

スーパースムーズ鏡面研磨と P-MAC ポリシング

河 西 敏 雄

埼玉大学大学院理工学研究科 ☎ 338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255

(2000 年 12 月 14 日受理)

Ultraprecision Polishing for Super Smooth Surface and Newly Proposed P-MAC Polishing

Toshio KASAI

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University
255 Simo-okubo, Urawa, Saitama 338-8570

(Received December 14, 2000)

A definition of super smooth mirror surfaces was given first. On such smooth surfaces the texture as surface roughness is considered to be of the size of surface atoms, provided that there are crystalline terraces but not strain and stress of the damaged layer caused by material processing. Mechanism of material removing in the ultra-precision polishing to reach such a super smooth mirror surface and suitable methods and conditions for the minimization on surface roughness were described, and some examples of such polishing technology were explained: ordinary optical glass surfaces were finished to less than 0.5 nmRy roughness under an improved pitch-polishing. The detail of newly proposed P-MAC (Progressive Mechanical and Chemical) polishing is also described. In this polishing, an abrasive free condition is adopted and the stock removing from work surface accelerated by the chemical reactions accompanying the friction with a closed contact/semi-contact condition between work and polisher surfaces in first step. After removing the ups and downs on surface roughness of work, polishing condition shifts to non-contact condition as second step. By using Br-methanol solution and soft fluorocarbon foam polisher, less than 0.5 nmRy in surface roughness was attained with GaAs wafer surfaces.

1. は じ め に

加工技術は、素材・部品・システムなどの高品質化、高機能化、高性能化と共に進歩してきた。研磨技術も例外ではない。ルネッサンスの頃の天体観察や微生物観察のための精度を有する光学部品の研磨の技法は、学問としての光学の発展に大きく寄与し、また、光学の要請に応えるべく技術の高度化も大幅に進んだ。現在では、それらが基礎になって完成度の高い光学部品・システムを容易に入手することができる。また、光も可視光から短波長寄りの光学部品が要求されるようになり、それらに応えるスーパースムーズ鏡面を仕上げる加工技術の新展開が始まったのも確かである。

近年になり、研磨技術は半導体デバイスや水晶共振子

など光学部品と異質な新機能を持つ部品製作にも適用されるようになった。最先端の加工技術に「超精密加工」という名称がつけられたのが 1960 年代になってからであり、従来加工法の加工原理や材料除去メカニズムが見直され、技術改善や新加工原理に基づく新たな加工技術の提案が行われてきた。それらの中でも研磨技術は高精度・超精密さという点で最も優れた加工法であり、そこからスーパースムーズ鏡面を仕上げる様々な超精密研磨技術が生まれている。

この超精密研磨技術は、最先端部品・システムの機能・性能を満たす加工技術・生産技術として応えていくものでなければならない。ここではスーパースムーズ鏡面を仕上げるための基本とその応用例を述べる。

2. スーパースムーズ鏡面の定義

最初に、超精密研磨で得られる高品質、かつ、超平滑

なスーパースムーズ鏡面について定義する。加工物が単結晶であれば、最高級の研磨面は全面にわたってシリコンのへき開面の STM (Scanning Tunneling Microscope) 像のように球形の原子が規則正しく配列した凹凸波形のプロファイルをもつ表面に仕上がると考えられる。もちろん多数個の原子配列でとらえるならば階段状に並んだテラスの表面状態も想像できる。仮に、触針式の表面粗さ測定機による表面プロファイルを見ることができたとすれば、原子が密に配置されている場合、表面の凹凸は原子の大きさあるいはその数分の 1 といった微小高さ、表面粗さ凹凸の最大高さで 0.1 nmRy 台になる。また、多結晶材料を研磨した場合、個々の微小結晶については同様であり、それぞれの結晶が勝手な結晶方位にあっても結晶間の加工され易さの違いに原因する段差発生がない。これが非晶質材料になって原子の配置が不規則になって多少大きな凹凸が形成されても原子の大きさに留まる。スーパースムーズ鏡面は理想的な平滑面であり、加工物の材質の相違により表面粗さの大きさに違いが生じるものの、その微小凹凸は極限に近いものとする。

一方、実際の研磨について取り上げてみる。材料除去に関しては、原子・分子の最小単位の小規模のものからそれらの集団の塊状になった大規模のものまでである。砥粒や砥粒を埋め込んだポリシャの凸部の運動軌跡に沿ってこの材料除去が進行すると考えれば、表面構造は田畑のような連続した畝や回折格子のような方向性をもつ凹

凸、全方向からの運動軌跡の交差を考えに入れるとピラミッドや円錐が並んだような凹凸になる。研磨面には、このような材料除去の痕跡のほか、原子配列の乱れや応力層といったいわゆる加工変質層が表面の数原子層から数百原子層にも及ぶ可能性がある。スーパースムーズ鏡面は、このような加工変質層の存在も皆無と言える。

スーパースムーズ鏡面については、このように容易に定義付けができる。しかし、それを実現するとなると研磨条件設定で様々な妥協を行わざるを得ず、その実行を難しいものにしている。

3. 研磨の高度化・超精密化

高精度・超精密な研磨技術の検討を進める場合、1 高品質の仕上げを狙った材料除去メカニズム、2 高精度の形状寸法を確保するための形状創成原理、3 再現性と加工能率を考慮した加工方法・装置などが研究の対象になる。ここでは、高品質・超平滑な表面を得ることを中心に研磨に関する分析と実用になっている加工法について述べる。

3.1 超精密研磨における材料除去原理

超精密研磨、ポリッシング、ラッピング、砥石研磨といった代表的な研磨の単純化した加工モデルを Fig. 1 に示す。ここでは、ガラスのような硬脆材料を加工物として図示した。砥粒の機械的作用による微小破碎によって切り屑を生成して加工が進むラッピングや砥石研磨は粗面

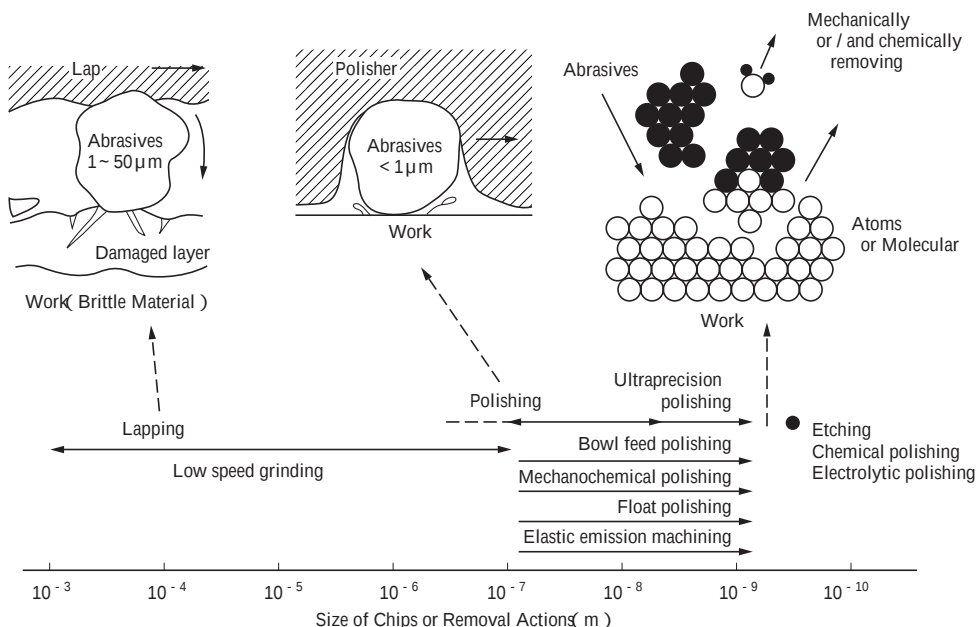


Fig. 1 Models of lapping, polishing and ultraprecision polishing.

研磨である。一方、その機械的作用を小さくし、破碎を伴うことなく鏡面研磨を可能にするのがポリシングや超精密研磨である。特に超精密研磨になると機械的作用が非常に小さく、加工物、切り屑、研磨剤などの間の微小な相互作用も無視できなくなるので、それぞれを原子、分子の集合体で表現した。横軸は加工の単位¹⁾であり、これは砥粒の作用深さや切り屑の大きさに該当する。

超精密研磨は、切り屑生成の規模が非常に小さく、結果として加工量が大きくとれないのが普通である。したがって、部品加工の際には、前加工のラッピングなどを終えた粗面から直ちに超精密研磨を開始するようなことは行われていない。必ず従来からのポリシングや特別の場合にはエッチングを行い、あらかじめ表面粗さや加工変質層深さの微小化、表面汚染の除去などを済ませておいて、所定の条件の超精密研磨によってスーパースムーズ鏡面を得るのが普通である。

ポリシングにおける鏡面化のメカニズムについては、古くから、1 機械的な材料除去、2 表面の塑性流動、3 化学的作用などがあげられてきた。現在では、加工物の性質や研磨条件によってこれらが複合した形で研磨が進んでいると解釈している。

Fig. 2 は、研磨のメカニズムについて説明するために準備したものである。加工は、(1) 機械的作用と、(2) (電気)化学的作用によって進み、機械的作用には、(a) 引き掻いて削り取る除去作用と、(b) 原子の配列を乱す摩擦作用があり、(電気)化学的作用には、(c) 溶去作用と、(d) 皮膜形成作用がある²⁾。これらの複合化によって様々な研磨法が成り立っていると解釈できる。各種研磨法の配置は大凡の見当でとりあえず配列してみた。

多くの研磨法は Fig. 2 の上半分にある。シリコンウエハの湿式メカノケミカルポリシングの場合、0.01 μm 台

の SiO_2 砥粒を弱アルカリの溶液にコロイド状に分散させた研磨剤と軟質発泡ポリウレタンで覆われた軟質なシート状のポリシャが用いられる。研磨運動でウエハとポリシャの間にハイドロプレーン現象によって研磨剤層が形成され、一方ではその研磨剤層が薄くなるように研磨圧力を付加しつつ擦り合わせる。その際、化学作用による軟質な水和膜の形成とポリシャや研磨剤による機械的な水和膜の除去の双方の作用が存在する³⁾。このような皮膜形成とその除去が組合さった鏡面研磨のメカニズムは、GaAs などの化合物半導体ウエハ、ガラスレンズ^{4, 5)}、金属製品などの鏡面研磨でも通じるところがある。Fig. 3 は、凹凸をもつ加工物表面に皮膜が形成され、特に凸部では皮膜除去と皮膜形成が積極的に繰り返されて平滑化が進むことを示しており、皮膜形成についても水和膜

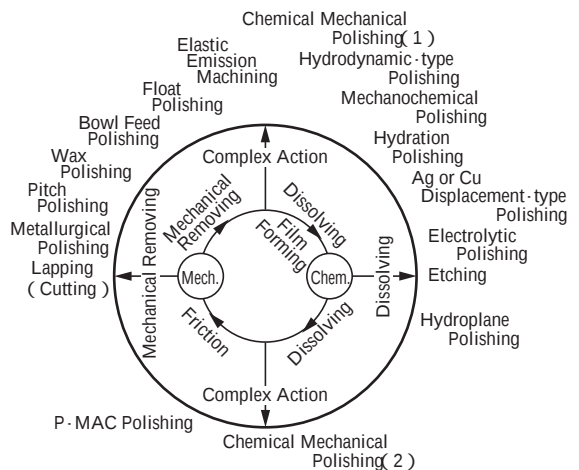


Fig. 2 Material removing mechanisms and polishing methods.

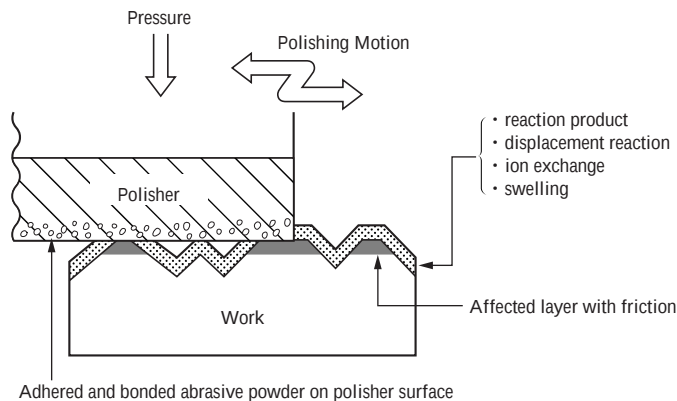


Fig. 3 Surface-smoothing model accompanying with soft film forming and mechanically removing.

に限ることなく様々な皮膜や変質が考えられる⁶⁾。

3.2 研磨面の表面粗さの微小化について

スーパースムーズ鏡面を狙うポリシングの場合、先に述べた表面構造を細かくする方法として、多くの場合、微細砥粒や肌理の細かなポリシャを採用している。光学結晶の LiTaO_3 単結晶や TeO_2 単結晶のピッチポリシングの際に、乾燥した粉末状の砥粒を蒸留水に分散して15分ごとの短い時間間隔で供給した。研磨面に砥粒特有の大きさの凹みが線上に載って点在しており、それらが塊状に凝集した砥粒によって傷つけられた結果であることが判明した。Fig. 4 (a), (b) は微細化し易いベンガラと比較的粒子が大きい酸化セリウム砥粒による研磨面のノマルスキータイプの微分干渉顕微鏡写真である。ベンガラによる凹みの大きさは酸化セリウム砥粒に比べ明らかに小さい⁷⁾。

ここで特に強調したいのは、研磨剤中の大きな粒子の混在やポリシャへの塵埃などの付着が研磨面に凹みを作り、品質劣化を招くことである。研磨装置の設置環境が悪いと、塵埃がポリシャに降り注いで時間と共に加工品質を悪化させる。また、研磨装置の精度に原因する機械振動やポリシャ面の振れは、研磨の際の機械的作用を強調するように働きかけ、加工欠陥の生成を高める原因になりかねない。

Fig. 5 (a), (b) は、研磨における表面粗さ形成の加工モデルである²⁾。微視的な領域において砥粒はポリシャ側に押し込まれ、同時に加工面側にも押し込まれる。双方に対する押し込み深さは単純にそれぞれの材料の硬さに支配されると仮定するならば、引っ掻きの交差で形成される表面粗さは $R_y = f(d \cdot H_p / 4 H_w)$ で表わせる。 d は砥粒の大きさ、 H_p と H_w はそれぞれポリシャと加工物

の硬さに相当する。塵埃など大粒の粒子が研磨剤に混入していれば研磨操作が周期運動で進められるので、無数の引っ掻き痕で形成される表面粗さが大きく現れることは理解できよう。ポリシングにおける加工のメカニズムには様々な解釈がある。化学作用の存在が無視できない場合でも、砥粒の機械的作用が表面粗さ形成の主要因であればこのようなモデルの説明でも矛盾がないと思う。

次に、砥粒が非常に微細になると砥粒の大きさよりもポリシャの凹凸の大きさの方が無視できなくなる。その加工モデルは Fig. 5 (b) のようになる。既に平面に仕上がった研磨面が凹凸をもつポリシャ面に押し付けられて研磨される場合である。研磨面はポリシャ面が平面にならって発生した微小圧力偏差の下で擦られる。その交差によって形成される表面粗さは $R_y = f(h_p / \zeta)$ で表わせる。 h_p はポリシャ面の凹凸の高さ、 ζ はポリシャの弾性変形定数に相当する。微細な砥粒を選択した超精密研磨になると、凹凸のないポリシャあるいは仮に凹凸があってもそれによって圧力偏差が生じないような微小領域で軟質なポリシャが必要と言える。

粗面から鏡面を仕上げていく過程を考えると、ポリシャ面に当初から凹凸があっても最終的に平滑に変化し得るものであれば良好な鏡面に仕上がる可能性がある。その代表的なポリシャ材料はピッチであり、ワックスもそれに準じる。ピッチポリシャは加工物の凹凸の状態に従って変化しており、ニュートンの時代から現代まで長年ポリシャの王座にあった理由でもある。最近では、様々なプラスチックがポリシャに適用される。多くの場合に経済性が考慮されて耐摩耗性が優れるもの、粗面からの鏡面化が速いものなどが選択される。超精密研磨に必要なプラスチックポリシャについては、1 モノマーとして

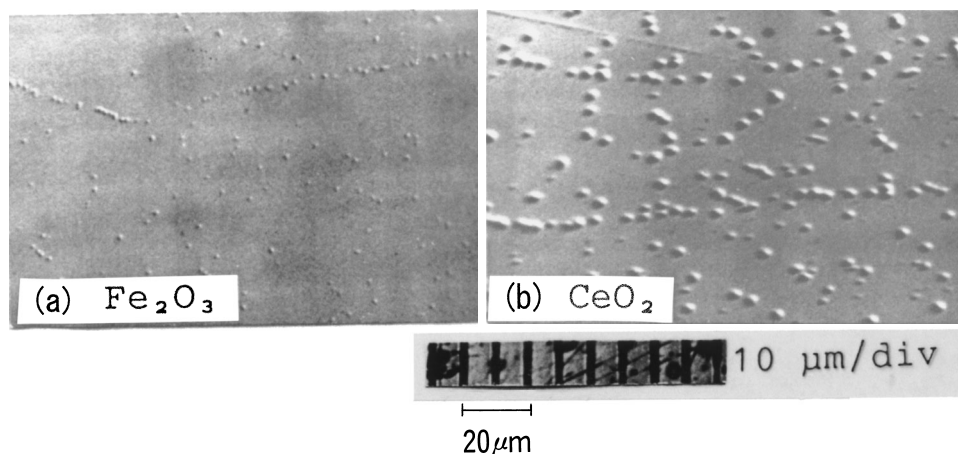


Fig. 4 Microphotographs of pitch-polished LiTaO_3 surface with (a) red rouge (Fe_2O_3) and (b) cerium oxide (CeO_2) powders.

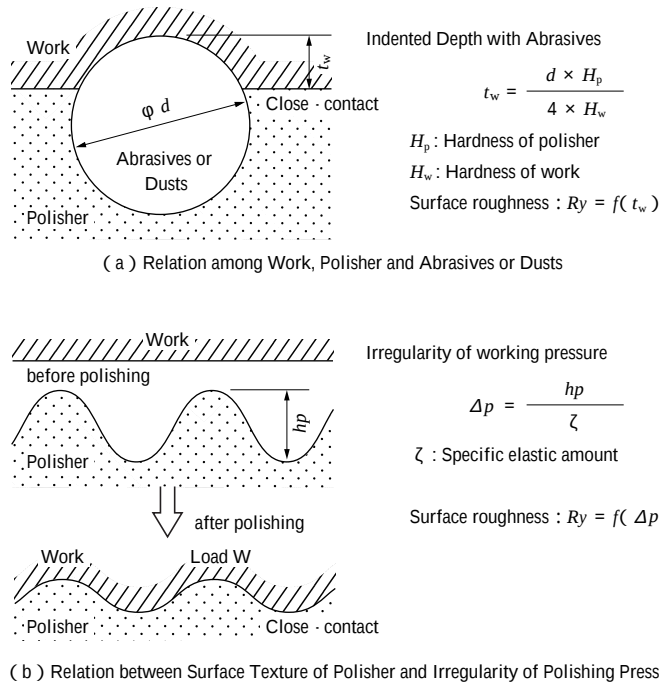


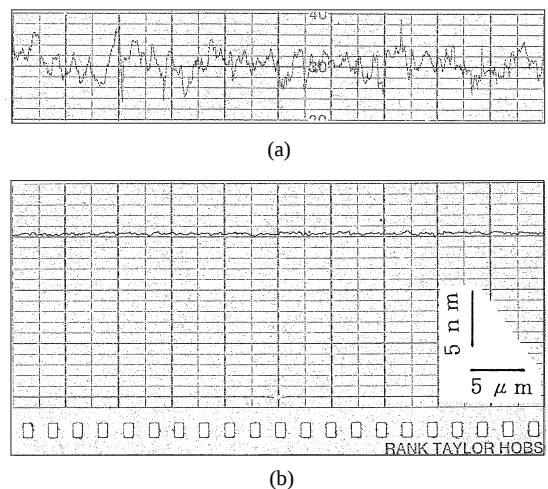
Fig. 5 Basic formation models of surface roughness.

の原料段階に塵埃を含まないこと、2 表面の微視的な領域で軟質であり、それがポリシャ全面にわたって均一であること、3 表面の凹凸が非常に小さく、できるならば研磨の過程においても研磨面の状態変化にならって平滑になり易いことなどをあげることができる。シリコンウエハの最終研磨用には、このような条件を充足する軟質ポリウレタンシートが採用されている。

3.3 超精密研磨例

光学ポリシングを研磨の基本原理とし、技術改善が行われ、また、派生した様々な超精密研磨を Table 1 にまとめた。実用になっているおもなものについて簡単に説明する。

ガラスレンズなどの光学ポリシングでは、ピッチポリシャを準備する際に研磨剤の供給源と逃げ場になる網目状の溝形成に 1 mm 前後の綿糸でできた網が使用されてきた。塵埃の持ち込みがあり、それを避けて高度化を図るために新しい方法採用してみた。ピッチの下地になる金属プレートに予め 4 mm² の碁盤目状に幅 1 mm、深さ 1 mm の溝加工を行い、その面を平面など必要な形状に研磨し、加熱して熔融状態のピッチを均一に塗り付けてポリシャにした⁸⁾。微細砥粒には、7 nm-SiO₂ 砥粒を用いて超精密研磨を行った。Fig. 6 (a), (b) は、BK 7 ガラスの超精密研磨の結果と比較のために酸化セリウム砥粒で研磨した結果の表面粗さプロフィールである。両者の

Fig. 6 Pitch-polished optical glass (BK 7) surfaces with (a) cerium oxide (CeO₂) and (b) 7 nm-SiO₂ powders.

間には歴然とした差が生じており、超精密研磨面の表面粗さは、0.5 nmRy 以下である。

酸化セリウム砥粒など市販の砥粒の微細砥粒だけを用いる方法に液中研磨法がある。加工物とポリシャを容器の中で研磨剤に浸した状態で擦り合わせる方法を探り、細かい浮遊した砥粒で研磨する。溶液も十分存在し、冷

Table 1 Some kinds of ultra-precision polishing.

		Property of Processing	Application
Mechanical action	Conventional lapping	By using Al ₂ O ₃ or SiC abrasives and cast iron lap, or CeO ₂ powders and pitch or plastic polisher, and lens lapping & polishing machine or conditioning ring type lapping machine	Glass lens or prism
	Conventional polishing		
	[Improvement of optical polishing]		Quartz plate, Laser rod Optoelectronic devices X-ray mirror Large telescope mirror
	Advanced polishing	Suppressing mechanical action and dust influence by adopting very fine abrasive powders, soft polisher and (ultra) pure water	
	Bowl feed polishing	Work and polisher being in slurry for suppressing mechanical action or impact and temperature rise	
	[Using flow effect of slurry]		X-ray mirror Optical grade dies Glass plate Ferrite
	EEM (Elastic Emission Machining)	Mild stock removing action with abrasives in hydrodynamic flow of slurry around ball tool	
	Float polishing	Stock removing action with abrasives in hydrodynamic flow of slurry on flat polisher	
	[Removing chemical reactive products]		Si wafer GaAs wafer
	Mechanochemical polishing (wet)	Growing and removing reactive products as hydration film under wet condition	
Chemical action	(dry)	Peeling off reactive product film with 0.01 μm SiO ₂ powder under dry friction condition	Sapphire Si ₃ N ₄ ceramic
	[Using chemical removal]		GaAs wafer InP wafer CdTe wafer ZnSe wafer
	Disk-type chemical polishing	Chemical removing with friction by using non-abrasive chemical solution and non-woven fiber sheet	
	Hydroplane polishing	Chemically removing with non-abrasive chemical solution layer between work and polisher	
	P-MAC polishing	Chemically removing by using non-abrasive chemical solution and fluorocarbon form polisher. Working conditions change as polishing advances	

却効果や緩衝効果もあり、高品質の表面を得ることができる^{9, 10)}。

一方、軟質なポリシャを用いてポリシングを行うことが高品質の研磨を実現する上で重要であることも述べてきた。ピッチや合成樹脂などに比べ、更に軟質なポリシャ材料で極端なものをあげると液体や気体が該当する。EEM (Elastic Emission Machining¹¹⁾、フロードポリシング¹²⁾などは液体をポリシャのような工具と見立てた研磨法と言える。すなわち、研磨剤の流れの中で比重の違う微細な砥粒が研磨剤の流れの流線から外れて加工物を浅く擦過する機械的作用で材料除去を行うことができ、化学的溶去と同様の原子・分子のオーダの加工単位と考えている。

シリコンウエハの湿式メカノケミカルポリシングでは、 SiO_2 砥粒のコロイド状研磨剤と軟質発泡ポリウレタンポリシャを用いる条件によれば、 $1\sim 2\ \text{nmRy}$ の表面粗さに仕上がる。材料除去のメカニズムとして、化学作用による軟質皮膜形成と機械的除去が基本になっており、GaAs ウエハの鏡面研磨では、希薄な次亜塩素酸ナ

トリウム (アンチホルミン, NaClO) 水溶液¹³⁾や亜臭素酸ナトリウム (NaBrO_2) 水溶液¹⁴⁾が用いられる。Ga 化合物皮膜が砥粒あるいはポリシャで拭いとられて高品質の鏡面研磨を可能にしている。

メカノケミカルポリシングには、乾式条件の研磨もある。固体摩擦磨耗の研究から派生した研磨法とも言われ、加工物のサファイヤを $0.01\ \mu\text{m}$ 台の乾燥状態の SiO_2 砥粒を供給しつつ石英ガラスと擦り合わせる方法を採用。この場合、加工物と砥粒の間の固相反応によって軟質な銹物のムライトが生成・剥離して研磨が進む。軟質で微小な SiO_2 砥粒によってダイヤモンド砥粒に優る加工能率と加工品質が得られる特徴をもつ¹⁵⁾。

4. P-MAC (Progressive Mechanical and Chemical) ポリシングの提案^{16, 17)}

全く砥粒を用いることなく超純水だけを用いて通常の研磨用のポリシャと擦り合わせる研磨擬きの摩擦磨耗実験を行うと、軟質な金属銅などを試料 (加工物) にしたとき、必ずやスクラッチの発生に直面する。我々の周囲

にある塵埃は本当に始末が悪い。このような事情を考慮すると前加工の粗面を凸部から除去して平滑にするには、従来の研磨法は確かに有効であるが、更に、高品質の加工になると砥粒の中の大粒子や周囲からの塵埃の影響を排除する条件が必要になってくる。

P-MAC ポリシングでは、まず、材料除去の規模は、機械的作用よりは化学作用による方が概して小さいので、粗面から鏡面に仕上げることも含めて化学作用を利用するディスク式化学研磨方式を採用した。当初、砥粒を用いたときもあったが、研磨に必要な機械的作用は砥粒に頼らずにポリシャとの摩擦に置き換え、その部分を選択的に化学溶去するようにした。更に、研磨中に機械的作用を積極的に変えることから Progressive という言葉を頭に付けた。したがって、Fig. 2 の加工分類によれば他研磨法とかなり異質な研磨法になる。多くの研磨法は円形で示される図の上半分に位置するが、P-MAC ポリシングは下半分に位置する数少ない研磨法である。

P-MAC ポリシングが他研磨法と異なる点について、更に述べてみたい。Fig. 7 は、研磨中の加工物とポリシャの状態について分析・分類したものである。光学ポリシングでは、加工物とポリシャはその間に研磨剤が存在するがポリシャ面の溝が研磨剤の逃げ場となるので「直接接触状態」で研磨が行われる。シリコンのメカノケミカルポリシングは、両者の間に閉じこめられた研磨剤層があり、かつポリシャ面との接触があり、これを「準接

触状態」とみなす。更に EEM やフLOATポリシングでは、両者が「非接触状態」になるような工夫がなされた研磨である。何れも終始一定の状態で研磨が進めるのが普通である。P-MAC ポリシングは、研磨の機械的作用を砥粒なしでポリシャによる摩擦だけで済ませて材料除去を研磨液の化学溶去で行う。「直接接触状態」と「準接触状態」で研磨面の凸部が加工されて平滑になったならば、「非接触状態」に移行し、機械的作用が最小になる研磨液層の剪断とエッチング効果によって加工変質層を皆無に仕上げる過程を踏むものである。

GaAs ウエハの P-MAC ポリシングを Br メタノール溶液を用いて行ったところ、研磨面に Fig. 8 (a)(b)(c) に示すような表面粗さプロファイルが得られた。それぞれ、シリコンウエハのメカノケミカルポリシング用の軟質ポリウレタンポリシャの (a) 新しい凹凸があるポリシャによる研磨面、(b) プレスした平滑なポリシャによる研磨面、(c) 新ポリシャの非常に軟質なフッ素樹脂発泡体ポリシャによる研磨面である。フッ素樹脂発泡体ポリシャによる研磨面は、表面粗さがシリコンウエハの 1/10 の値の 0.1 ~ 0.5 nmRy に仕上がる。なお、材料除去が化学溶去による場合、機械的作用を及ぼすポリシャの表面状態は重要であり、表面粗さに顕著に現れている。

この P-MAC ポリシングは、GaAs や InP など III-V 族化合物半導体ウエハのみならず、CdTe や ZnSe など II-VI 族化合物半導体ウエハにも同様な加工原理による研

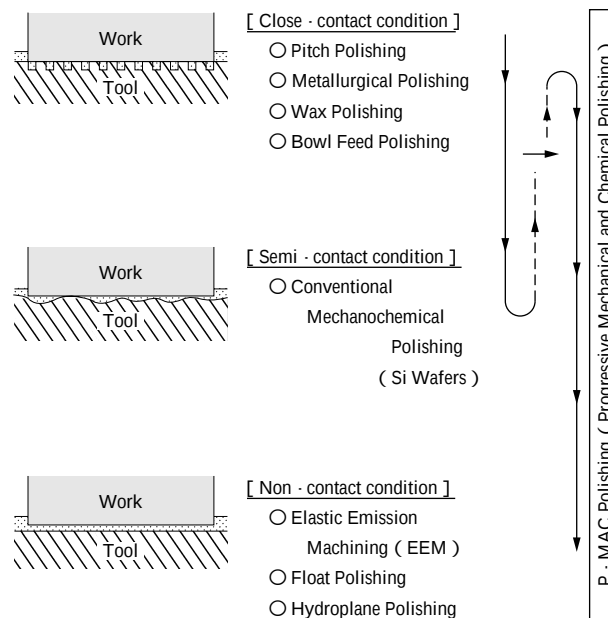


Fig. 7 Conceptual classification of polishing methods and feature of P-MAC polishing.

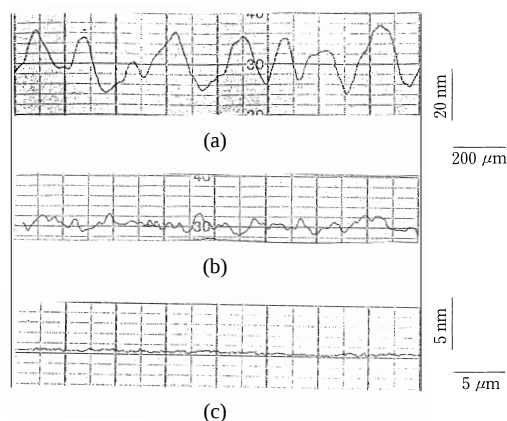


Fig. 8 P-MAC polished GaAs wafer with Br-methanol solution and some polishers. (a) with polyurethane polisher, (b) with pressed polyurethane polisher, (c) with soft fluorocarbon foam polisher.

磨が可能である。また、最近では、金属銅の研磨でも P-MAC ポリッシング条件が見出せそうである。

5. ま と め

光の利用は、遠赤外線、赤外線、可視光線、紫外線、遠紫外線、X線と非常に幅が広い。特にX線の波長は可視光の500分の1にもなる。可視光で鏡面であってもX線になると十分な反射が得られない。しかもシンクロトロン放射光を利用するシステムでは材料の破壊限界に達する高エネルギーを扱うので、加工精度は当然のことながら加工品質の充足も非常に重要になる。

半導体ウエハについては、デバイスの高集積化や微細パタン化とウエハ径12インチの大口径などに応えるべく高レベルの無擾乱・高精度研磨が要求されている。最近では、半導体デバイス製作の終わりの工程で回路を積層するため、ウエハ全面の層間絶縁膜や配線回路金属の

プラナリゼーション研磨が必要になってきた。また、新材料の出現や、高純度化・高品質化・複合化などの材料改善といった材料科学・技術の進歩も著しいので、それらにも十分に答え得る技術としてスーパースムーズ鏡面仕上げのための超精密研磨技術の更なる飛躍が必要になっている。

文 献

- 1) 谷口紀男：“材料科学シリーズ6，材料と加工”（共立出版，1974）。
- 2) T. Kasai, K. Horio, T. Karaki-Doy and A. Kobayashi: Annals of the CIRP, **39**/1, 321 (1990).
- 3) 唐木俊郎：電通研成果報告第21742号 (1984).
- 4) T. Izumitani and S. Adachi: Technical Digest at Topical Meeting on the Science of Polishing, OSA (1984) TuB-A1-1 ~ 3.
- 5) N.J. Brown: Precision Engineering **9**, 129 (1987).
- 6) 土肥俊郎，河西敏雄，中川威雄：半導体平坦化 CMP 技術，工業調査会 (1999) p. 52.
- 7) 河西敏雄：電通研成果報告第13634号 (1979).
- 8) G. Otte: J. Sci. Instrum. **42**, 911 (1965).
- 9) R.W. Dietz and J.M. Bennett: Optical Surfaces **5**, 881 (1966).
- 10) 津和秀夫，肥田 満：機械の研究 **21**, 1380 (1969).
- 11) 森 勇蔵：精密機械 **46**, 659 (1980).
- 12) Y. Namba: Technical Digest at Topical Meeting on Science of Polishing, OSA (1984, 4) TuB-A 2.
- 13) 吉武奉文：2.2.2 III-V 族化合物半導体，機械振興協会技術研究所加工技術データファイル，**9** (1985).
- 14) 土肥俊郎：1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集 (1989) p. 207.
- 15) 安永暢男，小原 明，樽見 昇：電総研報告 **776**, 109 (1977).
- 16) T. Kasai and A. Kobayashi: Technical Digest at Topical Meeting on Science of Polishing, OSA (1984, 4) TuB-A 2.
- 17) T. Kasai, F. Matsumoto, A. Kobayashi: Annals of CIRP, **37**/1 (1988) p. 537.