固定砥粒を用いた STI 平坦化プロセスの研究 (第 1 報)

—平坦化加工性向上のための要因分析—

片桐創一** 安井 感** 山口宇唯** 河村喜雄** 河合亮成*** 金井史幸† 徳田光雄††
本田実††† 森山茂夫†††

Study on STI planarization process using fixed abrasive tool (1st Report)
-Factor analysis to obtain flatter surface-

Souichi KATAGIRI, Kan YASUI, Ui YAMAGUCHI, Yoshio KAWAMURA, Ryousei KAWAI, Fumiyuki KANAI,

Mitsuo TOKUDA, Minoru HONDA and Shigeo MORIYAMA

Novel chemical mechanical polishing (CMP) process using a fixed abrasive tool (FX-tool), which is a kind of grindstone, was developed for dielectric planarization. In order to obtain flat surface for 45-nm-node of semiconductor generation, two points that are adopting stiff polishing pad/tool and reducing concentration of free-abrasives become critical issues. Newly developed FX-tool has more than ten times higher Young's modulus than that of a conventional CMP pad, and simultaneously, concentration of free abrasives on its surface can be controlled by polishing time. In experiments using several test-wafers, less than 30 nm of dishing was obtained up to 3 mm-length-pattern. Additionally, polyacrylic ammonium (PAA) effectively affects to increase degree of selectivity between oxide and nitride for shallow trench isolation (STI) process. The selectivity of 41 was obtained at 3 vol. % concentration of PAA. STI test wafers were successfully polished without any additional processes such as etching back.

Key words: chemical mechanical polishing, fixed abrasive, shallow trench isolation, planarity and selectivity

1. 緒 言

半導体デバイスの集積度は年々高まり、国際ロードマップによれば今後も継続する傾向であることがわかる。CMP (Chemical Mechanical Polishing) は、高い段差解消能力から、リソグラフィの焦点深度不足を補う技術であり、半導体の量産手段として定着している。しかしながら、現状の CMP の平坦化性能は、必ずしも要求を満足していない。特に STI (Shallow Trench Isolation) 工程では、平坦化後の残段差と窒化膜厚ばらつきを 20 nm 以下とする必要があることから、CMP 工程の前に補助パターン作成や凸部のエッチング等の付加プロセスが必須となり、コスト増加の要因となっている。さらに、2010 年頃に適用となる 45 nm ノードのデバイス製造時には、リソグラフィの焦点深度は 200 nm 程度まで狭帯化が進むため、STI 層以外の層間絶縁膜、ダマシム配線、タングステンプラグ工程のすべてにわたって、平坦化性能が不足することが懸念される。STI 層の CMP 平坦化の課題をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 図 1 に示すようにパターン粗密と寸法の影響を受け、ディッシングという過剰研磨、窒化膜減りと酸化膜残りを生じる。
 - (2) スラリーに含まれる遊離砥粒の使用効率が低く、大量に廃棄されるため、環境に与える負荷が大きい。
- 筆者らは、高い平坦化加工性能と、砥粒の有効利用を両立す

る平坦化法として、CMP パッドより高い弾性率を有する砥石型の固定砥粒 (FX 砥石) を用いた手法 (以降、FX-CMP と呼ぶ) を開発した。本技術を半導体の CMP プロセスとして実用化するためには、従来の課題解決に加えて (1) 実用的な研磨速度 (200 nm/min 以上)、(2) スクラッチの低減、(3) ウェハ面内均一性といった性能を同時に満足しなければならない。このための開発項目は、砥粒、砥石、加工液の材料検討、砥石構造と物性値の最適化、ドレッシング技術開発、ウェハキャリアの開発と、多岐に渡る。

本論文では、FX 砥石、CMP パッドとウェハの弾性率と研磨中の遊離砥粒が、平坦化性能に及ぼす影響の机上と実験検討、及び、STI 平坦化に適用評価した結果について報告する。そのほかの項目については、続報で詳細に報告する。

2. FX-CMP の基本概念

図 2 に FX-CMP の基本概念を示す。FX 砥石に含まれる砥粒は、ガラス基板の研磨剤を高純度化した酸化セリウムであり、

Fig.1 STI CMP characteristic of planarity due to pattern density

* 原稿受付 平成 15 年 5 月 8 日。

** 正 会 員 (株)日立製作所 中央研究所
(東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280)

*** (株)日立製作所 (東京都千代田区神田駿河台 4-6)

† (株)日立製作所 (現、(株)ルネサステクノロジ; 東京都千代田区丸の内 2-4-1)

†† (株)日立ハイテクノロジーズ (東京都港区西新橋 1-24-14)

††† 日本特殊研砥(株) (京都府京都市吉祥院御池町 18)

†††† 正 会 員 ものつくり大学 (埼玉県行田市前谷 333)

Fig.2 Basic FX-CMP concepts

それら砥粒の結合にポリエステル樹脂を用いている。FX 砥石の圧縮弾性率 E は、 $0.5 \sim 1.0 \text{ GPa}$ であり、IC-1000 パッドと比較し、 $10 \sim 100$ 倍高い。この高い圧縮弾性率により、被加工物の凸部選択性を高めることができる。

次に加工液について述べる。一般的に CMP スラリーには、遊離砥粒が含まれるが、FX-CMP に用いる加工液は、遊離砥粒を含まない液体である。絶縁膜である SiO_2 を研磨する場合には、純水を加工液として用いることが可能であるので、高価なスラリーを必要としない。ただし、材料選択性を持たせる等、機能を付加するために添加剤を加える場合もある。それに加えて、表面に露出している砥粒を有効に作用させ、砥粒使用量を低減できるので、環境負荷の軽減効果を見込める。

装置構成は、ロータリープラテンを備える CMP 装置に類似している。異なる点は、CMP パッドを FX 砥石に置き換えることと、ドレッシング機能を一定圧力制御方式から、切込み量制御方式の定寸ドレッサとした 2 点である。定寸ドレッサは、FX 砥石表面を $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の微小切込み量で平滑に研削することにより、スクラッチ低減、加工均一性の向上、FX 砥石の長寿命化等を目的としたものである。本機能の詳細は続報に譲る。

3. 大パターンの平坦化

3.1 実験方法と結果

6 インチウェハに図 3 に示すテストパターンを形成し、平坦化特性を評価した。パターン密度は、すべて 50% である。0.2

Fig.3 Test pattern structure

Table 1 Experimental conditions		
Back pressure		$3.43 \times 10^4 \text{ Pa}$
Rotational speed	Platen	20 rpm
	Carrier	64 rpm
Supplying-rate of process liquid		200 cc/min
Wafer size		6 inch ($\phi 150 \text{ mm}$)
Young's modulus of FX-tool		0.8 GPa

$\sim 5 \text{ mm}$ ライン&スペースをエッチングにより形成し、段差を 800 nm とした。その上にプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) を用いて酸化膜を 1800 nm 成膜した。

実験条件を表 1 に示す。また、比較のために CMP パッド (IC-1000+SUBA400) とコロイダルシリカスラリーの組合せでも加工した。研磨により除去する膜厚は、 970 nm となるように加工時間を管理した。

実験結果を図 4 (a) に示す。横軸はパターン寸法であり、縦軸は、ディッシングを測定した結果である。ディッシングとは、凹部と凸部の高さの差であり、理想的にはゼロとなる。CMP の結果は、パターン寸法が 1 mm を越えると急激にディッシングが増加するが、FX-CMP では 3 mm までは少ない。 3 mm を越えると増加に転じる傾向を示している。

3.2 弾性変形の影響

上記実験結果を弾性論の立場から検証する。弾性体の圧縮弾性率を E とし、表面の半径 a の円形領域に一定圧力 P を受ける場合の最大変形量 δ_{max} は、

$$\delta_{\text{max}} = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) P \cdot a}{E} \quad (1)$$

と表され、荷重領域の中心に発生する²⁾。ここで、 ν はポアソン比で、CMP パッド、FX 砥石とも、およそ 0.3 である。式 (1) より圧縮による変形量 δ_{max} は、圧縮弾性率にほぼ反比例する。つまり、低弾性なほど変形しやすく凸部選択性が低下する。本実験は矩形パターンを用いているが、この傾向は形状に関係なく同様に成り立つと仮定する。IC-1000+SUBA400 の E は $2.9 \times 10^7 \text{ Pa}$ ¹⁾、FX 砥石は、約 28 倍高い $8 \times 10^8 \text{ Pa}$ である。図 4 (a) の太い実線は、CMP の $1/28$ の値であり、FX-CMP の結果はパターン寸法 3 mm まで一致している。一方、パターン寸法 3 mm 以上の特性を説明するには、ウェハ基板の弾性変形を考慮する必要がある。ウェハ裏面を一定圧で加圧する加工形態をモデル化すると図 4 (c) のようになることから、ウェハの変形は一定加圧下の両端支持梁と考えることができる。この時のたわみ y は、

(a) Remained step-height and estimated curves

(b) Definition of remained step-height and pattern length

(c) Wafer bending model

Fig.4 Experimental results of dielectric planarization

$$y = -\frac{P \cdot x}{24 \cdot E \cdot I} \left(x^3 - 2 \cdot w \cdot x^2 + w^3 \right) \quad (2)$$

と、表される。ここで、 I は、断面 2 次モーメントである。ウェハの E を 160 GPa、厚さ t を 600 μm 、パターン寸法を w として、梁の中心($x = w/2$)の最大たわみ量を図 4(a)に破線で示した。この計算結果は、実験結果とよく一致することから、パターン寸法が、3 mm 以上の大パターンの平坦化ではウェハの弾性変形が無視できないことがわかる。

4. 小パターンの平坦化

4.1 実験方法と結果

大パターンの平坦性は弾性変形の影響が大きく、ディッシング量も 100 nm 以上発生していた。ここでは、パターン寸法が数 100 μm 以下を対象とし、CMP と比較した平坦性の評価を行う。評価用ウェハは、図 5 に示す DRAM (Dynamic Random Access Memory) のテストパターンである。チップ幅は約 7 mm で、制御回路部は 1 mm、スクライブラインは 200 μm 程度である。メモリ領域のブロックは、幅 160 μm 、ブロック間は、20 μm である。このテストパターンは、トランジスタ形成後の配線形成前の形状を模擬しており、メモリ領域は高く、制御回路やスクライブラインは低い。段差は 570 nm とし、その上に酸化膜を 990 nm 成膜した。加工条件は、第 3 章の大パターンと同じであり、FX-CMP と CMP を比較した。

加工後の形状を触針式の段差計で測定した結果を図 6 に示す。CMP で加工した場合、制御回路部のディッシングが 100 nm 程度生じている。これは、テストパターン形状が 1 mm 幅の凹パターンと等価であり、パッドの圧縮弾性変形が凹部で回復されて、その先端が凹部に接触するために生じたものであると思われる。一方、FX-CMP は、10 nm 程度まで平坦化されている。また、スクライブラインの部分は、完全には平坦化されず、CMP の場合よりは小さいが、20-30 nm のディッシングが生じている。

Fig.5 Feature of test pattern for dielectric planarization on DRAM

Fig.6 Comparison of polished feature between FX-CMP and CMP

4.2 遊離砥粒の影響

ディッシングの発生要因は、パッドや砥石表面のマイクロメートルオーダーの凹凸形状と遊離砥粒の相互作用であると考えられる³⁾。ところが、CMP では加工メカニズム上、遊離砥粒とパッドが必要不可欠であるため、どちらかの要因を排除して因果関係を分離するための要因分析実験が困難であった。一方、FX-CMP では、FX 砥石表面の遊離砥粒濃度とディッシングの関係を、以下の方法により間接的に要因分析できる。

FX-CMP の加工シーケンスは、(1) 加工前に FX 砥石表面を定寸ドレッサによりドレスし、平滑で活性な砥粒面を露出、(2) 加工液を砥石表面に供給しながら、ウェハを砥石に押し付けながら研磨、(3) 予め設定した時間経過と同時に研磨を終了する工程をとる。これに加えて、定寸ドレッサを用いて加工中ドレスを行うこともできる。

研磨レートは、図 7 に示すように加工累積時間とともに低下する傾向がある。これは、砥石表面に露出した活性な砥粒が遊離すると共に摩滅して、徐々に減少することを意味する。つまり、定寸ドレス後の累積加工時間によって、遊離砥粒濃度をある程度制限できる。

ディッシング発生時における遊離砥粒濃度依存性の評価を試みた。遊離砥粒濃度は、ドレス直後の濃度と、その後の累積加工時間を増して、研磨レートが約 1/8 のレートに低減した濃度の 2 種類とした。遊離砥粒濃度は、ほぼレートに比例して減少すると仮定した。また、評価したウェハは、4.1 節のものと同等であり、評価パターンは 200 μm のスクライブラインとした。

図 8 は実験結果であり、横軸に凸部の研磨量、縦軸に凹部の研磨量をプロットしてある。凹部は、理想的には 570 nm の段

Fig.7 Removal rate versus polishing time without dressing

Fig.8 Characteristic of dishing due to free-abrasive density

差が解消されるまでは研磨されず、その後、破線で示すように凸部と比例して除去が進む。遊離砥粒濃度の高い実験結果は、残段差が約 250 nm 前後から凹部の除去が進行し、除去が進むにつれて破線に漸近する傾向がある。それに対し、低濃度の場合は、残段差が 50 nm まで凹部の除去は進行せず、結果的にディッシング発生を抑制できる。

5. STI 平坦化

5.1 STI 平坦化プロセス

最も高い平坦性を要求される STI 層平坦化に、FX-CMP の適用を試みる。STI プロセスは、図 9 に示すプロセスであり、絶縁膜の凹凸を除去する平坦化に加え、窒化膜の露出と膜厚の維持が要求される。この高い要求を満たすために CMP では、平坦化しにくい大パターンを選択的にエッチングして予め除去したり、凹部を保護するためにダミーパターンを形成したりする付加プロセスを用いざるを得ず、コスト増やスループット低下を招く要因となっている。FX-CMP による STI 平坦化プロセスは、これら付加プロセスを必要としない直接平坦化と、高い平坦化性能の両立を目的としている。

5.2 材料選択比の増加

STI 層平坦化においては、窒化膜の膜厚維持が重要である。このため、CMP においては、スラリーへの添加剤の導入による材料選択比の増加という方法がとられている。同様の手法の FX-CMP への適用を試みた。添加剤としては、水溶性のポリマー等の様々な物質が試みられている⁴⁾。ここでは、カルボン酸の一種であるポリアクリル酸アンモニウム(P.A.A.)を評価した結果について述べる。

P.A.A.の分子構造は、カルボン酸基にアンモニウム塩がついたものであり、アニオン系の水溶性物質で負に帯電する。加工液中の酸化膜と窒化膜のゼータ電位は、共に負に帯電しているが、電位の絶対値は酸化膜の方が高い。したがって、P.A.A.が水に溶けると、窒化膜の斥力が酸化膜に比べて低いいため、添加濃度に対する被膜厚さが異なり、窒化膜を研磨しにくくできる可能性がある⁵⁾。

実験には、酸化膜、あるいは、窒化膜を成膜したパターンなしウェハを用いた。図 10 に PAA 添加濃度と、酸化膜、窒化膜の研磨レートとの関係をプロットした。濃度を 1 vol. %まで増加すると、窒化膜のレートが急激に低下する。この現象により、酸化膜/窒化膜の選択比は増加し、その後、酸化膜のレートも低下するため、選択比は最大値を持ち、3 %添加時に 41 に達する効果がある。

この現象の分子量の依存性等についての検討は、続報に譲り、ここでは述べない。

5.3 STI 平坦化評価

実験したウェハのパターンは、図 11 に示すパターン粗密が 100 μm ピッチで 0 から 100 %まで 10 %きざみで形成されている STI 評価用のパターン(MIT964)から構成されている。最上部に成膜した酸化膜の形成には、プラズマ CVD を用い、エッチングによる付加プロセスは施していない。

加工条件は、表 2 のとおりである。加工液には純水に P.A.A. を 3 vol. %添加した水溶液を 200 cc/min で滴下した。前章で検討したディッシング特性を考慮し、ドレッシング条件は、加工前ドレスのみとし、加工中ドレッシングは行わずに酸化膜の段差解消時期には、遊離砥粒濃度が低下する条件とした。また、CMP でも同一仕様のウェハを加工して比較した。CMP として

は、コロイダルシリカスラリーと、酸化セリウムスラリーに添加剤を加える高選択比型のスラリーに対して IC-1000 + SUBA400 パッドという組合せの 2 種類とした。

図 12 に平坦化終了時の膜厚分布とパターン密度の関係をプロットした結果を示す。横軸は、パターン密度であり、縦軸は、

Fig.9 STI planarization procedure

Fig.10 Removal rate and selectivity between oxide and nitride

Fig.11 STI test pattern layout

Table 2 Experimental conditions for STI planarization

Back pressure		2.06x10 ⁴ Pa
Rotational speed	Platen	20 rpm
	Carrier	64 rpm
Supplying-rate of process liquid		200 cc/min
Concentration of PAA		3 vol. %
Wafer size		8 inch (ϕ 200 mm)
Young's modulus of FX-tool		0.96 GPa

Fig.12 Relationship between pattern density and remained film thickness

酸化膜と窒化膜の膜厚である。グラフ上部から凹パターン内の酸化膜（溝深さの 500 nm でディッシングなし），凸パターン上の窒化膜（初期膜厚の 140 nm でロスなし），凸パターン上の酸化膜残りを示している。

CMP では，パターン密度が 40 %以下になると凹パターン内の酸化膜厚が減少し，ディッシングする傾向があり，高選択比スラリーを用いた場合は若干改善されるが，ディッシング傾向に変わりはない。それに対して，FX-CMP は，パターン密度 0-100 %にかけてほとんどディッシングしない。

窒化膜厚減りに関しても，同様な傾向であり，CMP では，パターン密度 50 %，高選択比スラリーでは，20 %以下になると膜減りが顕著になるが，FX-CMP では，その傾向が見られない。

凸部の酸化膜残りも同様であり，CMP，高選択比スラリーでは，80 %以上のパターン密度になると研磨残りが発生するが，FX-CMP では，全パターン密度において酸化膜除去が完了している。

エッチングバック等の付加プロセスなし，低ディッシング，窒化膜減りの少ない STI 平坦化プロセスが，FX-CMP を用いることにより実現可能なことを確認した。

以上の検討結果が実プロセスパターンの平坦化において，有効であることを確認するために，0.3 μm ルールの 8 インチ STI テストウェハを用いて加工形状評価を行った。加工条件は，STI 標準パターンウェハの時と同様である。また，本テストウェハは，付加プロセスを施されていない。

図 13 に加工後のウェハ直径上に配置されたチップ内の評価パターン上の窒化膜厚分布を示す。初期膜厚は，80-90 nm であるので，ほとんど全体にわたって窒化膜減りなく平坦化が終了している。図 14 は，平坦化終了後の断面 SEM 写真である。白く見える部分が窒化膜であり，良好に露出していることと，酸化膜は，ディッシングなく溝に埋め込まれていることがわかる。

6. 結 言

半導体デバイス表面の酸化膜凹凸形状を平坦化するプロセスとして，固定砥粒を用いる FX-CMP (Chemical Mechanical Polishing using Fixed abrasive)を開発し，平坦化性能について実験検討を行い，次の結論を得た。

(1)FX-CMP の平坦化性能は，FX 砥石の圧縮弾性率が CMP パッドより 28 倍高いことに起因して改善されるが，ウェハのたわみによる限界があり，6 インチウェハの場合はパターン寸法が 3

Fig.13 Profile of remained nitride film thickness through 8-inch wafer

Fig.14 Cross-sectional SEM image of planarized STI layer

mm を越えると残段差が顕著になる。

(2) FX 砥石表面の遊離砥粒を制限することにより，研磨レート低下を伴うが，ディッシングを低減できる。

(3)STI 平坦化工程への適用には，上記項目に加え，酸化膜/窒化膜の研磨レート選択比を大きく取ることが重要であり，ポリアクリル酸アンモニウムを添加した加工液は，選択比を 3 から 41 まで増加させる効果がある。

(4)FX-CMP 技術は STI 平坦化プロセスにおいて，CMP では必須の付加プロセスを必要とせず，かつ，ディッシングレスで窒化膜厚減りの少ない平坦化を実現可能にする。

謝 辞

本研究を推進するにあたりご指導を頂いた，(株)日立製作所の武田英次氏，(株)日立ハイテクノロジーズの田地新一氏に感謝します。また，実験に多大な協力を頂いた(株)日立製作所の西村貞之氏，長澤正幸氏，原田邦男氏，(株)日立ハイテクノロジーズの久賀谷隆氏，大月繁夫氏，古川貴康氏，日本特殊研砥(株)の田中嘉弘氏，山田延弘氏，元(株)日立製作所の佐藤雅彦氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) D. O. Ouma et al.: Characterization and Modeling of Oxide Chemical Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concept, IEEE Trans. Semiconduct. Manufact., 15, May (2002) 232.
- 2) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier: Theory of Elasticity, 3rd ed: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- 3) 木村景一 他：光放射圧制御粒子集積現象に基づく CMP 加工に関する基礎的研究，精密工学会誌，69，1 (2003) 89.
- 4) J. J. Gagliardi et al.: Fixed Abrasive and Selective Chemistries: Some Real Advantages for Direct STI CMP, proc. of CMP-MIC Conf., (2002) 274.
- 5) <http://www.innovative-planarization.com/Presentations/doy.pdf>