# 高精度研磨技術指導体制の確立

坂本博宣\*・冨重定三\*\*・川村浩二\* \* 生産技術部、\*\*情報デザイン部

# Establishment of Ultra High Polishing Process for local Industries

Hironobu SAKAMOTO\*, Sadami TOMISHIGE\*\*, and Kouji KAWAMURA\*

半導体や電子部品など高機能部品の超精密研磨技術の指導体制を確立するために、単結晶シリコンウエハー、セラミックスなど硬脆性材料及びステンレス鋼にラッピングとポリシングを施し、研磨面の平面度と仕上げ面粗さを測定した。その結果、すべての被削材で3ナノ(10<sup>-9</sup>m)の仕上げ面粗さと0.3ミクロン(10<sup>-6</sup>m)の平面度の鏡面が得られ、超高精度が要求される半導体基板、電子部品及び光学機器用レンズの研磨技術を県内企業に普及する体制ができた。

### 1. はじめに

近年、情報通信技術の高度化に伴い、光学・電子部 品の小型軽量化、高機能化が著しく、高い信頼性が求 められている。コンピュータの CPU (中央演算処理装 置)やメモリー等の LSI は素子の超高集積化のため、 線幅0.90µm のデザインルールが適用されている。この ため、素子を形成する単結晶シリコンウエハーには、 ナノ(10°m)の超平滑面とミクロン(10°m)の平坦面が 要求される<sup>1)</sup>。従来、各種材料の高精度加工は切削や 研削技術によって行われていたが、ナノオーダの超高 精度の加工には限界があるため、ラッピングやポリシ ングという研磨技術を適用することが考えられる。

ラッピング及びポリシングは砥粒を含んだ加工液を 供給しながら、加工物をラップ定盤に押し付けて、両 者の相対運動差によって加工物表面から超微細な切り くずを除去する方法である。加工のメカニズムが、固 定砥粒やチップに強制的な切込みを与え、工作物から 切りくずを除去する研削や切削と根本的に異なる。本 加工法は超高精度の加工ができるものの、加工能率が 低い、作業性が悪い、加工液処理や粉塵対策が必要で ある等、実用化のためには新たな解決しなければなら ない課題がある。

そこで本研究では、半導体素子の基板として用いら れる単結晶シリコンウエハー、セラミックス、ハード ディスク用石英ガラス、半導体高純度ガス通過用継ぎ 手材ステンレス鋼にラッピング及びポリシングを施し て、加工条件と加工能率及び加工精度との相関を調べ、 加工のメカニズムを明らかにした。

#### 2. 実験方法及び実験条件

## 2.1 実験方法

実験装置として用いた修正リング式ラップマスター (外径 380mm×内径 140mm)の外観を図1に示す。被 削材は、単結晶シリコンウエハー、炭化珪素・ジルコニ ア・窒化珪素・アルミナ系のセラミックス、2.5インチの 石英ガラス及びオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304、SUS316)を用いた。研磨剤として、多結晶ダイ ヤモンド砥粒と水溶性の研削油を混合したスラリーを用 いた。また、比較のため、炭化珪素系の砥粒(SiO<sub>2</sub>)を混合 したスラリーを供試した。



図1 ラッピング装置の外観図

図2に実験の工程を示す。被削材の研磨は、鋳鉄定 盤による粗ラッピング、錫定盤による仕上げラッピン グを行ったあと、ステンレス定盤に研磨織布(パッド) を貼り、粗さ仕上げのポリシングを行った。仕上げ面 粗さは触針式表面粗さ測定機(㈱東京精密製 surfcom 475A)、平面度はレーザ干渉計(富士写真光機㈱製 FIX05)を用いて測定した。

なお、実験前に定盤の平面度を1µm/ 380mm にす



るためにフェーシング作業を施した。鋳鉄定盤では電 着ダイヤモンド修正リングを定盤で回転させた。錫定 盤では単結晶ダイヤモンドバイトを用いて溝加工とフ ェーシングを行い、溝に生じたバリはセラミックス修 正リング(外径 178mm×内径 140mm)を定盤で回転 させることにより除去した。実験の全工程において、 工具及び被削材は純水を用いて超音波洗浄を施した。 2.2 実験条件

表1に供試した被削材、表2にラッピング条件、表 3にポリシング条件を示す。また、定盤のフェーシン グ条件と満加工条件を表4~6に示す。

被削材はステンレス製の貼付け盤にワックス(タイ プ F-1)で接着した。貼付け盤の平面度は5μm/ 380mmに研削仕上げを施し、ワックスの厚さムラが加 工精度に影響しないようにした。

ラッピング装置の主軸回転数は40,60,100/min<sup>-1</sup>、荷 重は50~100kPa、修正リングの回転数は40,60/min<sup>-1</sup>と した。加工点へのスラリーと潤滑油の供給はそれぞれ 2秒間、30秒の間隔で噴射した。粗ラッピングでは平 均砥粒径 3 μm、仕上げラッピングでは1 μm のダイヤ モンドスラリーを用い、潤滑油は純水とした。定盤は 高分子ポリマーと微粒金属粉体を焼結した高分子複合 盤 M/F 鋳鉄(粗研磨用)及び M/F セラミックスと純錫盤の3種類を用いた。

表1 供試被削材

ウエハー(mm)	単結晶シリコンウエハ-( 101.6×0.5)
ステンレス(mm)	SUS304,SUS316(OD 138)
セラミックス(mm)	SiC,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,ZrO <sub>2</sub> ,Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (50 × 50 × 10)
ガラス(mm)	石英ガラス(OD 65 × ID 20)

表2 ラッピング条件

定盤( 380mm)	M/F鋳鉄,純錫,MF/プラスチック
主軸回転数(min <sup>-1</sup> )	40,60,100
修正リング回転数(min <sup>-1</sup> )	40,60
荷重(kPa)	50,100
砥粒(平均砥粒径)	多結晶ダイヤモンド(1,3 µ m)
	緑色炭化珪素系(9,4 µ m)
潤滑油(水溶性)	S-4889(日本エンギス(株))
スラリー供給量(ml/min)	4
粗ラッピング時間(min)	70,80,90
仕上げラッピング時間(min)	20,30

表3 ポリシング条件

定盤( 380mm×t40mm)	SUS304
パッド(粗ポリシング)	メカノクロス530(日本エンギス(株))
パッド(仕上げポリシング)	メカノクロス540(日本エンギス(株))
主軸回転数(min <sup>-1</sup> )	60
修正リング回転数(min <sup>-1</sup> )	40
荷重(kPa)	50,100
砥粒(平均砥粒径)	$SiO_2(Baikalox, S-080C) 0.5 \mu m$
	CeO <sub>2</sub> (Baikalox,CP2370)0.7 µ m
スラリー供給量(ml/min)	5
ポリシング時間(min)	5,10

ポリシングはステンレス製定盤に研磨織布(パッド) を貼り、マイクロチューブポンプ(EYELA,MP-3N)を用 いてスラリーを研磨点に滴下した。粗ポリシングでは 硬質性の530、仕上げポリシングでは軟質性の540研磨織 布を用い、スラリーは粗・仕上げポリシングにおいて炭化 珪素系の S-080C(SiO<sub>2</sub>)及び酸化セレン CP2370 (CeO<sub>2</sub>) を連続供給した。

铸鉄定盤のフェーシング条件は、電着ダイヤモンド 修正リング(#140/#170)の回転数40min<sup>-1</sup>、荷重は 8.3kPa、潤滑油は中性洗剤、フェーシング時間は15分 であった。錫定盤の溝加工は、電着ダイヤモンドバイ ト(ノーズ半径1mm)を用いて切込み量0.4mm、送り 量0.4mm/revの条件で、定盤の内周から外周側へバイ トを移動した。同様に、フェーシングは切込み量30µm、 送り量70µm/revの条件で行った。溝加工及びフェーシ ング後、セラミックス修正リングを15分定盤上で回転 しながらバリを除去した。定盤の平面度はラッピング ゲージ(日本エンギス㈱製の HLG-15)を用いてフェ ーシング終了時に確認した。

材質	MF/鋳鉄
主軸回転数(min <sup>-1</sup> )	60
工具	ダイヤモンド電着リング(#140/#170)
回転数(min <sup>-1</sup> )	40
荷重(kPa)	42.7
潤滑油	中性洗剤

表4 鋳鉄定盤のフェーシング条件

#### 表5 錫定盤の溝加工条件

材質	純錫
工具(ノーズ半径)	単結晶ダイヤモンドバイト(1mm)
切込み量(mm)	0.4
送り量(mm/rev)	4
溝面のバリ除去	セラミックス修正リング,15min

表6 錫定盤のフェーシング条件

材質 工具(ノーズ半径)	純錫 単結晶ダイヤモンドバイト(1mm)
切込み量(µm)	30
バイト送り量(µm/rev)	70
溝面のバリ除去	セラミックス修正リング,15min

#### 3. 実験結果及び考察

## 3.1 ラッピング及びポリシングの概念

前報告<sup>2)</sup>で、単結晶シリコンウエハーの研磨は、粗ラ ッピング、仕上げラッピング及び仕上げポリシングの 3工程で達成できることを明らかにした。そこで、本 研究ではすべての実験を3工程で行った。

粗ラッピングの目的は<sup>3)</sup>、被削材の研削仕上げ面に残 存する反りやうねりの除去である。このため、剛性の 高い定盤と粒度の大きなスラリーを用いて比較的大き な切りくずを排出しながら、削除率と平面度を確保す る研磨条件を選定することが重要である。仕上げラッ ピングの目的は<sup>4)</sup>、粗ラッピングで被削材の表面に形 成された比較的大きな引っかき傷を除去することであ り、仕上げ面粗さの更なる向上も求められる。ここで は、粗ラッピングより軟質な定盤と粒度の小さなスラ リーが用いられる。

ラッピング工程の後行う一連のポリシング<sup>4)</sup>は究極 の仕上げ面粗さを確保するために行われる。粗ポリシ ングの目的は、硬質の研磨織布を用いてラッピング工 程で残した微小なうねりを除去し、極微小な引っかき 傷を除去することである。仕上げポリシングの目的は、 軟質の研磨織布を用いて傷のない完全な鏡面に仕上げ ることである。

# 3.2 ラッピング及びポリシングの仕上げ面粗さに及ぼす 効果

粗ラッピングでは、高剛性の鋳鉄定盤と軟質の純錫 定盤を、仕上げラッピングでは純錫定盤を供試した。 スラリーは、粗ラッピングでは平均粒径3µm、仕上げ ラッピングでは1µm の多結晶ダイヤモンド砥粒を用 いた。研磨では、アルミナ系や炭化珪素系の一般砥粒 が用いられるが、高脆性の単結晶シリコンウエハー、 セラミックス及び石英ガラスの研磨には、切れ味のよ い多結晶ダイヤモンド砥粒を用いた。多結晶砥粒は単 結晶砥粒にみられる劈開破壊は起こらず、微小粒界破 砕による新たな切れ刃が生じて安定した切削能力を維 持するためである。

一方、延性材料であるオーステナイトステンレス鋼の研磨には多結晶ダイヤモンド砥粒と炭化珪素系の GC 砥粒を用いて、仕上げ面粗さ及び加工品質に及ぼす 影響を調べた。

3.3 オーステナイト系ステンレス鋼のラッピング・ポリシング 図3はオーステナイトステンレス鋼のラッピング及 びポリシング工程における研磨時間と仕上げ面粗さの 関係を、多結晶ダイヤモンド砥粒と炭化珪素系の GC 砥粒で対比して示したものである。粗ポリシングに多 結晶ダイヤモンド砥粒用いた場合の全研磨時間は30分 で、炭化珪素系のGC砥粒を用いた場合は60分となり、 加工能率に大きな差異がある。被削材の研磨前の仕上 げ面粗さは160nmRa であったものが、ダイヤモンド砥 粒を用いた場合が28nmRa、GC 砥粒の場合32nmRa で あり、大きな差異は認められない。しかし、仕上げラ ッピングを行うことによりダイヤモンド砥粒が6 nmRa、GC 砥粒が13nmRa と明らかな差が認められる。 この粗さになるまでの時間は、ダイヤモンド砥粒が20 分、GC 砥粒が40分であり、研磨能率に大きな差が見ら れる。これは次の理由による。多結晶ダイヤモンド砥 粒は硬度が高いため、鋳鉄定盤の無数の微細なホール に固定砥粒として存在し切削作用をなすが、GC 砥粒は 硬度が低いため遊離砥粒として定盤と被削材の間で転 動する。前者は強靭な切れ刃による切削作用を、後者 は砥粒の転動に起因した微小破壊作用を行うため、被 削材除去に明確な差となる<sup>5)</sup>。

次に、被削材の仕上げ面粗さを考察する。ダイヤモ ンド砥粒による粗ラッピング面は鏡面になるが、GC 砥 粒による研磨面は半鏡面もしくは曇り面となる。これ はダイヤモンド砥粒の突き出し量が GC 砥粒より多い ため、被削材面には砥粒による微細な切削現象が生じ ている。しかし GC 砥粒の場合、砥粒の転動による摩 擦現象が切削現象より支配的なため、傷の浅い摩擦痕 が生じたと考えられる。



さらに、10~15分程度の仕上げラッピングを行うと、 ダイヤモンド砥粒による仕上げ面粗さは6 nmRa 前後 まで改善され、僅かな引っかき傷が観察されるものの 鏡面となる。これは1 µm の砥粒が3 µm の砥粒で被削 材面に生じた深い引っかき傷を除去することによる。 GC 砥粒による仕上げ面粗さは13nmRa と大きいが、こ れは GC 砥粒の微細な結晶の転動による除去現象が進 むため、被削材面に微細な圧痕を残すためと考えられる。

粗ポリシングでは、硬質の研磨織布530を用いると10 分で微小なうねりと引っかき傷が除去され、仕上げ面 粗さは3~4nmRaまで改善されている。

図4はSUS304とSUS316のダイヤモンド砥粒を用い て行った実験結果である。SUS304の主成分は18%Cr-8%Niであるのに対し、SUS316は加工硬化性を増加さ せるため17%Cr - 7%Niの主成分とし、耐孔食性改善 のためモリブデンが2~3%添加されている。

また、常温で安定なオーステナイト組織を有し、酸 化性酸及び非酸化性酸に著しい耐食性を示す。





研磨前の処女面粗さは SUS316が450nmRa、SUS304 が160nmRa と大きな差があるが、粗ラッピング、仕上 げラッピングにより差は僅少となり、ポリシングを行 うとほぼ同じ値に収束する。両被削材の成分の違いは 研磨による仕上げ面粗さにほとんど影響が認められな い。被削材の前加工面粗さに大きな差があるのは、 SUS316が SUS304より大きな加工硬化特性を有するた め、研削抵抗の大きな加工条件により引き起こされた ものであると考えられる<sup>6)</sup>。

3.4 硬脆性材料のラッピング・ポリシング

被削材として、単結晶シリコンウエハー、4種類のセ ラミックス及び石英ガラスを供試した。粗ラッピング には M/F 鋳鉄定盤を、仕上げラッピングには純錫及び M/F プラスチック定盤を、ポリシングには硬質研磨織 布530を貼り付けたステンレス製定盤を用いた。

図5は3種類のセラミックスと石英ガラスの仕上げ 面粗さと研磨時間との相関を示す。研磨前の被削材の 表面粗さはその製法及び仕上げ法によって62~ 1,070nmRaと大きくばらついているが、そのままの状 態で粗ラッピングを行った。粗ラッピングを30分行う ことにより、若干のばらつきが認められるものの仕上 げ面粗さは10.3~85nmRaと著しく改善される。

CIP-TypeA の研磨前の表面粗さは焼結時の組織が粗 大化したため1,070nmRa と粗く、粗ラッピングを施す ことにより85nmRa まで、仕上げポリシングにより 34.5nmRa まで向上するが、最終仕上げのポリシングを 行うと116nmRa と悪くなる。同様に、CIP-TypeB も研 磨前面の表面粗さは366nmRaと粗く、粗ラッピングを 行うと42nmRa、仕上げラッピングを行うと6nmRa、 ポリシングを施すと7nmRaまで向上する。これは、研 磨時に砥粒との接触応力によって研磨面にクラックが 生じ、砥粒通過後、応力の急激な開放によってクラッ クの肩部が押し上げられ、比較的大きな破片として遺 脱するためと解釈される3。このような破壊メカニズム はアルミナ系の結晶粒の大きなセラミックスにおいて 顕著である<sup>6)</sup>。これに対し、HIP のアルミナセラミッ クスは異なる傾向を示す。研磨前の表面粗さは62nmRa と他の CIP セラミックスに比べて各段に優れている。 粗ラッピングにより28nmRa、仕上げラッピングにより 2.6nmRa、ポリシングにより3nmRaまで著しく改善さ れる。最後に、被削材表面は完全な鏡面となる。これ は、微粒子が高温高圧化で焼結されて微細な結晶粒が 強力な結合剤で均一に成形されているため、砥粒によ るセミックス結晶の除去が均等に行われるからである。

石英ガラスの研磨はセラミックス MF/プラスチック 定盤を用いて粗ラッピング及び仕上げラッピングはダ イヤモンド砥粒、ポリシングは CeO<sub>2</sub>系の砥粒で行っ た。研磨前の表面粗さは160nmRa で、粗ラッピングに より10.3nmRa、仕上げラッピングにより3nmRa、ポリ シングにより2.3nmRa へ改善する。粗ラッピングで表 面粗さは著しく改善され鏡面となるが、被削材表面に 極微細な無数のスクラッチが観察される。仕上げラッ ピングでスクラッチはほぼ消滅し、ポリシングを行う ことによりスクラッチのない完全な鏡面になる。

これらの研磨条件を12インチのシリコンウエハーの 研磨に適用した結果、3~4nmRaの仕上げ面粗さが得 られた。



図5 セラミックスの仕上げ面粗さと研磨時間の関係

3.5 硬脆性材料のラッピング・ポリシングによる仕上げ面 評価

図6に粗ラッピング、仕上げラッピング及びポリシングで得られる硬脆性被削材の仕上げ面粗さをまとめて示す。どの被削材も2~3nmRaの仕上げ面粗さに仕上がっており、完全な鏡面を示す。

これは以下のように説明できる。純錫定盤を用いた 粗ラッピングでは、平面度が0.5µm 前後まで急速に改 善され、その後の仕上げラッピング及び仕上げポリシ ングにより0.3µm まで向上する<sup>7)</sup>。このため、純錫定盤 の弾性係数が低いことから錫定盤に固定化されたダイ ヤモンド砥粒の突き出し量が少なく、かつ、突き出し 高さ揃っていることに起因して同じ良好な仕上げ面が 得られるからである。





また、ポリシングでは軟質の研磨織布に散布した微 細な砥粒の加工物表面での塑性流動と加工液中の化学 成分が砥粒と反応を起こし、砥粒で不可能な微細なス クラッチを除去するためと説明できる<sup>7</sup>。

さらに、結晶粒が  $AL_2O_3$ 、SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、ZrO<sub>2</sub>の順に小 さく、結晶粒が小さいほど結晶の破壊モード延性モー ドである<sup>8</sup>)。図より、脆性モードの  $AL_2O_3$ 、SiC の仕上 げ面粗さは高くなっている。

# 4. おわりに

修正リング方式ラップマスター製ラッピング装置を 用いて結晶シリコンウエハー、セラミックス、石英ガ ラス及びステンレスの片面ラッピング及びポリシング 実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1)高分子ポリマーと微粒金属粉体を焼結した M/F 鋳鉄定盤を粗ラッピングに用いると30分で7 nmRaの仕上げ面粗さが確保できる。この面に純錫 定盤を用いたラッピングを行うと5nmRaの仕上 げ面粗さ、さらに硬質研磨織布を用いたポリシン グを施すと3nmRaの仕上げ面粗さが得られる。
- 2) 硬脆性材料、延性材料とも、加工能率及び仕上 げ面粗さにおいて、ダイヤモンド砥粒が炭化珪素 系砥粒に優れる。
- 3)粗ラッピング、仕上げラッピング及びポリシン グを施すことにより、単結晶シリコンウエハー、 各種セラミックス材、石英ガラスなど電子光学機 器用部品やレンズ、半導体部品用ステンレス鋼に 求められる究極の研磨面が得られる。

## 文献

- 1) 東条徹:次世代 LSI 製造におけるリソグラフィ技術,機械 の研究、53-3(2001),345.
- 2)坂本博宣,源島民雄、冨重定三:硬脆性材料のラッピング・ ポリシング技術の開発、熊本県工業技術センター研究報告、
  41、(2003),18
- 3) 安部耕三:シリコンウエハーの加工技術、機械と工具、 5,(2000),18.
- 4)振動勉:超精密ラッピング加工の実際、機械と工具、 5(1997),72.
- 5)山本悟:高密度記録メディアの量産を可能とする超精密 鏡面加工技術とコーティング技術、型技術16,1(1997)
- 6) 松尾哲夫ほか4名:機械材料、朝倉書店(1990)、232
- 7) 富岡利之、森田昇:微小接触荷重下の単結晶シリコンの 摩擦磨耗現象に関する研究、砥粒加工学会誌、46,1(2002),48.
- 8)海野邦昭: CBN/ダイヤモンドホールの使い方,工業調査 会,(1991),162