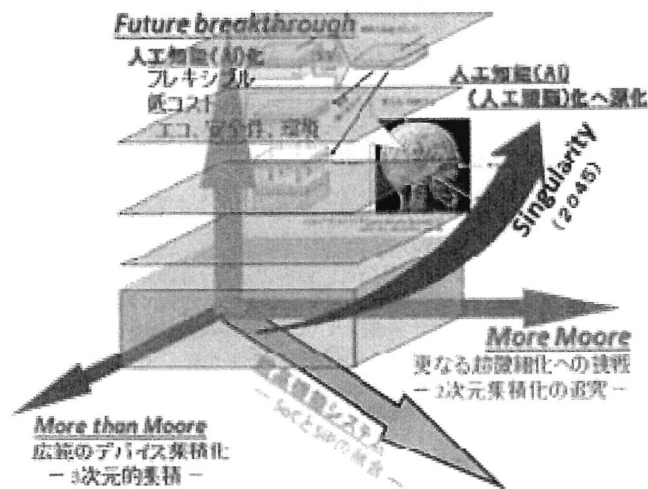


Fig. 1 Image of breakthrough advancement toward intelligence semiconductors beyond the space-time Moore's Law

以上のことを想定して、ポスト・シリコンの SiC, GaN や半導体ダイヤモンドのような超難加工・超高価の機能性材料を低コストで高効率・高品位に創製できるように、「スライシングから中間加工、仕上げ加工と洗浄」までの全体の加工プロセス構築が急務である。それぞれの加工工程での“カーフロスゼロ・極限的除去量僅少化で高精度・高品質化を高効率で成し遂げる”ことが課題として付き纏う。異種材料の高精度ボンディング (接合) 等を確実に可能となれば、新たな微小な高性能デバイスが実現できよう。今後とも考え抜いて飽くなき挑戦をしたいところである。

5. むすび

本稿では半導体デバイスに関わる超精密加工/CMP 技術とその変遷について考察・整理をして、次世代デバイス用の SiC, GaN やダイヤモンド基板として脚光を浴びている超難加工材料の高効率加工プロセス設計に対する考え方について述べた。そして超難加工・超高価の半導体基板を例に革新的加工技術へのブレークスルーに挑む筆者の研究事例を紹介し、将来登場してくるであろうデバイスについて言及した。

今後のオプトメカトロニクス部品あるいはシステムの開発に対応して、より高度な超精密加工プロセス技術の確立と新たなブレークスルーが極めて重要なキーとなることを認識しなければならない。

(参考文献)

- 1) R. Kurzweil: The Singularity is Near (翻訳版, NHK 出版 (2010))
- 2) Y. Matsui: Proc. of ICPT2014 (in Kobe) p. 14
- 3) 赤崎、松波: ワイドギャップ半導体、培風館 (2013)
- 4) T. K. Doi et al.: ECS J. Solid State Sci. Technol., 5, (10) (2016) pp.598-607
- 5) 土肥ら: 月刊トライボロジー, 351, 11 (2016) pp.14-18
- 6) 木下: 2017 年精密工学会春季大会論文集・キーノート
- 7) 土肥: 光技術コンタクト, 48, 1 (2010) p. 16