ぜい性材料の超精密研削技術の研究*

——超精密研削装置の試作——

阿部耕三** 安永暢男*** 宮下政和† 吉岡潤一†† 大東聖昌†††

Development of Ultraprecision Grinding Equipment for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials

Kohzo ABE, Nobuo YASUNAGA, Masakazu MIYASHITA,
Jun-ichi YOSHIOKA and Michimasa DAITO

The present paper deals with a ductile mode ultraprecision grinding equipment, which is developed for industrially realizing crack free grinding of semiconductor materials with high shape accuracy. This equipment is composed of ultraprecision systems such as force-operated linear actuator, composite bearing guideway mechanism, stationary spindle structure, 10 nm resolution feedback NC control and so on. By these systems, inching resolution of the grinding wheel head reached 10 nm, and the loop stiffness between grinding axis and rotary-table is 150 N/ μ m. The thickness of dislocation layer remained on the ground silicon wafer is about 0.5 μ m. It is confirmed that there are no cracks remaining under the ground surface from SAM (Scanning Acoustic Microscope) observations. On the other hand, in case of conventional precision grinding machine, many cracks were observed along grinding marks. The LTV (Local Thickness Variation) which describes local flatness for all cells is under 0.4 μ m. The TTV (Total Thickness Variation) which describes global flatness is 0.55 μ m.

Key words: ductile mode grinding, ultraprecision grinding, brittle material, silicon wafer, crack free

1. はじめに

デバイスの高集積化に伴い、シリコンウエハにはより高い形状精度が求められている。シリコンウエハの形状精度の評価にはLTVおよびTTVが用いられるが、これらは露光時のセルサイズおよびウエハ全体についての厚み偏差であり、ウエハ裏面を基準にしたときの表面側の平面度と考えることが出来る。例えば、20×20 mmの大きさのセルに要求されるLTVは、0.1 μ mが目標値になると予想されており、デバイスの歩どまり向上には、このような高い精度をウエハ全面にわたり安定して実現することが必要となる。

現状のウエハ加工プロセスでは、一定の圧力の下で砥粒を加工物に作用させる圧力転写原理に基づくラッ

ピングおよびポリシングが主体であり、上記のような高い精度を実現することは、極めて難しいと予想される。現状のプロセスでは自動化も容易ではなく、結果的に加工コストを大きく圧迫することにもなる。

このような問題点を解決し、高精度ウエハ用の加工技術として期待されているのが、研削装置の運動精度に基づいて砥粒に一定の切込み量を与える運動転写原理に基づいた超精密延性モード研削である^{1)~4)}。ぜい性材料であるシリコンを、クラックの発生しない延性モードで研削し、かつ加工面全体の形状精度を極めて高い平面度とするためには、ナノメートルレベルの運動精度と高い剛性を持つ研削装置が不可欠である。そこで、吉岡・宮下・金井らの提案した超精密要素技術^{5)~10)}を採用した超精密平面研削装置を試作し、その基本性能を確認した。

2. 試作した超精密研削装置の概要

2.1 装置の構成

試作超精密研削装置の外観写真を図1に、装置本体の断面構造を図2に示す。本試作機は、縦軸のカップ

* 原稿受付 平成5年3月29日

** 正会員 新日本製鐵(株)(光市島田3434)

*** 正会員 東海大学工学部(平塚市北金目1117)

† 正会員 足利工業大学(足利市大前町268-1)

†† 正会員 (株)日進超精密技術研究所(千葉市花見川区幕張町6-115)

††† 正会員 (株)日進機械製作所(浜松市有玉西町300)

Fig. 1 Ultraprecision grinding equipment

Fig. 2 Cross section of developed ultraprecision grinding equipment

ホイールを用いたロータリーテーブルタイプの平面研削装置で、次のような3つの新しい機構を備えている。すなわち、①軸固定型油静圧軸受の研削軸⁵⁾、②複合案内機構⁶⁾、③力操作型リニアアクチュエータ^{7)~9)}をZスライドの上下に配置した位置決め駆動系¹⁰⁾である(図2参照)。軸固定型油静圧軸受は、固定された軸に対して研削ホイールを取り付けるホイールユニットを油静圧で支持する構造であり、高い軸剛性と回転精度を実現することができる。研削ホイールは、ホイールユニットに8本のボルトで固定する。ホイールユニットは、コラム背面に取り付けられたインバータモータによってベルト駆動される。これらの研削ヘッドは、コラムに沿って上下方向に移動するZスライドに取り付けられている。

Zスライドは、図3(a)のように複合案内機構を介してコラムに挟まれている。この機構は、動圧と静圧

(a) Z slide

(b) X slide

Fig. 3 Slide structure with composite bearing guideway mechanism

を対向配置した剛性の高い滑り案内方式である。動圧の滑り案内面は、前後方向には研削軸側に、左右方向には右側に配置している。スライドを案内面へ押し付ける力は、対向する位置に設置された静圧ポケットにより図中の矢印方向に発生する。

Zスライドは2つの力操作型リニアアクチュエータによって上下に駆動される。この力操作型リニアアクチュエータは従来の流量制御方式の油圧駆動装置とは異なり、ピストンの両側の油圧に圧力差を生じさせてスライドを移動させるものである。その特徴は、高い駆動負荷のもとでも、数十mmの範囲にわたりナノメートルオーダーの位置決めが可能にあることにある。本試作機の場合、Zスライドの上下ストロークは約35mmである。Zスライドは、コラムとの間に取り付けたレーザスケール(ソニーマグネスケール社製BS10)によってフィードバック制御される。レーザスケールの公称分解能は10nmである。

次にワークテーブル側の断面構造を図3(b)に示す。ロータリーテーブルの回転軸は、スラスト方向とラジアル方向に油静圧軸受を採用しており、研削ホイール軸と同じくベルト駆動される。この軸の中心には、真空チャック用の吸気孔を設けている。テーブル面上に、シリコンウェハを保持するためのファインセ

Fig. 4 Table layout

ラミックス製の真空チャックをボルトで固定する。ロータリーテーブルは、油静圧軸受を介して X スライド上に搭載されている。この案内にも複合案内機構が採用されている。

本試作装置で使用されている駆動用と軸受用の油は、すべて $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に温度制御している。

実際の研削加工は図 4 のように、まずシリコンウエハなどの試料を保持したロータリーテーブルをカップ型の研削ホイールの下に移動させ、次に研削ヘッドを下降させて切り込む方式で行う。

2.2 運動精度

まず、レーザスケールでフィードバック制御された Z スライドの運動精度を測定した。測定は、10 nm のステップ送りを $0.2\ \mu\text{m}$ の範囲で上下させる NC 指令を用い、静電容量型の変位計（日本 ADE 社製）で行った。変位計の取付位置を図 5 に示す。

ここで、使用したレーザスケールの精度について述べる。レーザスケールの公称分解能は 10 nm であるが、各ステップには約 1.4 nm の誤差が存在する。これは次のような理由による。レーザスケールでは、550 nm のピッチのガラススケール上のホログラム格子に対して、検出ヘッドから 4 つのピークが得られる構造となっており、検出信号は 550 nm を 4 分割した

Fig. 5 Probe setting

値となる。これをさらに電氣的に 16 分割した値を 1 パルスの信号として処理しているため、1 パルスに相当する実際の移動量は、

$$550 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{16} = 8.59 \text{ (nm)}$$

となる。この値を 10 nm としてカウントしているため、各パルスには約 1.4 nm の誤差が生ずる。この誤差は 6 パルス目には約 8.4 nm まで累積し、ほぼ 1 パルス分の移動量に相当するようになる。そこで、レーザスケール内で、この累積誤差を 6 パルス目ごとに電氣的に 2 パルス分カウントする補正を行っている。

延性モード研削の実現には、材料除去メカニズムがぜい性モードから延性モードに移移する値 (D_c 値) 以下で研削ホイールの送りを制御することが必要である。したがって、研削装置には、少なくとも D_c 値よりも一けた小さな送り分解能が求められる。シリコンウエハの場合、 D_c 値は $0.1\ \mu\text{m}$ 程度¹¹⁾¹²⁾ といわれており、レーザスケールは上述のような誤差はあるものの、分解能が D_c 値に対しては十分小さいこと、そしてフィードバック制御に必要な NC 装置との整合性などを考慮して本試作機に採用した。

測定結果を図 6 に示す。図 6 (a) より、Z スライドが、ほとんどロストモーション無しに運動方向を上下に反転していることがわかる。ステップ送りの上下反転位置が右上がりにずれているのは、室温の変化に起

Fig. 6 Positioning characteristics of Z slide for 10 nm/step feed

Fig. 7 Measuring method of stiffness

因する温度ドリフトである。

また、図6(b)のステップ送りの拡大図には、6ステップごとに約2ステップ分の送り誤差が認められる。これは、前述のレーザスケール自体の補正処理が実際の研削ヘッドの動きとして測定されたものである。

このように、本試作機は総重量が約500 kgの研削ヘッドの上下移動を、レーザスケールの分解能を超えるナノメートルレベルの超微細ステップで制御することが可能であり、本研究の目的を達成する上で最も重要な性能を備えていることが確認できた。

2.3 装置剛性

延性モード研削で高精度な平面を得るうえで、装置剛性が具体的にどのように影響するかについては、いまだ十分に明らかにされているとはいえない。延性モード研削が行われている状況の下では、砥粒自体をも延性モードで摩擦的に摩耗させることが不可欠である。これは、砥粒に破碎が生ずると、砥粒突出し高さのばらつきが D_c 値以上になったり、その破砕片のかみ込みにより過大な切込みが与えられたりして、試料側にぜい性破壊が生ずることになるので、それを避けるためである。この場合には、研削抵抗も増加することが予想されるので、延性モード研削の実現には極めて高い剛性を持つ装置が必要となる。

剛性は、図7のように研削軸とロータリーテーブル軸との間に油圧ジャッキを設置して負荷を加えたときの変位を電気マイクロメータで測定した。研削軸単体、テーブル軸単体、および研削軸とテーブル軸との間のループ剛性を測定した。各負荷での変位は、中心からの半径100 mmの円周上で測定した3か所の平均値とした。

Fig. 8 Measured stiffness

Fig. 9 Run-out of trued diamond wheel

各負荷に対する変位の測定結果を図8に示す。研削軸単体では1300 N/μm、ロータリーテーブル軸単体では1000 N/μm、研削軸とテーブル軸との間のループ剛性として150 N/μmを得た。

ループ剛性は、市販の超精密研削盤のそれと比較すると2倍以上の高い値ではあるが、軸単体の剛性と比較すると1/7程度であり、その主な低下原因は片持ち構造に起因するフレーム剛性にあると推察される。

3. シリコンウエハの研削実験

3.1 実験条件

本試作機により、クラックの発生しない延性モード研削が可能かどうかを確認するため、6"のシリコンウエハを用いて試し研削を行った。実験には、あらかじめGC 600 Hの砥石で作用面の振れを0.36 μmにツルーイングした#3000のレジンボンドダイヤモンドホイールを使用した。図9に振れの測定結果を示す。この結果には研削軸自体の回転精度も含まれている。研削実験ではホイール回転数を1800 rpmに、切込み速度を10 μm/minに設定した。したがって、計算上はホイール1回転当たりの切込み量は約6 nmとなる。比較用に、本試作機と同一研削方式の市販超精密研削盤を用い、#4000のダイヤモンドホイールを回転数3600 rpm、切込み速度8 μm/minでElid研削

Fig. 10 Comparison of subsurface damage by cross sectional TEM

Fig. 11 Comparison of SAM photographs (2 μm under the ground surface)

したサンプルについても同様に評価した。この場合、計算上のホイール1回転当たりの切込み量は約2 nmとなる。

3.2 加工ダメージの観察

クラックの発生しない延性モード研削の確認には、研削した表面だけでなく、表面下の情報を得ることが必要である。そこで、断面 TEM および超音波顕微鏡 (SAM) を用いて加工ダメージを評価した。

断面 TEM による観察例を図 10 に示す。本試作機および比較例ともに、観察した視野内ではクラックは確認できず、表面層に 0.5 μm 程度の転位ダメージが認められた。これは加工メカニズムが延性モードであることを示す有力な情報といえる。ただし、TEM の場合、観察できる範囲が非常に狭いため、より広い範囲で加工面を評価することが必要である。そこで、超音波顕微鏡 (SAM) を用いて加工ダメージを評価した。

SAM (Scanning Acoustic Microscope) は、表面下に潜在するクラックを反射超音波からの画像コントラストとして観察できる。超音波のフォーカスポイントを深さ方向に順次変えることで、コントラストの変化や輪郭のぼけが生じ、欠陥の深さを特定できる。観察はオリンパス製 UH 3 を用い、一定の連続波を用いるバースト波モード (音響レンズ: 400 MHz) で行った。表面から深さ 3 μm まで 1 μm ずつフォーカスポイントを深くして観察したところ、フォーカスポイントが深さ 2 μm の場合に最も強いコントラストと明確な輪郭が得られた。このときの観察例を図 11 に示す。試作機の場合は、研削条痕のゴーストのみが認められる。

一方、比較例では特定の研削条痕に沿って微小クラックと推定される、直径約 10 μm のスポット状欠陥が明確に認められる。これは Elid 研削のメカニズムが原因ではなく、研削装置の送り系や回転軸の運動

LTV < 0.4 μm Fig. 12 LTV map for 15 $\times$ 15 mm cellsTTV = 0.55 μm

Fig. 13 Bird's-eye view of ground silicon

精度が D_c 値以下になっておらず、設定上は D_c 値以下の切込みを与えても実際には D_c 値以上の大きな切込みが与えられていることが原因と考えられる。

3.3 加工精度

シリコンウエハには、無歪であると同時に高い形状精度すなわち平面度が求められる。そこで、非接触光学センサを備えた X-Y 操作方式の超精密平面度測定器¹³⁾を用いて、研削したシリコンの LTV および TTV を測定した。図 12 および図 13 に示すように、15 $\times$ 15 mm のすべてのセルについて、LTV が 0.4 μm 以下、TTV が 0.55 μm であった。

本方式の場合、高い平面度を得るには、研削軸とテーブル軸の平行度やチャック面の平面度が重要な項目の一つである。現状ではこれらはハーフミクロンレベルであり、さらに平面度を改善するには、熱変形や軸の傾きを補正する機構の検討が必要と考えられる。

4. 結 言

シリコンウエハにおける延性モード研削の実用化を目指して超精密研削装置を試作し、以下の結果を得た。

- (1) レーザスケールの公称分解能を超えるナノメートルオーダーの送り分解能を確認した。
- (2) 1000 N/ μm 以上の軸剛性と 150 N/ μm の

ループ剛性を達成した。

- (3) シリコンウエハの試し研削を行い、以下のことを確認した。

- i) 加工ダメージ深さが約 0.5 μm であること。
- ii) クラックの発生しない延性モード研削が可能であること。
- iii) 6" サイズの加工精度として、LTV 0.4 μm 以下、TTV 0.55 μm を得た。

謝 辞

加工ダメージを評価する上で、オリンパス光学および日鐵テクノロジーの協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) K. E. Puttick, M. R. Rudman, K. J. Smith, A. Franks and K. Lindsey : Single-Point Diamond Machining of Glasses, Proc. Roy. Soc. Lond., A 426, (1989) 19.
- 2) 宮下政和 : ぜい性材料の延性モード研削加工技術, 精密工学会誌, **56**, 5 (1990) 782.
- 3) T. A. Dow and R. O. Scattergood : Ductile/Brittle Transition and Development of Ductile Mode Grinding Technology, 精密工学会誌, **56**, 5, (1990) 794.
- 4) P. A. McKeown, K. Carlisle, P. Shore and R. F. J. Read : Ultra-Precision, High Stiffness CNC Grinding Machines for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials, 精密工学会誌, **56**, 5, (1990) 806.
- 5) J. Yoshioka, F. Hashimoto, M. Miyashita, A. Kanai, T. Abo and M. Daito : Ultraprecision Grinding Technology for Brittle Materials, ASME PED-vol. 16, (1985) 209.
- 6) 吉岡潤一, 小泉孝一 : 平面研削盤の砥石切込み送り系について (第 2 報), 昭和 55 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1980) 122.
- 7) M. Miyashita and A. Kanai : Development of the Load Compensator for Cylindrical Grinding Machines, Ann. CIRP, **25**, 1, (1976) 313.
- 8) M. Miyashita and J. Yoshioka : Development of Ultra-precision Machine Tools for Microcutting of Brittle Materials. Bull. Japan Soc. Prec. Eng., **16**, 1, (1982) 43.
- 9) A. Kanai, H. Sano, J. Yoshioka and M. Miyashita : Nanometer Positioning Based on the Principles of Force Control, ASPE Ann. Conf. in Columbus, (1987).
- 10) 吉岡潤一, 志村英男, 高橋正明, 橋本福雄, 宮下政和 : 超精密研削加工について (第 1 報), 昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1986) 55.
- 11) 野瀬哲郎, 久保 紘, 安永暢男 : 脆性材料のナノ研削領域における力学的挙動, NANO GRINDING, **1**, 1 (1990) 29.
- 12) T. G. Bifano, T. A. Dow and R. O. Scattergood : Ductile-Regime Grinding : A New Technology for Machining Brittle Materials, Tran. ASME, **113**, May (1991) 184.
- 13) 井口信明, 林 孝, 進藤健一, 直居 薫, 安永暢男, 阿部耕三 : 超精密平面度測定装置の開発, 1992 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1992) 251.