研磨屑粒子を含む CMP スラリーの SPH 流動シミュレーション*

高野 薫** 山田耕一郎*** 武澤伸浩† 鈴木辰俊†† 稲村豊四郎†

SPH-based Flow Simulation of Polishing Slurry Including Polished Debris in CMP

Kaoru TAKANO, Koichiro YAMADA, Nobuhiro TAKEZAWA, Tatsutoshi SUZUKI and Toyoshiro INAMURA

Making the surface of insulation layer flat using CMP (Chemical Mechanical Polishing) is important for producing IC (Integrated Circuit). Although simulations of CMP have been carried out using various methods to clarify the effect of working conditions, behavior of slurry including polished debris has not been clarified yet. In this paper, simulation of CMP is carried out using SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) in which slurry including polished debris can be handled. The behavior of polishing slurry and pad damage caused by the slurry are analyzed for various strength of interaction between polished debris and for various ditches on a polishing pad. It is shown that polished debris become bigger in the neighborhood of polished surface when interaction between polished debris becomes stronger. On the other hand, when interaction becomes weaker on ditches become shallower, the number of small polished debris that circulate within the ditches increases. The polishing pad is damaged rapidly for strong interaction between debris and for shallow ditches on a polishing pad.

Key words: CMP, SPH, simulation, slurry flow, polished debris, polished surface, pad damage

1. 緒 言

CMP 加工では、研磨屑、研磨砥粒を含む研磨スラリーの流動特性が、研磨レート、マイクロスクラッチ等に密接に関係する¹⁾ために、CMP 加工を理解する上で、このスラリー流動特性を調べることが極めて重要である。実測手段としては、スラリー中の粒子計測カウンター²⁾等が開発されているものの、現段階では加工プロセス中の粒子を含むスラリー挙動を実際に観察することは困難である。また、研磨剤の種類、研磨パッドの表面形状や材質など、さまざまな加工条件によって加工プロセスは変化する。したがって、加工条件を変化させながら研磨スラリー挙動を系統的に予測することが重要であり、これに対してはシミュレーションが有効なツールの 1 つであろう。

これまでにスラリーの流動やスラリー中の粒子に注目したシミュレーションとして、研磨屑を含まないスラリーの挙動³⁾、スラリーの粘性の影響⁴⁾、研磨屑や研磨砥粒による研磨メカニズム⁵⁾のシミュレーションは行われている。しかし、研磨屑を含むスラリーの流動に関するシミュレーションは行われていない。

そこで本研究では、加工屑(固体)を含んだ流れの解析が可能である SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics)を用いて、研磨スラリーの 2 次元シミュレーションを行った。一般に、シミュレーションを行う際は、実際の加工条件を可能な限り再現するようにモデル化する方法がとられる。これに対し、本研究ではこれとは逆の立場をとった。すなわち、特定の材料、加工条件をむしろ離れ、各加工パラメータ(ウエハ、スラリー、パッド

材質(材質間の親和性)、パッド溝形状)と研磨品質、パッド寿命との定性的関係を調べることに重点を置いた。このように材料を限定しないシミュレーションを行うことで、より汎用性の高い知見が得られると考えたからである。具体的には、対象となる材料を特定せず、様々なウエハ材質、研磨剤の成分の組み合わせを想定して、研磨屑同士(ウエハ-ウエハ)、研磨屑(ウエハ)-スラリー、研磨屑(ウエハ)-パッド間の親和力を変化させた場合、また、研磨パッドの幾何学条件である溝の深さを変化させた場合の研磨スラリーの挙動を調べる。さらに、研磨パッドの材質変化に対し、研磨パッドが受ける損傷について考察した。

2. SPH 法と支配方程式

本研究では、研磨屑(固体)を含むスラリー(液体)の解析を行う。液体の支配方程式はナビエーストックス(NS)方程式を使う。一方、加工屑に働く力は、液体から受ける力と屑同士の相互作用がある。液体から受ける力は屑粒子を NS 方程式に従って動かせば自然に入る。屑同士に働く力は、Tanaka⁶⁾らと同様、式(1)の Lennard-Jones(LJ)ポテンシャルを屑粒子間距離 r で微分して得た。

$$\phi(r) = k \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (1)$$

ここで、 ϕ は粒子間ポテンシャル、 k はポテンシャルの深さ(粒子間結合力の強弱)、 σ は最近接距離を表す。この相互作用は、原子間ポテンシャルではなく、屑同士の親和性を表す便宜的なものである。本研究では式(1)中の k を変化させることで、この相互作用の強弱を変化させ、材質の変化を考慮した。なお、本研究におけるこの親和性にはスラリーとの化学作用等全ての相互作用を陰に含んだものとなっている。

* 原稿受付 平成 18 年 1 月 23 日

** 正 会 員 (株)日本ヒューレット・パカード(東京都千代田区 5-7)

*** 正 会 員 舞鶴高専(京都府舞鶴市宇白屋 234)

† 正 会 員 名古屋工業大学(名古屋市昭和区御器所町)

†† 正 会 員 (株)東邦エンジニアリング株式会社(三重県四日市山分町川之下 443)

SPH 法では、位置 x における連続体としての物理量 $f(x)$ を式(1)のように、近傍粒子 j の物理量 f_j の重み付き平均で表す。

$$f(x) = \sum_j f_j \frac{m_j}{\rho_j} W(x - x_j, h_j) \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{\pi h_j^2} \exp \left\{ -\frac{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}{h_j^2} \right\} \quad (3)$$

ここで、 m_j 、 ρ_j はそれぞれ近傍粒子 j の質量、密度を表す。また、重み関数 W は式(3)のガウス関数を用いた。ここで、 h_j はガウス関数により平均化される範囲の広さを表している。重み付け平均には、屑粒子も含まれるため、スラリー、パッドにも k を変化させた影響が取り込まれることになる。すなわち、 k を変化させることで、屑 - パッド、屑 - スラリー間の親和力も陰に変化することになる。実際のシミュレーションでは、NS 方程式に式(2)を代入している。圧力は準非圧縮性流体に関するボリトロップの式を用い密度から求めた⁹⁾。

3. シミュレーションモデル

図1にシミュレーションモデルを示す。全粒子数を 11,000 個、各粒子の粒子半径を $5.0 \mu\text{m}$ とした。研磨屑粒子もこのサイズで表される。本研究の研磨屑粒子はスラリー中に浮遊する微細な被ポリシング材粒子を考えているので、実際の屑よりはるかに大きい。ただし、SPH では 1 個の粒子サイズ以下の分解能をもっていないため、サブマイクロ以下の研磨屑を多量に含んだスラリーも研磨屑粒子として表現されることになる。したがって、本シミュレーションで表されている研磨屑粒子は必ずしも単体の研磨屑粒子であるとは限らないことに注意する。また、ウエハとパッド間の距離についても実際のサイズよりも大きくなっている。これらのサイズ設定は、すべて計算機的能力制限のためである。ここでは、屑同士の親和性、屑と液体との相互作用に重点を置くことにし、屑の基本粒子サイズが結果に重大な影響を及ぼさないよう配置する。ウエハとパッド間の距離も、屑粒子サイズとの相対関係を考慮して決めた（研磨屑粒子サイズを基準に、実機でのウエハ、パッドの相対距離に近くなるように設定している）。シミュレーションを行ううえで、ウエハは銅、スラリーには水の物性値を便宜的に与えているが、これらは式(1)中の k の値を変えることで仮想的に他の物質へと変わる。すなわち、スラリーとして水に近い物性値をもつものを想定した場合、ウエハ材質を変化させたシミュレーションとなる。また、ウエハとして銅に近い物性値をもつものを想定した場合、スラリー成分を変化させたシミュレーションとして捉えることができる。

溝をつけた研磨パッドによる加工を考え、研磨パッドの一つの溝とウエハの接触する部分をモデル化した。また、 x 方向に周期境界条件を用い、ウエハ、研磨パッドが x 方向に多数並んでいるような自由表面から離れた部分をモデル化している。シミュレーション中、パッドは剛体し、ウエハはパッドに対して相対速度 583.3mm/s で x 正方向に等速度で動くものとする。このウエハ速度は実機のデータをもとに設定した。初期条件として図中斜線領域のスラリーに上端 583.3mm/s 、下端 0mm/s の勾配をつけた初速度を与えた。なお、実際の加工プロセスでは、パッド溝と研磨方向の相対関係が時々刻々変化するが、ここでは溝の影響が最も現れる断面で 2 次元化した。

Fig.1 Model used for flow simulation of polishing slurry

ところで、ウエハ表面近傍のスラリー量およびその成分と化学的研磨レートは密接に関係する²⁰⁾¹¹⁾。厳密なシミュレーションを行う場合、このスラリー量や成分を再現し、研磨レートをコントロールする必要があるが、これは量子力学計算を含む膨大なシミュレーションが必要となる。本研究では、材料を特定しないシミュレーションを行っていること、また、発生した研磨屑がどのような挙動を示し、CMP プロセスにどのような影響を与えるかに特に注目しているために、研磨レートの厳密なコントロールは行わない。本シミュレーションでは、スラリーとウエハの境界部分に、研磨屑粒子を一層配置する。その後、1 ステップ毎に図中斜線領域上半分（ウエハ表面から 0.05mm ）に存在するスラリーと研磨屑の割合を測定する。スラリー粒子の割合が 95%（この値は、便宜的なものであり、この値を変化させることで、スラリー量、成分と研磨レートとの関係をコントロールできる）を超えた場合、ウエハ表面から一定距離（ $10 \mu\text{m}$: 粒子 1 個分）に存在するスラリー粒子を新たな研磨屑粒子に変えることで研磨を進行させた。

実際の CMP 加工では、様々なウエハ、スラリー、パッド材質の組み合わせが考えられ、これに応じた材質間の親和性が働くことになる。また、研磨パッドの溝の深さにより研磨レートに影響を及ぼすと考えられる。そこで、式(1)のパラメータ k ($k = 10^{-8}, 10^{-9}, 10^{-10}$)、溝の深さ d ($d = 1.0\text{mm}, 0.5\text{mm}, 0.25\text{mm}$) を変化させた計 9 パターンのシミュレーションを行って、これらの関係を調べた。シミュレーションは、1 タイムステップを $1.0 \times 10^{-6}\text{s}$ ($1.0 \mu\text{s}$) とし、各パターンについて 2.0s まで行った。

4. スラリー特性

4.1 研磨屑粒子の挙動

図2から図4に、流動する研磨屑の時間変化を示す。ウエハ粒子は灰色、パッド粒子は茶色、スラリー粒子は青色、また、研磨屑粒子は発生した順に、黄→赤→緑→ピンクとした。

図2($k = 10^{-8}$, $d = 1.0\text{mm}$)より、研磨屑粒子同士の粒子間結合力が強い場合、研磨屑粒子同士が結合しやすいので、より大きな研磨屑を形成する。発生した研磨屑粒子は初め加工面付近を流れる。その後、研磨屑粒子はパッドの溝の右側から溝内に入り、溝内に堆積していく。溝に入る研磨屑粒子の多くは、パッドの側面をすべるようにして沈んでいくが、図2中(A)、(B)程度の大きさをもつ研磨屑粒子の挙動を追うと、垂直ではなく斜めに沈んでいく。したがって、溝内のスラリーにも流れが発生していることがわかる。生成された大きな研磨屑粒子は、す

Fig.2 Behavior of polishing slurry ($k=10^{-8} \text{ J}$, $d=1.0 \text{ mm}$).
 d : depth of groove on pad surface
 k : coefficient of interaction between polished debris.

Fig.3 Behavior of polishing slurry ($k=10^{-10} \text{ J}$, $d=1.0 \text{ mm}$)

べて溝内に沈むわけではなく、加工面付近を流動している粒子が存在することがわかる。Chagarov ら⁶⁾は CMP 加工における原子レベルの機械的研磨をシミュレートしており、同種材料での材料除去が起こりうることを示している。したがって、図 2 のような加工面付近の大きな研磨屑粒子は再びウエハ表面に接触し、加工面にマイクロクラッチを引き起こす可能性がある。

Fig.4 Behavior of polishing slurry ($k=10^{-10} \text{ J}$, $\text{depth}=0.5 \text{ mm}$)

Fig.5 Behavior of polishing slurry ($k=10^{-10} \text{ J}$, $d=0.25 \text{ mm}$)

また、このような大きな粒径の研磨屑粒子は、質量が大きいためスラリーの流れに乗りにくく、停滞しやすい。したがって、加工面近傍スラリー流体の流れの障害となり、スラリーが流れにくくなる。このような場合、スラリーの流量が減り、研磨屑及びスラリーの排出効率が低下すると言える。

図 3($k=10^{-10}$, $d=1.0 \text{ mm}$)より、研磨屑粒子同士の粒子間結合力が弱い場合、結合しない研磨屑粒子が多くなることがわかる。結合力が強い場合(図 2)と同様に、研磨屑粒子は溝の右側から溝内に入り堆積していく。ただし、一旦底に沈んだ場合でも動きを止めず、底付近で動き続けているように、結合しない研磨屑粒子は溝内での流れの影響を受けやすい。また、溝の入り口付近の研磨屑粒子には、底に沈まないものが存在する(図 3 : C)。一方、加工面付近に注目すると、図 2 に比べてピンク色(最も新しい)の粒子が多いことがわかる。このことは、古い研磨

Fig.6 Trajectory of polished debris

屑がスラリーの流れによって表面近傍から離れ、表面近傍におけるスラリー粒子の割合が95%を保たれていることで、新たな研磨屑粒子を生成していることを表している。すなわち、結合力が弱い場合、研磨屑が小さいためスラリーが流れやすく、研磨屑およびスラリーの排出効率が上がると言える。ところで、Lin ら¹¹⁾は実験によって研磨剤の濃度が下がると研磨レートが下がることを示している。このことを考慮すると、図2の場合よりも加工面近傍に対してスラリーの占有体積が高い（局所的なスラリー濃度が高い）ため、図2の場合よりも化学的研磨が起りやすくなると言える。

次に、粒子間結合力の強さ($k=10^{-10}$)を変化させず、溝深さの違いによる研磨屑粒子の流れを比較する。図4($k=10^{-10}$, $d=0.5\text{mm}$)では、粒子間結合力の強さが図3の場合と同じなので、結合せずに流動する研磨屑粒子が多い。また、図2, 3と同様に研磨屑粒子は右側から溝内に入り、時間経過とともに、溝全体に研磨屑粒子が充填する(2.0s)。ただし、溝の左側の入り口付近(図4: D)に注目すると、溝が深い場合に比べ、明らかに再浮上する研磨屑粒子の数が多くなっている。図5($k=10^{-10}$, $d=0.25\text{mm}$)の場合も、同様の傾向を示す。ただし、溝の深さを比較すると(図3～図5)、溝が浅い程、研磨屑粒子の挙動が激しく、加工面付近の研磨屑粒子が多くなることがわかる。このように、再浮上する研磨屑粒子が多くなると、加工面付近におけるスラリー占有率(研磨剤濃度)が減少するために、ウエハスラリー間の化学的研磨レートが下がると考えられる。

以上、各条件による研磨屑粒子の挙動を解析した結果、研磨屑粒子の粒子間結合力が強い場合、加工面付近の大きな研磨屑が原因で研磨屑、スラリーの排出効率の低下やマイクロクラッチが生じる可能性がある。また、粒子間結合力が弱い場合でも、溝が浅いと再浮上した研磨屑粒子が原因で化学的研磨レートが低下する可能性がある。さらに、粒子間結合力が強く、溝が浅いと、溝が研磨屑で埋まりやすくなる。その場合、加工面付近に大きな研磨屑粒子が存在する確率がさらに高くなるために、化学的研磨レートが大きく低下する可能性がある。したがって、上記のようなウエハ表面近辺における様々なプロセスを考えると、加工精度向上には粒子間結合力が弱く、パッドの溝が深いほうが望ましいと言える。また、ここで述べているよう

Fig.7 Pressure distribution on polishing pad surface

Fig.8 Relationship between size of debris and pressure

な粒子間結合力は実験から調べることができるが、Rajendran ら¹²⁾のように CMP プロセスを対象とした量子力学計算を行うことで比較的容易に予測することが可能である。

4.2 研磨屑粒子の軌跡

研磨屑粒子の、溝内での挙動をより詳細に観察するために、研磨屑粒子($k=10^{-10}$)のみの軌跡を流線で表した結果を図6に示す。図6より、溝の深さ d に関係なく、ほとんどの粒子は溝の底に沈む。ただし、図6(b)(c)($d=0.5\text{mm}$, 0.25mm)より、スラリーは溝内で渦を描き、研磨屑粒子はその渦に乗り加工面へ再浮上している。このとき、発生するスラリーの渦は大きな渦が一つである。一方、図6(a)($d=1.0\text{mm}$)でも、(b)の場合よりは数は少ないが、研磨屑粒子は加工面に再浮上する。発生する渦は、入り口付近に小さな渦が一つ存在する。また、底の部分の粒子は、左側の側面から浮上する兆しをみせており、二つ目の渦が発生する可能性がある。

5. パッド特性

5.1 研磨屑粒子の粒径と圧力

CMP 加工では、被加工物であるウエハを加工する一方、研磨パッドも同時に損傷を受ける。ここでは、本シミュレーションで表したような研磨屑がパッドの損傷にどのような影響を与えるかを調べることにする。

Fig.9 Accumulated amount of particles on pad surface

そこで、まず、図 7 にウエハとパッド間(図 1 中斜線領域)に存在する研磨屑粒子の粒径とパッド表面にかかる圧力分布の一例を示す。図 7 は、 $k=10^{-8}$ 、 $d=1.0\text{mm}$ 場合の、0.5s 後の結果である。横軸は、モデルの左端(図 1 中パッドの左端)を 0 としたパッドの位置である。図 7 より、位置 1.0~1.5mm はパッドの溝の部分にあたり、圧力が発生していないが、それ以外の位置では、大きな粒径の研磨屑粒子が存在する位置で、パッド表面に高い圧力が発生している。

図 7 のような研磨屑粒子の粒径と、その研磨屑粒子が存在する位置でのパッド表面圧力の関係を任意時間での 9 パターンの条件について調べ、圧力と研磨屑粒子の関係としてまとめたものが図 8 である。図 8 より、粒子サイズとパッド表面が受ける圧力は比例しており、研磨屑粒子の粒径が大きい程、パッド表面に与える圧力が大きいことがわかる。

ところで、実際のパッド表面には McGrath¹³⁾らが示しているような μm オーダの表面の凹凸や孔が存在する。彼らは実験結果から、表面の凹凸、孔が研磨において重要な役割をはたしており、この凹凸、孔が磨耗、もしくは粒子の充填によって減少するとパッドの損傷となり、研磨率が下がることを示している。図 7 より、パッド表面の局部圧が高い位置には粒径の大きい屑が存在しており、このような研磨屑は図 2~5 と同様な挙動によって、パッドの凹凸、孔に侵入することが十分に考えられる。結果的にパッドの凹凸、孔を減少させることとなりパッドの損傷につながってしまう。また、このようにパッド表面上に研磨屑、研磨砥粒が付着した状態で高い圧力が加わると、固体同士の機械的研磨のような作用が働きパッドの損傷を引き起こすと考えられる。本シミュレーションでは最小粒子サイズが半径 $5.0\mu\text{m}$ となっているため、これ以下の微細な屑や砥粒は表現されていない。ただし、図 3 の結果からも粒子サイズが微細である程、パッドの凹凸、孔に侵入しやすいと考えられる。したがって、本シミュレーションでは表現されていない微細な粒子も前述の径の大きい粒子と同様のメカニズムでパッドの損傷に寄与すると言える。

5.2 パッドの寿命

パッド表面にかかる圧力は、その近傍を流動する研磨屑粒子の粒径による影響があることがわかった。図 2~図 5 より、研磨屑粒子の粒径と挙動は、研磨屑粒子間結合力(k)や溝の深さ(d)により変化する。したがって、 k 、 d によってパッドが受ける

Fig.10 Relation between pad durability and strength of particle interaction

Fig.11 Relation between pad durability and depth of groove on polishing pad

損傷も変化すると思われる。そこで、結合力および溝の深さとパッド寿命との関係について調べた。パッド寿命は以下のように評価する。ここで新たに、パッド強度を定義する。これは、設定値以上の圧力が(設定サイズ以上の屑粒子によって)発生した場合、パッドに損傷を与え、この粒子サイズをパッド強度 S_0 と呼ぶ。強度が強いパッドはサイズの大きい粒子から、弱いパッドは小さい粒子からも損傷を受けることになる。次にシミュレーション 2.0s 間でパッド近傍に存在する粒子サイズの総和を求めていく(図 9 点線)。このときパッド強度 S_0 を、 $S_f=2.0$

$\times 10^{-3} \text{mm}^2$, $S_2=3.5 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ の 2 パターン(S_1 , S_2 の形状はいろいろある)に設定し, 2 つの値を超えた粒子サイズのみをカウントする. 図 9(a)に $k=10^{-9}$, $d=0.5 \text{mm}$, S_1 の場合を示す. この推移を一次関数(図 9: 赤実線)で近似し, 設定寿命 1400 分(T_n)での粒子サイズの総和 S_n を算出する. この $T_n=1400$ 分を基準値とする. 他の条件についても同様に一次関数で近似し, S_n に達する時間 T_a を求める(例えば, 図 9(b)). 最後に T_a の T_n に対する比 $T(=T_a/T_n)$ を求め, $k=10^{-9}$, $d=0.5 \text{mm}$, S_1 の場合に対する相対的な寿命を求める. 基準値 T_n での T は 1.0 となり, 各パターンにおいて求めた T が 1.0 以下ならパッドが損傷しやすく 1.0 以上なら損傷しにくいことになる.

図 10 より, 研磨屑同士の粒子間結合力を変化させた場合, グラフが全体的に右下がりの傾向を示す. したがって, 研磨屑粒子の粒子間結合力が強い程, パッドの寿命は短い. また, パッド強度の影響を考えると(図 10: 実線と点線の同記号同士), パッド強度が高い場合(点線), その寿命は結合力が小さい領域($k=10^{-9}$ 以下)では結合力が弱くなると急激に延びる. 一方, 強度が低い(実線)場合, 結合力が小さい領域では結合力に依存するものの, 寿命の延びは少ない. ところで, 図 10 ではパッドの強度が低い場合(実線), $k=10^{-9}$ に最低値が存在する. これは, 粒子同士の結合により大きな研磨屑粒子を生成する一方, 再浮上する研磨屑粒子や新たな研磨屑粒子の生成(図 3 ピンク色の粒子)が増えるという図 2 と図 3 が混在したような現象が起こり, 結果的にパッド局部加圧力が最も高くなるからである. 本研究では化学反応に必要なスラリー量を 95%としているが, この値が変化すると図 2 と図 3 が混在する臨界値 $k=10^{-9}$ も変化する. このことは, 実際の加工において, スラリーの化学反応性を変化させれば, パッド寿命も変動することを示唆している.

図 11 より, 研磨パッドの溝の深さを変化させた場合, グラフが全体的に右上がりの傾向を示す. したがって, 研磨パッドの溝が深い程, 研磨パッドの寿命が長い. パッド強度の影響を見ると(図 11: 実線と点線の同記号同士), パッドの強度に関係なく, その寿命は溝が浅い程短くなる(グラフの傾きが等しい). 以上, パッドの受ける損傷を考えると, 屑同士の結合力が弱く, パッドの溝が深いほうが, パッドの寿命は長くなる. ただし, スラリーの反応性を変えることで, この傾向を変化させることが可能である.

6. 結 言

本研究を行った結果, 次のような結果を得た.

- (1) SPH 法を用いて, 研磨屑粒子を含んだ CMP スラリーの流動シミュレーションを行った.
- (2) 屑同士の親和力が強い場合, マイクロスクラッチやスラリー排出効率の低下を引き起こす可能性がある大きな研磨屑がウエハ表面付近に存在する.
- (3) 研磨パッドの溝が浅い場合, 多量の研磨屑粒子がパッド溝内部からウエハ表面付近に再浮上する.
- (4) 研磨屑同士の親和力が弱い程, また, 溝が深い程, 研磨パッドは損傷を受けにくい.

参 考 文 献

- 1) H. Liang et al.: Lubricating behavior in chemical-mechanical polishing of copper, *Scripta Materialia*, **46** (2002) 343.
- 2) C. Zhou et al.: Fluid pressure and its effects on chemical mechanical polishing, *Wear*, **253** (2002) 430.
- 3) 津田直紀: 原液スラリーの測定例 -スラリー用粒子カウンターKS-71-, *クリーンテクノロジー*, **11**, 6 (2001) 15.
- 4) C. Rogers et al.: Analysis of Flow Between a Wafer and Pad During CMP Processes, *Journal of Electronic Materials*, **27** (1998) 1082.
- 5) B. Mullany et al.: The effect of Slurry Viscosity on Chemical - Mechanical Polishing of Silicon Wafers, *Journal of Materials Processing Technology*, **132** (2003) 28.
- 6) E. Chagarov et al.: Molecular Dynamics Simulations of Mechanical Deformation of Amorphous Silicon Dioxide During Chemical - Mechanical Polishing, *Journal of Applied Physics*, **94**, 6 (2003) 3853.
- 7) Y. Ye et al.: Simulation of Chemical Planarization of Copper with Molecular Dynamics, *Applied Physics Letters*, **81**, 10 (2002) 1875.
- 8) H. Tanaka et al.: Simulation Method of Colloidal Suspensions with Hydrodynamic Interactions: Fluid Particle Dynamics, *Physical Review Letters*, **85**, 6 (2000) 1338.
- 9) J. J. Monaghan: Simulating Free Surface Flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, **110** (1994) 399.
- 10) P. B. Zantye et al.: Chemical mechanical planarization for microelectronics applications, *Materials Science and Engineering*, **R 45** (2004) 89.
- 11) S. C. Lin et al.: Effect of slurry components on the surface characteristics when chemical mechanical polishing NiP/Al substrate, *Thin Solid Films*, **483** (2005) 400.
- 12) A. Rajendran et al.: Tight-binding quantum chemical molecular dynamics simulation of mechano-chemical reactions during chemical-mechanical polishing process of SiO_2 surface by CeO_2 particle, *Applied Surface Science*, **244** (2005) 34.
- 13) J. McGrath et al.: Polishing pad surface characterization in chemical mechanical planarisation, *Journal of Materials Processing Technology*, **153**, 154 (2004) 666.