静電吸着付ホットプレートのスパッタプロセスへの応用

玉 川 孝 一^{*1}

(受理2001年12月1日, 掲載決定2002年4月6日)

Application of the Hot Plate with an Electrostatic Chuck to the Sputter Process

Kouichi TAMAGAWA

Institute for Semiconductor Technologies, ULVAC, Inc. 1220-1 Suyama, Susono, Shizuoka, 410-1231

(Received December 1, 2001, Accepted April 6, 2002)

1. はじめに

半導体製造プロセスでは, スパッタ法を用いて Ti, TiN, Ta, TaN などのバリア膜, および Al や Cu などの配線材の成膜が行われている。当社では, 静電吸着付ホットプレートを1995年からスパッタ装置に標準搭載してウェハの温度制御に用いている。従来のメカニカルランプでは実現できなかった精密な温度制御が可能になり, またウェハ間の温度再現性も飛躍的に向上した。スパッタチャンバーの模式図を図1に示す。静電吸着付ホットプレートは双極型の静電吸着電極とヒーターを内臓しており, 静電吸着と加熱を同時に行うことができる。本稿では, 静電吸着付ホットプレートの基本性能およびスパッタプロセスへの応用例について紹介する。

2. ウェハ温度の in-situ 測定

静電吸着付ホットプレートのウェハ温度制御の様子を観察するには, in-situ での温度測定が不可欠である。我々は, CI Systems 社の非接触ウェハ温度モニター NTM-1 および NTM-500 を用いて, in-situ でのウェハ温度測定を行っている¹⁾。図2に示したように, ウェハ裏面に近接させた石英ロッドでウェハからの放射光を測定する。NTM-1 は近赤外域の Si 吸収エッジの温度変化を測定して温度に換算する方式であり, 室温から600℃までの範囲の温度を測定できる。Bare-Si ウェハでは高精度の

図1 スパッタチャンバーの模式図

測定ができるが, ウェハ裏面が酸化膜付の場合には測定が難しい。一方, NTM-500は放射エネルギーを測定する放射温度計であり, 200℃以上での温度測定が可能である。放射率と放射エネルギーを交互に測定する方式なので, 放射率が Bare-Si ウェハと異なる裏面酸化膜付ウェハ等でも高精度な温度測定が可能である。

3. 静電吸着付ホットプレートの基本性能

静電吸着付ホットプレートをスパッタプロセスに用いる目的は, ウェハと間の熱伝達を良くしてウェハを所定温度に短時間で昇温あるいは降温すること, およびスパッタ中にプラズマからウェハへ流入する熱を逃がしてウェハ温度を一定温度に保持することにある。静電吸着

^{*1} 株式会社アルバック半導体技術研究所 (〒410-1231 静岡県裾野市須山1220-1)

図2 ウェハ温度モニターのスパッタモジュールへの取り付け図

図3 誘電体層体積抵抗率の温度による変化

には単極型と双極型があり、プラズマオフでも静電吸着力が生じる双極型がスパッタプロセスに用いられる。これは、スパッタ開始前（プラズマオフの状態）にウェハを所定の温度に制御しておく必要があるからである。

静電吸着付ホットプレートの、表面誘電体層の体積抵抗率の温度変化を図3に示す。ウェハと誘電体との界面に微小電流を流すことによって生じるジョーンソン・ラーベック力²⁻⁴⁾を発現させてプロセスに用いる場合、体積抵抗率がおおよそ $10^{10} \sim 10^{12} \Omega \text{cm}$ の範囲が最適である。体積抵抗率が高すぎると吸着の応答特性が悪くなり、デチャックをスムーズに行えなくなる。一方、体積抵抗率

図4 Bare-Si ウェハとホットプレート間の熱伝達率の静電吸着印加電圧による変化

が低すぎると吸着電極の発熱がウェハ温度に与える影響が無視できなくなるし、またウェハに流れる電流のデバイスに対するダメージが懸念される。実際のスパッタプロセスは、室温（Cu プロセスでは室温以下のプロセス温度が求められている）から500°Cを超える温度までの広い温度範囲で行われている。当社のホットプレートは体積抵抗率の温度変化が小さい誘電体材料を採用しているが、それでも1個のホットプレートで前記の温度範囲をカバーするのは難しい。そのため、低温仕様（0～350°C）と高温仕様（300～550°C）の2つの仕様を設けて、体積抵抗率の異なる2種類のタイプのホットプレートを使い分けている。

Bare-Si ウェハとホットプレート間の熱伝達率の静電吸着印加電圧による変化を図4に示す。熱伝達率はウェハの昇温カーブから算出した。図から明らかなように、熱伝達率は印加電圧に対してほぼ直線的に増加している。また、 $\pm 70 \text{ V}$ 以下の低印加電圧では熱伝達率は静電吸着無しの場合とほとんど変わらない。これは、ホットプレート表面の僅かな反りなどが影響しているためであると考えている。実際のスパッタプロセスで良好なウェハ温度制御性能を得るためには、 $150 \text{ W/m}^2\text{K}$ 以上の熱伝達率が必要である。

ホットプレート温度を300°Cと500°Cに設定し、室温のウェハを静電吸着させたときの昇温プロファイルを図5に示す。比較のために、静電吸着なしで昇温させたときのプロファイルも図示してある。何れの設定温度の場合も、静電吸着をオンしてから20秒以内に最高到達温度の98%に達することから、非常に短時間でのウェハ昇温が可能であることがわかる。ただし、大きな吸着力で吸着したウェハに大きな温度変化を起こさせると、昇降温に

図5 Bare-Si ウェハの昇温プロファイル (静電吸着あり vs なし)

図6 φ300 mm ウェハ面内温度分布

に伴う熱膨張あるいは熱収縮が吸着力で抑えられるため、ウェハに応力が蓄積してウェハ割れが生じる場合がある。昇温時間を考慮しつつ適度の吸着力で昇温させるなどの注意が必要である。

充分大きな吸着力で静電吸着されたウェハでは、その温度はウェハ表面からスパッタチャンパー内壁への熱放射にはほとんど影響されず、ホットプレートの表面温度分布をほぼ忠実に反映した温度分布になる。従って、温度分布の小さなホットプレートを製作することにより、良好なウェハ面内温度分布を得ることができる。十字に9点の熱電対付きφ300 mm Bare-Si ウェハを用いて、ホットプレート設定温度が250℃、350℃、450℃および530

図7 スパッタ中の熱移動

図8 無加熱Alスパッタ中のウェハ温度 (静電吸着あり vs なし)

℃のときのウェハ面内温度分布を測定した結果を図6に示す。温度分布は250℃設定のときにΔT: 5.2℃であり、設定温度の上昇とともに広がっていくが、530℃設定のときでもΔT: 19.8℃で極めて良好である。また、ウェハとホットプレート間の熱伝達が良いので、両者間の温度差を小さくできることが静電吸着の特長である。

4. スパッタプロセスでのウェハ温度制御

スパッタプロセス中のウェハ温度制御では、スパッタ粒子の入射およびプラズマ光の放射によるウェハへの熱流入があることを考慮しなければならない。当社のスパッタモジュールでの熱移動の様子を模式図7に示す。スパッタ中にプラズマからウェハに流入する熱量 (Q_0) はφ8インチウェハで300 Wに達する場合がある。ホットプレートと冷却ステージ間の熱伝達を良くしておくと、静電吸着を用いた場合 ($Q_0 = Q_1$) にはウェハに入ってくる熱をホットプレートを介して冷却ステージに効

アスペクト比:0.8 アスペクト比:2.0

図9 Al埋め込み特性の1層目Al成膜温度依存性

図10 Ti/TiN スパッタ中のウェハ温度 (静電吸着あり vs なし)

率よく逃がすことができる。その結果、スパッタ中のウェハ温度をほぼ一定に保持することができる。静電吸着なし ($Q_0 \gg Q_1$) では、ホットプレートとの間の熱伝達が悪いためにウェハに熱が蓄積し、ウェハ温度が急激に上昇してしまう。高温プロセスの場合には、冷却ステージに熱を逃がさなくても、ホットプレートのヒーター投入電力を下げることで、ウェハ流入熱を相殺することができる。そのため我々は、低温プロセスでは高熱伝導率

の伝熱調整板を用い、高温プロセスでは低熱伝導率の伝熱調整板を用いてヒーター投入電力を抑えるようにしている。

室温のホットプレート上にウェハを置き、静電吸着有無のそれぞれの場合で、Al膜をスパッタしたときのスパッタ中ウェハ温度変化を図8に示す。静電吸着を用いるとスパッタ中のウェハ温度上昇を5°C程度に抑えることができるのに対して、静電吸着なしではスパッタ終了時のウェハ温度は180°C以上に上昇してしまう。2ステップAlフロー法 (低温と高温の2ステップに分けてAlを成膜し、コンタクトホールやヴィアホールにAlを埋め込む成膜法) で、1層目のAl成膜温度を変えたときの埋め込み特性の変化を図9のSEM写真で示す。低温で成膜するほどAlのグレインサイズが小さくなり流動性が増すため、埋め込み特性が良くなることがわかる。この2ステップAlフロー法は、静電吸着付ホットプレートを用いることで初めて実現できた。

ホットプレート設定温度300°CでTiとTiN膜を連続で成膜したときの、スパッタ中ウェハ温度変化を図10に示す。静電吸着を用いたときのスパッタ中温度上昇は10°C程度である。一方、静電吸着なしではスパッタ開始から終了までのウェハ温度上昇は150°Cに達している。

300°Cのホットプレート設定温度でTiN膜のみをスパッタしたときの、シート抵抗均一性および比抵抗の静電吸着印加電圧依存性を図11に示す。TiNの比抵抗は成膜時の温度が高いほど低くなる。比抵抗が低いことから、静電吸着なしの方がありの場合よりも成膜中ウェハ

図11 TiN 比抵抗およびシート抵抗面内均一性の静電吸着印加電圧による変化

図12 TiN 膜比抵抗の1ロット (25枚) ウェハ間再現性

温度が上昇していることがわかる。また静電吸着なしでは、図10から明らかなように成膜中の温度が上昇し続けるので、膜厚方向に比抵抗が変化している不均一な膜質の膜が形成されていることになる。シート抵抗均一性も静電吸着を用いることで大幅に改善できる。静電吸着なしでは、ウェハ表面からの放射による熱逃げがウェハ外周部ほど大きいため、スパッタ前は山型の面内温度分布になる。スパッタ中のプラズマからの入熱は中心部ほど大きいため、ウェハ面内の温度差がさらに拡大してシート抵抗分布が悪くなる。これに対して静電吸着ありでは、ウェハ表面からの熱放射やプラズマからの入熱が不均一であることの影響をほとんど受けず、良好なシート

図13 Ti スパッタ中ウェハ温度再現性 (1ロット25枚)

図14 Bare-Si ウェハの降温プロファイル (静電吸着あり vs なし)

抵抗均一性が得られる。

TiN 膜比抵抗の1ロット (25枚) のウェハ間再現性を図12に示す。ウェハ間の再現性は良好であるが、これはウェハ間の温度再現性が良いためである。

ホットプレート設定温度300°CでTi膜をスパッタしたときの、1ロット25枚のウェハ温度の測定結果を図13に示す。スパッタ開始から約10秒間ウェハ温度が急激に上昇したように見えるが、これはプラズマ光の一部がウェハを透過して石英ロッドに取り込まれるためである。ウェハ上にTi膜が堆積するにつれてプラズマ光の影響は減少し、成膜開始から10秒以降ではプラズマの干渉はなくなる。25枚のウェハ間で3°C以内の極めて良好な温度再現性が得られている。

当社のCERAUSやENTRONなどのマルチチャン

静電吸着あり

シードCu
スパッタ後

電界メッキ
埋め込み後

静電吸着なし

シードCu
スパッタ後

電界メッキ
埋め込み後

図15 Cu 埋め込み特性（静電吸着有無でのスパッタ比較）

バータイプのスパッタ装置では、プリヒートや高温スパッタで加熱されたウェハが搬送されてきて、低温に冷却してから次のスパッタプロセスを行う場合がある。このような場合には、静電吸着を用いると短時間で所定温度までウェハを冷却することができる。図14は、300℃に加熱されたウェハを室温のホットプレートに静電吸着させたときの降温プロファイルである。静電吸着なしでは、300℃から200℃まで冷却するのに約90秒を要してしまう。静電吸着を用いると15秒で100℃まで冷却することができるので、冷却とその後の低温スパッタを1チャンバーで行なうことが可能になる。

デバイスの高速化に伴い使われ始めたCu配線では、薄いシードCu層をスパッタで成膜した後に電界メッキでホールにCu埋め込みを行なう。シードCuを静電吸着ありと無しの場合で無加熱スパッタ成膜し、その後にそれぞれ電界メッキでホールの埋め込みを行なったときの様子を図15に断面SEM写真で示す。静電吸着ありでシードCuをスパッタすると滑らかな表面のCu層が形成され、その後のメッキで完全な埋め込みができていく。これに対して、静電吸着無しの場合はスパッタ中にウェハ温度が上昇するため、Cuが再結晶化して凝集を起こし、表面モフォロジーが悪くなってしまう。このシード層でその後のメッキプロセスを行なうと、ホール中にボイドが発生する。このようにCuの埋め込みではシードCuの成膜中温度を低温に保持することが必要であり、そのためには静電吸着が必須である。

5. おわりに

静電吸着付ホットプレートの基本性能、およびスパッタ装置に搭載してプロセスに用いたときのウェハ温度制

御性能、および得られる膜の特性について紹介した。スパッタプロセスに静電吸着付ホットプレートを用いたときの利点をまとめると以下のようになる。

- (1) プロセス開始時に必要な所定温度まで、短時間でウェハを昇温あるいは降温させることができるので、装置のスループットを向上させることができる。
- (2) ウェハ間温度再現性やウェハ面内温度再現性に優れているので、膜質のウェハ間再現性および面内均一性の良好な成膜を実現できる。
- (3) ウェハをスパッタ中はほぼ一定温度に保持することができるので、膜厚方向にも均一な膜質の成膜ができる。
- (4) プロセス中にプラズマからウェハに入ってくる熱を効率的に冷却ステージに逃すことができるので、低温でのスパッタプロセスが可能になり、2ステップAlフローやCuシード膜形成などのような新たなプロセス開発の有用なツールとなる。

デバイス集積度の向上や微細化に伴い、より精密なウェハ温度制御が必要なプロセス開発が要求されるようになってきている。静電吸着付ホットプレートは、これらの新たなプロセスで必要不可欠なツールとして、今後ますます使われていくと考えている。

【文 献】

- 1) 玉川孝一, 森本直樹, 湯山順平, 主山政雄, 山崎博之: 電子材料, 11 (1999) p. 1.
- 2) Johnsen and Rahbek: J. Inst. Electr. Eng., 61 (1923) 713.
- 3) C. Balakrishnan: Br. J. Appl. Phys., 1 (1950) 211.
- 4) T. Watanabe, T. Kitabayashi and C. Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1 31 (1992) 2145.