

硬脆性材料のラッピング・ポリシング技術の開発

坂本博宣* 源島民雄* 富重定三*

* 生産技術部

Development of Lapping and Polishing Process for Brittle Materials

Hironobu SAKAMOTO*, Tamio GENJIMA* and Sadami TOMISHIGE*

半導体や電子部品など高機能部品の超精密研磨技術を確立するために、4インチの単結晶シリコンウエハー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、粗ラッピング、仕上げラッピング及びポリシングの3工程で3ナノメートル(10^{-9}m)の仕上げ面粗さと0.3マイクロメートル(10^{-6}m)の平面度の鏡面が得られた。12インチのシリコンウエハーでも同程度の仕上げ面粗さが得られ、半導体や電子部品の超高精度研磨技術への応用に見通しが立った。

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0.13mm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、ナノメートル(10^{-9}m)の超平滑面とマイクロメートル(10^{-6}m)の平坦面が要求される¹⁾。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、ナノメートル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り込みを与え、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、4インチの単結晶シリコンウエハーにラッピング及びポリシングを施して、加工条件、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。さらに、12インチの次世代単結晶シリコンウエハーの研磨も試みた。

2. 実験方法及び実験条件

2.1 実験方法

本研究では、ラッピング装置として図1に示す修正リング式ラップマスター（外径 $\phi 380\text{mm}$ ×内径 $\phi 140\text{mm}$ ）を用い、4インチ($\phi 101.6\text{mm}$)単結晶シリコンウエハーの片面を研磨した。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。図2に実験の工程を示す。

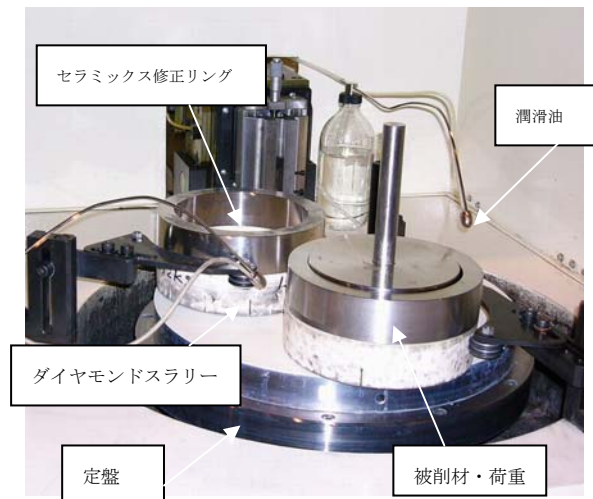


図1 ラッピング装置の外観

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、粗研磨と仕上げ研磨のため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（株東京精密製 surfcom475A）、平面度はレーザ干渉計（富士写真光機株製 FIX05）を用いて測定した。

なお、実験前に定盤の平面度を $1\mu\text{m}/\phi 380\text{mm}$ 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φ178mm×内径φ140mm)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。

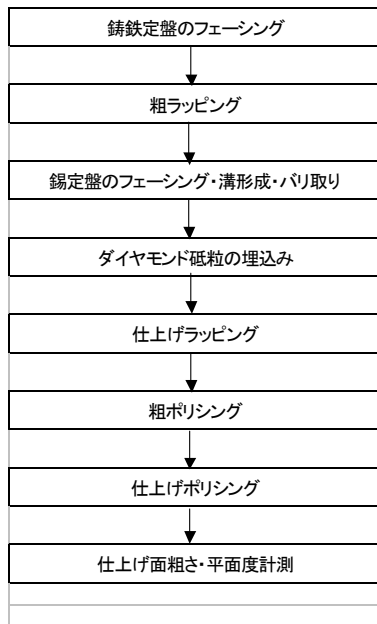


図2 研磨の実験工程

2.2 実験条件

表1にラッピング条件、表2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溝加工条件を表3~5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 $5\mu\text{m}/\phi 380\text{mm}$ 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、 100min^{-1} 、荷重は50~ 100kPa 、修正リングの回転数は40、 60min^{-1} 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、30秒の間隔で噴射した。粗ラッピングでは平均砥粒径 $3\mu\text{m}$ 、仕上げラッピングでは $1\mu\text{m}$ 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 鑄鉄)と純錫盤の2種類を用いた。

試験片(D×t)	単結晶シリコンウエハ(φ101.6×0.5mm)
定盤(φ380mm)	M/F鑄鉄, 純錫
主軸回転数(min^{-1})	40,60,100
修正リング回転数(min^{-1})	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 μm)
潤滑油	純水
スラリー供給量(cc/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

試験片(D×t)	単結晶シリコンウエハ(φ101.6×0.5mm)
定盤(φ380mm)	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^{-1})	60
修正リング回転数(min^{-1})	40
荷重(kPa)	50,100
砥粒(平均砥粒径)	SiO_2 (Baikalox,S-080C) 0.5 μm
スラリー供給量(cc/min)	10
粗ポリシング時間(min)	10,20
仕上げポリシング時間(min)	5,10,20

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番、仕上げポリシングでは軟質性の540番研磨織布を用いた。スラリーは粗・仕上げポリシングにおいて、微粒子けい酸 SiO_2 を主成分とするS-080C(Baikalox 社製)を2倍に希釈し、連続供給した。

鑄鉄定盤のフェーシングは、電着ダイヤモンド修正リング(#140/#170)の回転数 40min^{-1} 、荷重8.3kPaの条件で、中性洗剤の潤滑油を滴下しながら15分間行った。錫定盤の溝加工は、単結晶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することにより行った。同様に、フェーシングは切込み量 $30\mu\text{m}$ 、送り量 $70\mu\text{m}/\text{rev}$ 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分間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(日本エンギス株製のHLG-15)を用いてフェーシング終了時に確認した。

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

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

材質	純錫
工具	単結晶ダイヤモンドバイト(ノーズ半径1mm)
切込み量	$30\mu\text{m}$
バイト送り量	$70\mu\text{m}/\text{rev}$
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

単結晶シリコンウエハーの研磨は、通常、粗ラッピング、仕上げラッピング、粗ポリシング及び仕上げポリシングの4工程²⁾で行われる。

粗ラッピングの目的は³⁾、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³⁾、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が求められる。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⁴⁾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 $3\mu\text{m}$ 、仕上げラッピングでは $1\mu\text{m}$ 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。多結晶砥粒を用いたのは単結晶砥粒にみられるへき開破壊が起こらず、微小粒界破碎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。

図3は一連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鋳鉄定盤と錫定盤で対比して示したものである。粗ポリシングに鋳鉄定盤を用いた場合の全研磨時間は100分で、純錫定盤を用いた場合は140分となった。被削材の研磨前の仕上げ面粗さは $50\sim 60\text{nmRa}$ であるものが、粗ラッピングを行うことにより 7nmRa 前後の粗さまで著しく改善している。この粗さになるまでの時間は鋳鉄定盤で30分、錫定盤では90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。鋳鉄定盤には無数の微細なホールが存在し、その中の砥粒は固定砥粒として切削作用をなし、その他の砥粒は遊離砥粒として定盤と

被削材の間で転動する。前者は強靱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、両者が複合した切削機構となる⁵⁾。

一方、純錫定盤の場合、材質が柔らかいため一部の砥粒が遊離砥粒として存在するものの、大部分のダイヤモンド砥粒が錫定盤に埋め込まれて固定砥粒化する。また、砥粒の突き出し量が剛性の高い鋳鉄定盤より少なくなる。このため、研磨能率は鋳鉄定盤が純錫定盤より高い。粗ポリシングを施した被削材面には砥粒による無数の引っ掻き傷が観察され、半鏡面状態となる。

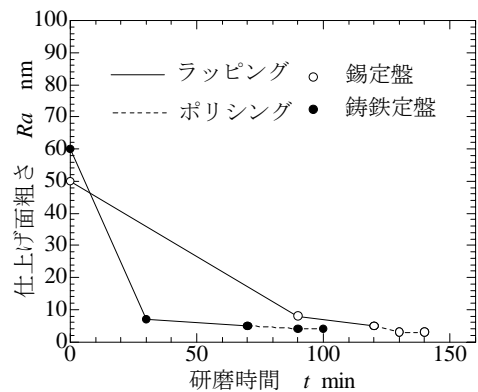


図3 研磨時間と仕上げ面粗さの関係

次に、10~15分程度の仕上げラッピングを行うと、仕上げ面粗さは 5nmRa 前後まで改善され、わずかな引っかき傷が観察されるものの鏡面となる。これは $1\mu\text{m}$ の砥粒が $3\mu\text{m}$ 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。

粗ポリシングでは、硬質の研磨織布530番を用いると、10分で微小なうねりと引っかき傷が除去される。仕上げ面粗さは $3\sim 4\text{nmRa}$ まで改善されている。仕上げポリシングは軟質の研磨織布540番を用いて10分行ったが、仕上げ面粗さはほとんど改善されていない。

図4は硬質織布530番と軟質織布540番を用いてポリシングを行った場合、織布の硬度が被削材の仕上げ面粗さに及ぼす影響を調べたものである。仕上げラッピングを行った被削材面の仕上げ面粗さは 5nmRa である。硬質織布による仕上げ面粗さはポリシング時間の経過に伴い 3nmRa まで向上し、30分で 4nmRa となる。軟質織布による仕上げ面粗さは30分ポリシングを行ってもほとんど向上しない。これは、軟質織布の剛性が低いため一定量の強制的な砥粒切込みが得られず、十分な平坦度と引っかき傷のない究極の鏡面が確保できないためと考えられる。これらの結果から、軟質織布による仕上げポリシングは省略することが可能であ

る。

単結晶シリコンウエハーの鏡面研磨は鑄鉄定盤を粗ラッピングに用いると、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工程で可能である。従来、4工程で行っていた研磨を3工程に短縮できる。

また、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。

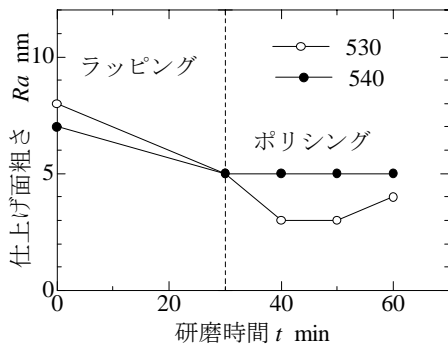


図4 研磨織布の仕上げ面粗さに及ぼす影響

3.3 ラッピング・ポリシングの平面度に及ぼす影響

図5に粗ラッピング、仕上げラッピング及び仕上げポリシングで得られる被削材研磨面の平面度を示す。被削材の処女面の平面度は60nm前後のバラツキが見られる。純錫定盤を用いた粗ラッピングでは、平面度が0.5 μm 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0.3 μm まで向上する。これは、ラッピング時間が90分と長いものの、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、突き出し高さが揃っていることに起因するものである。

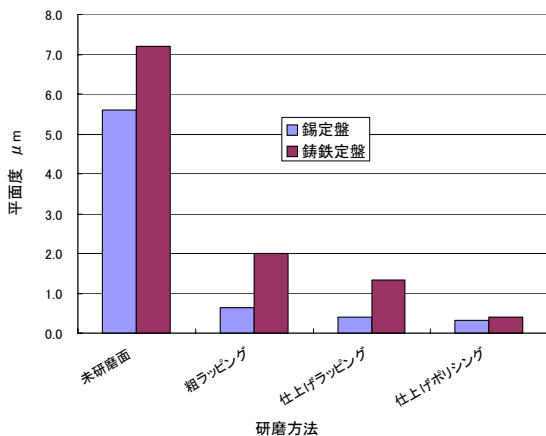


図5 研磨プロセスによる平面度

一方、鑄鉄定盤による粗ラッピングでは、2 μm まで

改善され、仕上げラッピングで1.3 μm まで向上し、仕上げポリシングで0.3 μm となる。粗ラッピングで2 μm 程度までしか改善されない理由は、鑄鉄定盤の空孔に固定化された砥粒による微小切削と定盤と被削材面に介在する砥粒が転動することと、砥粒の突き出し高さが不揃いであるため、切りくず寸法や形状にばらつきが生じるためである。しかし、その後の純錫定盤を用いた研磨では、ダイヤモンド砥粒の切れ味がよく、砥粒の突き出し高さが揃うため、粗ラッピングに純錫定盤を用いた場合と同じ良好な平坦面が得られる。

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単結晶シリコンウエハー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鑄鉄定盤を粗ラッピングに用いると30分で7nmRa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) 硬質の研磨織布を用いたポリシングを行うことにより0.3 μm の平面度が得られる。
- 3) 粗ラッピング、仕上げラッピング及びポリシングにより、求められる究極の研磨面を加工できる。

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) 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。
- 3) 進藤勉：超精密ラッピング加工の実際、機械と工具、5(1997)、72。
- 4) 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)
- 5) 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。