超微細砥粒の電気泳動現象を利用した
シリコンウェーハのインフィード研削*谷 泰弘^{*1}, 佐伯達彦^{*2}, 左光大和^{*3}
小林一雄^{*4}, 佐藤良幸^{*5}Infeed Grinding of Silicon Wafers Applying Electrophoretic Deposition
of Ultrafine AbrasivesYasuhiro TANI, Tatsuhiko SAEKI, Yamato SAMITSU,
Kazuo KOBAYASHI and Yoshiyuki SATO

The application of electrophoretic deposition of ultrafine abrasives to grinding cut-off has enabled both no chipping and a mirror surface finish to be achieved using the developed aluminum-bonded diamond blades. Then we examined its application to infeed grinding of silicon wafers to replace the lapping process. A series of experiments clarified that desiccation due to electroosmosis caused agglomeration of adhered abrasives onto the grinding wheel, and that easy dropping-off of the agglomerates caused numerous scratches. Both the increase of viscosity of grinding fluid by the addition of a thickener and the decrease of applied voltage were performed to restrain electroosmosis, which enabled a mirror surface finish of 23 nmRt with no scratches to be achieved.

Key Words: Surface Grinding, Grinding Wheel, Tool Wear, Surface Roughness, Silicon Wafer, Electrophoretic Deposition, Ultrafine Abrasive, Colloidal Silica

1. はじめに

シリコンウェーハの製造工程が、その大口径化の動向にもかかわらずこれまでと同程度のスループットを維持するために、大きく変わろうとしている⁽¹⁾。すでに 8 インチインゴットの切断工程では、これまでの内周刃切断が遊離砥粒を用いたマルチワイヤソー切断に急速に置き換わっている。また、その後工程のラッピング工程も研削工程により置き換わろうとしている。しかしながら、さらにその後工程の研磨工程に関しては、置き換えるべき高能率の加工法も研磨能率を高める方策も提案されていないのが実状である。これは、製品としてのシリコンウェーハは無欠陥でなくてはならないために、最終工程である研磨工程において前加工で生じた加工ダメージを完全に取除くことが求められており、前加工により生じる加工ダメージが低減さ

れない限り、研磨時間を短縮することは極めて難しい状況にあるためである。こうした観点から、加工ダメージの残留が少ない研削方法の確立が望まれている。

コロイダルシリカは、化学的に活性度が高く、シリコンウェーハの仕上げ研磨工程で多用されている研磨剤である。そのため、このコロイダルシリカが切れ刃となる工具を使用することができれば、研削工程でのダメージを低減できる可能性がある。その一つの方法が超微細砥粒により構成された研削砥石を開発すること⁽²⁾⁽³⁾であり、今一つの方法が超微細砥粒を吸着したダイヤモンド工具を用いて研削すること⁽⁴⁾⁽⁵⁾である。このどちらの方法を採用するにしても、超微細砥粒の電気泳動付着現象を利用することが有効な手段となる。特に研削切断にこの電気泳動付着現象を応用すれば、チッピングがなく切断面が鏡面となる加工が実現されることは、著者らがすでに報告している⁽⁶⁾。本論文では、ダメージの少ない研削方法を確立する第一歩として、この電気泳動付着現象をシリコンウェーハのインフィード研削に適用した結果について報告する。

2. 電気泳動付着現象を適用した研削法

2.1 電気泳動付着現象 一般に酸化物粒子は水中において比較的高い電荷を有している。例えば、微

* 原稿受付 1997 年 12 月 25 日。

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (☎ 106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)。^{*2} 東京大学大学院。^{*3} 正員, (株) 岡本工作機械製作所 (☎ 243-0801 厚木市上依知 3009)。^{*4} (株) 岡本工作機械製作所。^{*5} 新日産ダイヤモンド工業 (株) (☎ 236-0004 横浜市金沢区福浦 2-6-13)。

細なシリカ粒子は、アルカリ液中で強い負の電荷を持っている。その化学的活性のために最終研磨の加工液として多用されているコロイダルシリカは、この負の電荷のために生じる反発力により、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒子がアルカリ液中に安定に分散したものである。そこで、このコロイダルシリカに電場を作用させれば、シリカ粒子は、図1に示されるように電気泳動現象(以下 EPD 現象と称する)により陽極に集まり付着する。この陽極を工具とすれば、上述のような超微細砥粒からなる研削工具を作成することができる⁽⁵⁾。

2.2 EPD インフィード研削 EPD 現象をシリコンウェーハのインフィード研削に適用するには、図2のような実験装置を用いればよい。陽極としては、導電性のメタルボンドカップ形ダイヤモンドホイールを使用した。一方、銅製の陰極をカップ形ホイールの直下に設けた円弧状の樋の底にはり付け、この樋に研

Fig. 1 Illustration of electrophoretic deposition

Fig. 2 Experimental apparatus for EPD infeed grinding

削液として用いたコロイダルシリカを供給した。この両電極間に電場を作用させることで、電気泳動付着現象が生じ、陽極である研削ホイールに超微細シリカが付着する。工作物である8インチサイズのシリコンウェーハは、ロータリテーブル上の真空チャックにより吸着させ、インフィード研削を行った。表1に研削条件を示す。研削液の飛散を抑えるために、研削砥石の回転数として低速の300 rpm を適用した。

メタルボンドダイヤモンドブレードを用いた図3に示される EPD 研削切断では、ダイヤモンド砥粒が溝を創成し、ブレードの側面に付着したシリカ粒子が溝の側面を研磨する。そのため、ダイヤモンド砥粒が作った傷が溝の側面に残留することは非常にまれである。ところが、EPD インフィード研削ではダイヤモンド砥粒が常に仕上げ面に作用する可能性を有している。このため、スパークアウトや研削砥石を逆に工作物から遠ざける負のインフィード研削が必須のものとなる。そんな場合でも付着したシリカ層は常に成長しているので、成長速度が高ければシリカ粒子による研磨作用は行われることになる。

3. 陽極反応を考慮した結合剤の選択

前述のように EPD 研削切断ではチップングがなく切断面が鏡面となる加工が実現できる。しかし、工具が陽極となっているので陽極溶出のためにダイヤモンド砥粒が脱落し、突発的に大きなチップングが生じることがある。この事態を避けるためには、結合剤表面

Table 1 Grinding conditions

Grinding wheel	SD800N75Fe	SD800N75Al
Workpiece	8-inch silicon wafer (Roughness:20nmRa)	
Applied voltage	90V	
Wheel revolution	300rpm	
Table rotation	60rpm	
Grinding fluid	Colloidal silica (Diameter of silica:10-20nm)	
Flow rate of coolant	8L/min	
Grinding time	30min	
Surface finish	No removal	10.4nmRa

Fig. 3 Schematic diagram of EPD grooving

に緻密な不働態膜を形成し、腐食から保護することが重要となる。アルミニウムはそのような緻密な不働態膜を形成する金属の一つである。そのことを利用して、結合剤として純アルミニウムを焼結したダイヤモンドブレードを開発した。

表2に切断条件を示す。また、図4には使用後のブレードの外周部の側面写真と切断溝を上から見た写真を示す。比較的緻密な不働態膜が形成され、通常使用されているブロンズボンドブレードよりも溶出が少ないとされている純鉄を結合剤としたブレードを用いた結果を比較の対象として示した。しかし、純鉄ボンドブレードの場合には90Vの高電圧下ではやはり強烈な腐食が発生し、その結果図のような大きなチッピングが生じた。一方、アルミニウムボンドブレードでは全く腐食が生じず、完全にチッピングのない切断が実現された。

図5に、研削切断における工具摩耗の結果をまとめて示す。いずれも30mmの切削距離の範囲でEPD研削切断を3パス行った後の工具直径の減少量を示している。このように、種々の結合剤のブレードと種々の印加電圧でEPD研削切断を行った結果、アルミニウムボンドブレードの場合には120Vの高電圧下でも非常に少ない工具摩耗量となっており、アルミニウムボンドブレードが優れていることが判明した。

Table 2 Grooving conditions

Blade	SD600N100M	SD600N100Fe	SD600N100Al
Workpiece	Soda lime glass		
Applied voltage	30V	30V, 90V	30V, 120V
Spindle revolution	5000rpm		
Depth of cut	1mm		
Feed	5mm/min		
Grinding fluid	Colloidal silica (Diameter of silica: 10-20nm)		
Flow rate of coolant	3L/min		
Cutting distance	30mm/pass

Fig. 4 Grooves and used diamond blades in EPD grinding cutoff

4. シリコンウェーハのEPD インフィード研削

4.1 研削砥石の結合剤の選択 まずカップ形のブロンズボンドあるいは鉄ボンドダイヤモンドホイールを用いて、EPD インフィード研削を行った。工作物は、あらかじめ#2000のレジンボンドダイヤモンドホイールを用いて研削し、20nmRa(0.15μmRt)の仕上げ面粗さに仕上げた。付着したシリカ層自体の研削能力を評価するために、ダイヤモンド砥粒が工作物に接触しないように研削砥石を工作物から0.1mm離して設置した。この状態でも電場が作用すれば、電気泳動付着現象により研削砥石にシリカ粒子が付着する。その付着層の厚みが工作物と工具のすきま以上になれば、加工が起こるはずであるが、これらの研削ホイールの場合には加工は全く観察されなかった。これは陽極溶出による結合剤の腐食速度がシリカ層の成長速度を上回ったためと考えられる。

そこで、上記の結果を参考にして、研削砥石をアルミニウムボンドホイールに変えることにした。図6は、アルミニウムボンドホイールを用いてEPD研削を行った結果得られた仕上げ面の粗さ曲線である。仕上げ面粗さは確かに改善されているものの、多数のスクラッチが観察された。しかし、研削砥石と工作物を0.1mm離れた状態で加工が行われたことは、結合剤表面に緻密な不働態膜が形成され、陽極溶出が抑制されたことを意味している。

4.2 スクラッチの原因究明 次にスクラッチの原因究明を行った。ダイヤモンド砥粒のみでなく、シ

Fig. 5 Tool wear in EPD grinding cutoff

Fig. 6 Generation of scratches in EPD infeed grinding

リカ粒子の凝集体が、仕上げ面にスクラッチを発生させる可能性をもっている。図1に示されるように、電気泳動現象が生じるときには必ず対になって電気浸透現象が発生する。この電気浸透現象は、電気泳動現象により付着した固体層間に存在する液体が、電気泳動と逆方向に押し出される現象である。その結果、付着層は乾燥し、クラックを生じて脱落する。

ダイヤモンド砥粒とシリカの凝集体のいずれがスクラッチの発生に対して支配的であるのかを調べるために、ダイヤモンド砥粒を含まない研削砥石を用いて研削実験を行った。その結果、同様の頻度でスクラッチが観察された。このことはダイヤモンド砥粒の脱落がスクラッチの主原因ではないことを示している。同時に結合剤表面を工作物に押し付ける試験も行った。これは加工中には結合剤表面は酸化されて硬質化しており、接触により工作物に傷をつける可能性があると考えたからである。その結果、確かにいくつかの浅い傷は観察されたが、スクラッチと呼べるような深い傷は存在しなかった。この結果から、結合剤との接触もス

クラッチの原因でないことが判明した。

4・3 EPD インフィード研削による鏡面創成

上記の結果によれば、スクラッチを減少させるためには電気浸透による付着層の乾燥を抑制することが重要であると言える。電気浸透現象は、

$$V = \frac{\varepsilon \zeta}{4\pi\eta} ES,$$

で表すことができる。ここで、

V ：電気浸透による流体の排出速度

ε ：電気伝導度

ζ ：界面動電位

E ：電場の強さ

S ：毛管の断面積

η ：粘度

である。

この式から電気浸透による流体の移動を抑制するためには、粘度の増加と印加電圧や粒子径の減少が効果的であることがわかる。ここで、粒子径の減少は毛管の断面積を減少させることにつながる。

Table 3 Key factors in restraining electroosmosis

Experimental conditions			Quantity of water ^{*1}			Grinding performance	
Diameter of silica (nm)	Additive	Applied Voltage (V)	Just Starting	After 10 minutes	After 30 minutes	Generation of Scratches	Surface Roughness (nmRa)
70-100	None	90	None	None	None	Many	21.1
10-20	None	90	Little	Little	None	Comparatively many	17.3
10-20	None	30	Enough	Enough	Little	Some	10.7
10-20	s.d. ^{*2}	30	Enough	Enough	Enough	Few	2.5

*1: Quantity of water in adhered layer, *2: 5wt% sodium alginate

(a) View of a finished surface

(b) Roughness curve

(Surface roughness: 21.1 nmRa, 0.294 μmRt)
Diameter of silica: 70-100 nm,
Applied voltage: 90 V,
Additive: none

Fig. 7 Finished surface in EPD infeed grinding with no suppression of electroosmosis

(a) View of a finished surface

(b) Roughness curve

(Surface roughness: 2.5 nmRa, 23 nmRt)
Diameter of silica 10-20 nm,
Applied voltage: 30 V,
Additive: sodium alginate

Fig. 8 Finished surface in EPD infeed grinding with suppression of electroosmosis

上記の関係を確認するために、図1のような状態のビーカテストを行い、電気浸透現象による乾燥状態を観察した。ビーカにはコロイダルシリカを満たし、5 mm 離して電極を設置した。電場を作用させ、電気泳動により陽極に付着したシリカ層中の水分を目視により評価した。その実験条件および結果を、表3に示す。やはり小径のシリカの利用、増粘剤の添加および低電圧の印加が、液体を付着層中に保持するのに効果的であることが判明した。ここでは、水溶性高分子であるアルギン酸ナトリウムを増粘剤として使用した。

このビーカテストに対応した研削実験を行った。その実験結果を同じく表3に示す。上記のいずれの考慮も、スクラッチの抑制および仕上げ面粗さの向上に効果があることがわかる。図7に上記の因子を全く考慮しなかった、印加電圧 90 V で大きなシリカ粒子を用い増粘剤を添加しなかった場合の、仕上げ面と粗さ曲線を示す。また、図8には、これとは逆に全ての因子を考慮した、印加電圧 30 V で小さなシリカ粒子と 5 wt% の増粘剤を使用した場合の結果を示す。図8に示されるように、電気浸透を抑制することで、2.5 nmRa (23 nmRt) のスクラッチのない鏡面が EPD インフィード研削により最終的に実現された。

5. 終わりに

電気泳動付着現象をシリコンウェーハのインフィード研削に応用することを試みた結果、以下のような結

論を得た。

(1) 緻密な不働態膜を形成するアルミニウムを結合剤に適用することにより、EPD 研削での工具摩耗を抑制することが可能になった。

(2) ダイヤモンド砥粒を含まない研削砥石を用いた研削実験により、電気浸透による乾燥のために生じるシリカ凝集体の脱落がスクラッチの発生原因であることが判明した。

(3) ビーカテストにより、電気浸透を抑制するためには小径シリカの利用、増粘剤の添加および低電圧の印加が効果的であることがわかった。

(4) 電気浸透を抑制することで、シリコンウェーハの EPD インフィード研削により 23 nmRt の鏡面が実現された。

文 献

- (1) 阿部孝夫・中里泰章, 大直径シリコンウェーハの超平坦化技術, 電子情報通信学会誌, **77**-11(1994), 1109.
- (2) 池野順一・谷 泰弘, 電気泳動現象を利用した超微粒砥石の開発とその応用, 機論, **57**-535, C(1991), 1013.
- (3) 池野順一・谷 泰弘, 電気泳動現象を利用した超微粒砥石の作成法に関する研究 (既存の結合剤の適用に関する検討), 機論, **59**-562, C(1993), 1946.
- (4) 黒部利次・今中 治・阪谷勝明, 電気泳動現象利用による表面研磨, 精密工学会誌, **52**-3(1986), 547.
- (5) 池野順一・谷 泰弘・福谷亮人, 超微細砥粒の電気泳動現象を利用した研削切断法の開発, 機論, **57**-542, C(1991), 3320.