機械的プラナリゼーション加工の加工終点検出技術の現状と今後の課題*

猪川 洋**

Current Status and Future Challenges in Endpoint Detection Technique for Mechanical Planarization Process / Hiroshi INOKAWA

Key words: chemical mechanical polishing (CMP), planarization, endpoint detection, large scale integration (LSI)

1. はじめに

大規模集積回路 (LSI) 製造工程における研磨平坦化においては、所望の研磨量もしくは研磨後の残り膜厚を実現するために、あらかじめテストウェハを研磨し膜厚測定を行い研磨速度等を求め、その結果をもとに製品ウェハの研磨時間を決めるという手順を踏む。しかし、これらテスト作業は装置の稼働率を下げ、余分なウェハやその他の資材を消費するため、極力頻度を減らす必要がある。ひとつの対処策は、研磨速度等が長期にわたって安定に維持できるように研磨装置、研磨布等の安定性を向上させることであり、他の対処策は製品ウェハを加工している最中に研磨状態をモニタリングし、研磨時間をその場で決めることである。本稿では後者にかかわる加工終点検出技術について解説する。最初に、種々の研磨平坦化工程における加工前と加工終点におけるウェハの状態をまとめ、それぞれの工程に対して、どのような終点検出原理が適用できるかを説明する。次に、現在知られている終点検出技術について動作の仕組み、使用例等を紹介する。最後に、各種の終点検出技術の特徴をまとめ、今後の動向について考える。

2. 工程の種別から見た終点検出

研磨平坦化が適用される LSI 製造工程には様々な場合

がある。それぞれ終点状態が異なっており、終点検出に使える技術も違ってくる。図 1 に種々の研磨平坦化工程における研磨前と研磨終点での断面構造を、表 1 に終点検出の観点から見た各種研磨平坦化工程の特徴を示す。

すべての場合において研磨終点は、残り膜厚を測定し、その膜厚が目標値に達したか否かで決定できる。膜厚の測定方法は、被研磨材料が絶縁膜 (a), (b), (f)、金属膜 (c), (d)、多結晶シリコン (e) のそれぞれで異なってくる。また、被研磨材料が研磨途中で変化しない (a) に関しては、膜厚測定がほとんど唯一の終点検出 (決定) 法となる。

(b)~(f) に関しては、被研磨材料が変化することを利用した終点検出法 (例えば摩擦係数変化を検知する方法など) が利用できる。ただし、材料が金属膜から絶縁膜に変わる場合 (c), (d) や、多結晶シリコンから絶縁膜に変わる場合 (e) のように、被研磨材料の性質が大きく変わる方が終点検出の上では望ましい。また、(b)~(f) においては研磨終点で被研磨材料が変化するとはいえ、ある割合で最初から研磨して来た材料が残っている。残存割合は (c), (e) では数% 以下なので無視できるが、(b), (d), (f) では数十% になるので、製品の品種の違い (残存割合やパタン形状の違い) が終点検出に影響を及ぼさないか注意する必要がある。

終点検出に利用できる技術の一部は、被研磨表面の凹凸を評価する能力を持っている。従って、凹凸が許容値を下回ったことで終点を判定することも不可能ではない。しかし、LSI 製造工程では残り膜厚を既定値に収めること又はシリコン窒化膜などのストッパが完全に露出することが求められる場合がほとんどであり、凹凸の減少は十分条件ではない。従って、表面凹凸の測定が単独で終点検出の手段となることは考えにくい。

* 原稿受付 平成 8 年 1 月 18 日

** 日本電信電話(株)LSI 研究所 (厚木市森の里若宮 3-1)

1985 年京都大学工学部電子工学専攻博士課程修了。同年工学博士。同年日本電信電話(株)入社。以来、微細 MOS、特に寄生効果を低減したデバイス、完全空乏化バルクデバイス、溝分離デバイスの研究・開発に従事。現在、0.25 μm バルク CMOS のプロセス総括化を担当

図1 種々の研磨平坦化工程における，研磨前と研磨終点の構造断面図

(a) 層間絶縁膜平坦化（ストップ無し）¹⁾⁴⁾，(b) 層間絶縁膜平坦化（ストップ有り）²⁾，
 (c) ビアホール埋込み平坦化³⁾⁴⁾，(d) ダマシン配線平坦化⁵⁾，(e) 深溝埋込み平坦化⁶⁾，
 (f) 浅溝埋込み平坦化⁷⁾⁸⁾

表1 終点検出から見た各種研磨平坦化工程の特徴

平坦化工程の種類	被 研 磨 材 料		適用可能な終点検出の原理		
	研磨初期	研磨終了時	残り膜厚の測定	材料変化の検出	表面凹凸の測定
(a) 層間絶縁膜平坦化（ストップ無し）	絶縁膜1	絶縁膜1	○	×	△
(b) 層間絶縁膜平坦化（ストップ有り）	絶縁膜1	絶縁膜1+絶縁膜2	○	○	△
(c) ビアホール埋込み平坦化	金属膜	縁緑膜+金属膜	○	◎	×
(d) ダマシン配線平坦化	金属膜	縁緑膜+金属膜	○	◎	△
(e) 深溝埋込み平坦化	多結晶シリコン	絶縁膜+多結晶シリコン	○	◎	×
(f) 浅溝埋込み平坦化	絶縁膜1	絶縁膜1+絶縁膜2	○	○	△

3. 種々の終点検出技術

図2に種々の終点検出器（センサ）を含む研磨装置の概念図を示す。以下に同図を用いて現在知られている終点検出技術を説明する。

3.1 トルク検出式終点検出

本方式では，被研磨ウエハと研磨布の間の摩擦係数変化をウエハキャリアや定盤の回転軸トルクの変化として検出する⁹⁾。実際には，図2に示すようにウエハキャリアの駆動モータ電流を測定する場合が多い。被研磨材料が終点において変化する図1(b)～(f)の工程に利用可能で，特に

摩擦係数が大きく変わる(c)，(d)，(e)に適している。

図3に，シリコン酸化膜上の多結晶シリコンを種々の研磨剤を用いて研磨した際の駆動モータ電流変化を示す。研磨時間が40秒から80秒においてモータ電流がステップ状に変化した部分で多結晶シリコンが消失し下地のシリコン酸化膜が露出している。ステップの生じた時間から，アミンベースのコロイダルシリカが最も研磨速度が速く，以下カリウムベースのフェームドシリカ，アンモニウムベースのフェームドシリカ，ナトリウムベースのコロイダルシリカの順に研磨速度が遅くなることがわかる。また，ステップの大きさや方向（立下がり/立下がり）は研磨剤によって異なっており，研磨剤の選択がトルク検出法の適用に当たっては重要であることが理解できる。

(a) 側面図

(b) 正面図

図2 種々の終点検出器を含む研磨装置の概念図

図3 種々の研磨剤を用いてシリコン酸化膜上の多結晶シリコン (厚さ 200 nm) を研磨した際のウエハ駆動モータ電流変化

図4はより複雑な断面構造を有する試料への適用例である¹⁰⁾。研磨剤には図3で示したアンモニアベースのフュームドシリカを用いており、研磨表面がBに達し多結晶シリコンが露出した所でモータ駆動電流が増加し、研磨終点のCにおいて下地のシリコン窒化膜が露出した所で再び減少している。この例のように摩擦係数の大きく異なる材料（ここでは多結晶シリコン）をマークとして挿入することにより、通常は検出しにくいシリコン酸化膜からシリコン窒化膜への変化も検出することができる。

(a) 構造断面図

(b) ウエハ駆動モータ電流の変化

点A, B, Cは、(a)における研磨表面位置A, B, Cに対応する。

図4 より複雑な断面構造を有する試料（ボロン・りん添加酸化シリコン（BPSG）を埋め込んだ深溝のキャッピング工程）への適用例¹⁰⁾ 図5 容量検出器の電極構造と各種の容量、抵抗成分の配置¹¹⁾¹²⁾

3.2 静電容量式終点検出

本方法は、ウエハ上に残る絶縁膜の厚さを静電容量で測定するものである。図5に静電容量検出器の電極構造と付随して生じる各種の容量、抵抗成分の配置を示す¹¹⁾¹²⁾。電極は定盤と同一面に設置され、研磨布と研磨剤がシリコンウエハとの間に介在する。実際に測りたい容量は C_1 であるが、研磨剤中のイオン伝導によるリークに対応する R_1 , R_2 の影響を避けるため主電極の周囲に主電極と同電位に強制駆動されたガードリングを設けている。その他、寄生容量 C_2 , C_3 , C_4 の影響を除くために主電極を2分割して各々を逆相に駆動するなどの、様々な工夫がなされている。 C_1 を定電流駆動することにより、ウエハ上に残存する膜厚に比例した信号が得られる。図6に実際にシリコン熱酸化膜を研磨した時の出力信号変化を示す。研磨時間に比例する測定サイクル数との間に良好な直線関係が得られている¹²⁾。

図6 シリコン熱酸化膜における出力電圧と測定サイクル数の関係¹²⁾

定盤の回転数は15 rpmで、1回転(サイクル)ごとに1回測定が行われる。

図7 シリコン基板上のシリコン酸化膜の分光反射率
反射率はシリコン基板を基準とした相対値。2つの異なる膜厚の例を示す。

3.3 光学式終点検出

絶縁膜や多結晶シリコンに対するオフラインの膜厚測定は、ほとんどの場合分光反射率測定¹³⁾により行われている。図7にシリコン基板上のシリコン酸化膜の分光反射率の一例を示す。シリコン酸化膜表面とシリコン基板表面で反射された光が干渉するため図のような反射率の山や谷が生じる。これらの山や谷の位置や間隔から膜厚を知ることができる。実際には、広い範囲の膜厚をより正確に求めるために、既存の光学定数を基に計算した分光反射スペクトルと実測データをフィッティングする手法が使われる。本方法やオフライン測定で比較的多く使われるエリプソメトリ¹³⁾は、現時点では、研磨終点検出に広く使用されている訳ではない¹⁴⁾。しかし、膜厚測定精度の高さ、空間分解能の高さ、ほとんどの透明・半透明材料に使える汎用性等の点で優れた方法である。

別種の光学式終点検出としては、図8に示す光ピックアップを用いる方法が報告されている¹⁵⁾。反射面の位置に対応して4分割ディテクタ上のスポットが縦長や横長にひずむことを利用して、絶縁膜に覆われた金属配線の表面や基板表面までの距離測定を行える。終点検出に当たって知るべき量は絶縁膜の残り膜厚なので、報告では図9に示す流体マイクロメータを併用している。作動流体を一定圧力

図8 光ピックアップの構造¹⁵⁾

本ピックアップにより反射面(絶縁膜に覆われた金属配線や基板の表面)までの距離が測定される。

図9 流体マイクロメータの構造¹⁵⁾

本マイクロメータにより絶縁膜研磨面までの距離が測定される。図8の光ピックアップと組み合わせることにより、残存する絶縁膜の厚さ(反射面と研磨面間の距離)を知ることができる。

P_0 で供給すると、ノズル内の背圧はノズルの先端開口部とウェハ間のギャップ d によって決まるため、絶縁膜研磨面までの距離が測定できる。上記2つの距離の差をとることによって、絶縁膜の厚さが得られる。

その他、単純に単一の波長での反射率を測定することによっても研磨の進行状態をモニタすることが可能である。金属膜ならばウェハ表面から除去された時点で大幅に反射率が変わるし、絶縁膜ならば光の干渉で膜厚の変化に応じて反射率が順次変化する。ストップが下地にある場合は、ストップが露出した時点で反射率の変化が停止する。

図10 ウエハキャリア水平方向の振動スペクトルの研磨に伴う変化¹⁶⁾

被研磨ウエハは、厚さ1.8 μm のプラズマTEOSシリコン酸化膜を堆積した高さ1 μm の配線段差付きウエハ

図11 振動強度の研磨時間依存性¹⁶⁾

振動強度は、平坦面を研磨した際の信号に対する相対値を取り、スペクトル中の4~6 kHzの成分を積分したものである。

3.4 振動解析式終点検出

ウエハキャリアに取り付けた振動センサ（加速度センサ）から得られる信号をFFTアナライザで周波数スペクトルに変換して解析する方法である¹⁶⁾¹⁷⁾。図10に凹凸のあるウエハを研磨平坦化した際のスペクトル変化を示す。研磨時間が経過し凹凸が減るに従い、全体的な信号強度が低下することがわかる。図11は相対的な積分信号強度の研磨時間依存性を示している。信号強度は研磨時間の経過に従って減少し、表面状態が平坦（残留段差<0.01 μm ）になると一定になる。本方法では、表面の平坦性のみならず研磨速度の不均一性、研磨布の摩耗状態、被研磨材料の変化も検知できると報告されている。

上記とは別に、同様の手法で被研磨ウエハの共振振動数を求め、この共振振動数から被研磨ウエハの厚さを求める手法も考案されている¹⁸⁾。

3.5 その他の方法による終点検出

研磨剤廃液の状態は被研磨材料の違いを反映すると考え

表2 各種の研磨終点検出技術の特徴

終点検出の種類	終点検出の原理	実績	空間分解能	精度	材料の制限
1. トルク検出式	被研磨材料の変化の検知	○	×	△	摩擦係数変化の小さい材料
2. 静電容量式	膜厚測定	△	×	△	導電材料
3. 光学式	膜厚測定	△	○	○	不透明な材料
4. 振動解析式	表面凹凸・被研磨材料の変化の検知	△	×	△	

られる。電気化学的なその場測定により、n型シリコンとp型シリコンが判別できることが報告されている¹⁹⁾。

その他、電気抵抗、温度分布、音波など様々な物理量をを測定し研磨終点を検出する方法が考案されている¹⁶⁾。

4. ま と め

表2に各種の研磨終点検出技術の特徴をまとめる。

原理的には、静電容量式と光学式がウエハに残った膜厚を測れることから、ストップ無しの層間絶縁膜平坦化（図1(a)）や、被研磨材料の変化がトルク検出式では検知しにくいストップ有りの層間絶縁膜平坦化（図1(b)）、浅溝埋込み平坦化（図1(f)）で有用である。

実績の点ではトルク検出式が、装置が市販されており、一部実用化されている点で他を引き離している²⁰⁾。トルク検出式は被研磨材料の変化を検知する方式なので、用途は限定されるが、金属や多結晶シリコンの埋込み平坦化（図1(c), (d), (e)）では、大きな問題なく使用できる。静電容量式と振動解析式は実際にウエハを研磨したデータが発表されているが、広く使用されるに至っていない。光学式は原理確認の段階にとどまっている。

空間分解能は光学式以外は総じて低く、ほぼウエハ全面の状態を平均的に評価することになる。従って、凹部と凸部の面積比率が異なると評価結果（例えば、トルク変化率や見かけ上の膜厚）が変わってくる。すなわち、品種ごとに条件出しを行わねばならない事態が生じる。逆に、空間分解能が高い場合はパターン形成されたウエハ上のどこを測っているかを正確に弁別出来るような機能が必要となる。

膜厚精度は光学式、特に分光反射率の測定やエリプソメトリによる方法が極めて優れており、0.1 nm オーダの精度が得られる。他の方法はこれより1~2けたの精度が低い。

トルク検出式の場合は、種類の異なるシリコン酸化膜どうしやシリコン酸化膜とシリコン窒化膜のように摩擦係数変化の小さい材料の組合せは不向きである。しかし、研磨剤や研磨布の変更、トルク測定の信号・ノイズ比改善などで適用領域を拡大できる可能性もある。静電容量式、光学式はそれぞれ導電材料、不透明な材料において精度良く膜厚を測ることができない。しかし、それらの材料がウエハ表面に存在するか否かを判別することは出来るので、被研

磨材料の変化を検知して研磨終点を判定することは可能と考えられる。

以上より、トルク検出式は被研磨材料が研磨終点において変化する用途で広く使われて行くと思われる。更には、トルク検出式より広い用途で使用可能で分解能や精度の優れている光学式終点検出技術が重要になると考えられる。基本原理はおおむね出そろっているので、定盤や研磨布を貫いて光路を確保したり、リアルタイムに必要な情報を抽出したりする技術開発が求められている。研磨終点検出からは若干外れるが、研磨直後に製品ウェハを装置内で迅速に評価し結果を以降の研磨条件に反映させる手法も、研磨中に比べれば測定上の困難が少ないので、研磨工程のモニタリングを効率良く行う現実的手段のひとつと考えられる。

参 考 文 献

- 1) W. L. Guthrie et al. : A Four-level VLSI Bipolar Metallization Design with Chemical-mechanical Planarization, IBM J. Res. Develop., **36**, 5, (1992) 845.
- 2) 長島直樹, 永野隆史 : 2層ストッパー構造を用いた研磨によるグローバル平坦化, 1994年春季応用物理学会講演予稿集, 30 a-ZW-4, (1994) 775.
- 3) F. B. Kaufman et al. : Chemical-mechanical Polishing for Fabricating Patterned W Metal Features as Chip Interconnects, J. Electrochem. Soc., **138**, 11, (1991) 3460.
- 4) R. R. Uttecht et al. : A Four-level-metal Fully Planarized Interconnect Technology for Dense High Performance Logic and SRAM Applications, Proc. IEEE VLSI Multilevel Interconnection Conf., (1991) 20.
- 5) C. W. Kaanta et al. : Dual Damascene: A ULSI Wiring Technology, Proc. IEEE VLSI Multilevel Interconnection Conf., (1991) 144.
- 6) H. Goto et al. : An Isolation Technology for High Performance Bipolar Memories - IOP-II, Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet., (1982) 58.
- 7) K. D. Beyer et al. : Glass Planarization by Stop-layer Polishing, IBM Tech. Disclosure Bull., **27**, 8, (1985) 4700.
- 8) P. C. Fazan and V. K. Mathews : A Highly Manufacturable Trench Isolation Process for Deep Submicron DRAMs, Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet., (1993) 57.
- 9) G. S. Sandhu et al. : Apparatus for Endpoint Detection during Mechanical Planarization of Semiconductor Wafers, US Patent 5069002, Micron Technology, Inc., (1991).
- 10) H. Inokawa et al. : A Novel Trench Capping Process Using CMP with Endpoint Detection, Extended Abstracts 1994 Int. Conf. Solid State Devices and Materials, (1994) 989.
- 11) G. L. Miller and E. R. Wagner : In Situ Monitoring Technique and Apparatus for Chemical/Mechanical Planarization Endpoint Detection, US Patent 5081421, AT & T Bell Laboratories, (1992).
- 12) W. Y-C. Lai et al. : Capacitive Endpoint Detection for Oxide Planarization by Chemical-mechanical Polishing, Proc. IEEE VLSI Multilevel Interconnection Conf., (1993) 147.
- 13) W. A. Pliskin : Nondestructive Optical Techniques for Thin-film Thickness Measurements, in *Physical Measurement and Analysis on Thin Films*, E. M. Murt, W. G. Guldner, Eds., Plenum Press, New York, N. Y., (1969) 1.
- 14) 白鳥治男 : ウェハ研磨方法及びその装置, 特許出願公開 特開平 7-52032, 住友金属鉱山(株), (1995).
- 15) 森山茂夫ほか : 半導体ウェハの化学機械研磨工程における光学式終点検出法, 精密工学会誌, **61**, 6 (1995) 854.
- 16) A. Fukuroda et al. : In Situ CMP Monitoring Technique for Multi-layer Interconnection, Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet., (1995) 469.
- 17) 岸井貞浩ほか : 研磨方法, 研磨装置およびそれに用いる被研磨体, 特許出願公開 特開平 6-342778, 富士通(株), (1994).
- 18) 大川哲男, 藤沢政泰 : 研磨加工における終点検出方法, 特許出願公開 特開平 7-135190, (株)日立製作所, (1995).
- 19) W. L. C. M. Heyboer et al. : Chemomechanical Silicon Polishing - Electrochemical in situ Measurements, J. Electrochem. Soc., **138**, 3, (1991) 774.
- 20) M. A. Fury : Emerging Developments in CMP for Semiconductor Planarization - Part 2, Solid State Technol., **38**, 7, (1995) 81.