半導体デバイス解析用局所プラズマ加工装置の開発(4) プラズマ加工中の温度精密計測*

岩瀬 千克^{*1}・白山 裕也^{*1}・横須賀俊太郎^{*1}・樫村 健太^{*1}
林 明宏^{*1}・新堀俊一郎^{*1}・高橋 賢^{*2}・堀江 智之^{*2}
徳本 洋志^{*2}・内藤 泰久^{*2}・清水 哲夫^{*2}

Development of Localized Plasma Etching System for Failure Analyses in Semiconductor Devices: (4) Precise Temperature Measured during Plasma Etching

Chikatsu IWASE^{*1}, Yuya SHIRAYAMA^{*1}, Shuntaro YOKOSUKA^{*1}, Kenta KASHIMURA^{*1},
Akihiro HAYASHI^{*1}, Shun'ichiro SHIMBORI^{*1}, Satoshi TAKAHASHI^{*2}, Tomoyuki HORIE^{*2},
Hiroshi TOKUMOTO^{*2}, Yasuhisa NAITOH^{*2} and Tetsuo SHIMIZU^{*2}

^{*1}Sanyu Co.,Ltd., 457 Baba-cho, Hitachi Ota, Ibaraki 313-0004 Japan

^{*2}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba Central 4,
1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8562, Japan

(Received November 11, 2011, Accepted February 10, 2012)

Temperature measurement of Si surfaces being etched by an inward plasma technique was performed with a sampling period of 0.1 s. A band edge thermometer was employed, which is based on the temperature dependence of the absorption edge of silicon. The temperature rise associated with the inward plasma etching was demonstrated to be smaller than that with an outward technique. Time dependence of the temperature and optical emission intensities from the plasma were measured simultaneously. As plasma was ignited and the discharge glowed, the temperature rose abruptly in the time domain within 3 s, after which it approached a linear dependence. The transition in temperature change from an initial abrupt one to a linear manner coincided with the maxima of the optical emission intensity of F atoms as well as total emission intensity integrated between 200 and 1000 nm. The magnitude of the initial temperature change linearly correlated with the intensity of the optical emission line by F atoms, i.e., the number of F radicals, while its correlation with the total intensity was obscured. It was therefore concluded that light absorption is not sufficient to explain the initial temperature change. Other effects including heat conduction of the etching gas to the surface and reaction heat associated with etching should be included.

1. はじめに

集積回路の大規模化¹⁾に伴い、故障解析の重要性が高まっている。これまでの故障解析においてはパッケージを機械的に研磨したのちに、化学的なエッチングや集束イオンビーム(FIB)で絶縁膜を除去し、配線が露出した試料を作製したのちに、電氣的または表面分析の手法で故障箇所と原因を特定する²⁾。ところが機械研磨には研磨面の粗さ、化学エッチングには液体の使用に伴う煩雑さ^{3,4)}、FIBには処理の遅さと高いコストという問題があり、素子をパッケージングの段階から局所的に深堀りし、配線を露出できる迅速で簡便な装置の開発が求められてきた。

機械研磨、化学エッチング、FIB法の持つ問題点を解決するために、局所プラズマ加工装置の開発を行ってきた⁵⁾。この装置は試料近傍に接近させたキャピラリーを用いてエッチングガスを吸引しながら、キャピラリー内部でプラズマを発生させる。発生したプラズマの一部分は上流側のキャピラ

リーと試料面との間に局所的に分布するために、局所的な試料の加工が可能になるだけでなく、エッチングガスが常にキャピラリーガスから吸引されるために、加工残渣を大幅に減少し、内部の配線を損傷することなくエッチングすることができる。

プラズマエッチング加工においては、試料とプラズマガスとの熱交換や、エッチングに伴う反応熱による試料の温度上昇は無視できない。半導体故障解析用の試料作製の場合には、ウェハ全面を加工する場合とは異なり、局所加工によって熱応力が1 mm以下の狭い領域に集中するため、デバイスプロセスとは異なる熱の影響が起き、配線のはく離など素子の損傷を招く可能性がある⁶⁾。温度測定の手段として熱電対を接触させる技術は確立しているものの、エッチング初期の温度変化を熱電対で正確に追跡することは熱電対の熱伝導を考えると難しいほか、プラズマ付近に熱電対を設置することに伴う電氣的ノイズの影響も温度測定を困難にしている。

そこで、本研究では分光学的温度計測法の一つであるバンドエッジ温度計(BET)を用いた^{7,8)}。この方法はSiをはじめとする半導体の吸収端波長が温度によって敏感に変化する性質を利用したものである。半導体のバンドギャップは温度が高いほど小さいため、長波長から短波長に入射光を変化させたときの最初の吸光度の立ち上がりは、半導体試料中の最

* 平成23年11月16日 第52回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 株式会社三友製作所 (〒313-0004 茨城県常陸太田市馬場町457)

^{*2} 独立行政法人産業技術総合研究所 (〒305-8562 茨城県つくば市東1-1-1 中央第4)

高温部分からの寄与が支配的であることを利用することにより、エッチング面の温度を選択的に測定することができる。BET による測定時間は分光装置のデータ処理時間によって決まることから、現在のコンピュータの処理能力のもとでは熱電対を用いた測定法に比べるとはるかに高い時間分解能で温度測定することが可能となる。本研究では Si を CF_4 プラズマで加工しながら温度変化を BET により測定した。まず局所プラズマ加工装置における試料の温度上昇を、同一の局所プラズマ加工装置における噴出型と吸引型の配置で比較した。更にエッチング初期における温度上昇を Si 面近傍におけるプラズマからの発光スペクトル (OES) と同時に測定し、エッチング初期の温度変化の機構について OES の時間変化との関連から議論した。

2. 実験

Fig. 1 に装置の概略を示す。真空チャンバ (約 1000 Pa) 内に試料を置き、 CF_4 ガスをチャンバ内に導入 (1–40 sccm) した。試料にはキャピラリー (内径 2 mm) を距離 0.1–0.3 mm に接近させ、キャピラリーを通じてチャンバを排気した。キャピラリーには外側と内側に一对の電極があり高周波電力 (13.56 MHz, 30–50 W) を印加してプラズマを発生させ、試料をエッチングした。チャンバの真空度やガスの流量、キャピラリーと試料との距離などは外部のコンピュータから制御した。プラズマからの紫外から可視領域にかけての発光をモニターするため、キャピラリー先端と試料表面とを見込む位置に窓を設け、光ファイバを置いてプラズマからの発光を分光光度計 1 へと導いた。吸引型から噴出型への配置変更は、ポンプとガスの導入口の位置を置き換えて行った。

BET は市販品である Bandit (k-Space Associates, Inc., 米国) を用いた⁹⁾。BET は Si のバンド吸収端である約 $1\ \mu\text{m}$ 付近の光を試料のエッチング面の反対側から照射するためのハロゲン光源と、試料を透過しエッチング面で散乱した光をエッチング面の反対側から集光する光学系と、散乱光の分光データから温度を計算するコンピュータ付きの分光光度計 2

からなる。温度測定におけるエッチング開始時間は、エッチング装置への投入電力 (RF 電源における FWD 値) の立ち上がり時刻とし、温度は 0.1 s おきに、OES は 0.2 s おきに約 300 s まで測定した。

序論で述べた通り、BET では半導体試料において最も温度の高い箇所の吸収端を検出するため、本研究で測定している温度は試料表面の温度である。それに対して、エッチング面の反対側からの散乱の影響は測定結果の不確かさの要素として寄与する^{10,11)}。同様に、入射光の迷光、プラズマから放出される試料のバンド端より低エネルギー側の光などが検出器に入ることが本測定に特有の不確かさ要因である。

同問題を解決するために、本研究では、試料表面および裏面からの正反射光や迷光、プラズマ発光が光検出器に届かないように光学系の配置に留意した。

さらに Bandit のコンピュータ付き分光光度計 2 の内部では、分光データから温度を計算する際に、上述の不確かさ要因を補正するためのデータ処理、たとえば数値微分により散乱スペクトルの変曲点導出¹¹⁾などが行われている。

3. 結果と考察

まず、吸引型配置が噴出型配置に比べて温度上昇の抑制という点で有利であることを確認した。配置以外の実験条件を同一にしたうえで、 CF_4 プラズマによって Si 基板を 5 分間エッチングした。それぞれの配置について、室温からの温度上昇幅 (ΔT) とプラズマへの投入電力との関係を **Fig. 2** に示す。高温のプラズマガスを噴出する配置に対して加工領域に常に新しいエッチングガスが供給される吸引型配置では、同じ投入電力でも温度上昇は抑えられていた。室温の新しいエッチングガスの流入が試料の温度上昇を抑制する効果は、 ΔT とガス流量の関係を示した **Fig. 3** においてさらに顕著である。噴出型ではガス流量の増加に伴って高温のプラズマガスによる基板の加熱が進行し、 ΔT が増加するのに対して、吸引型では、ガス流量が増加すると基板表面に流入する未反応のエッチングガスの流量が増加するため ΔT の大きさは一定かやや減少する傾向を示す。

Figs. 2, 3 で示した吸引型配置による 5 分間のエッチング

Fig. 1 A sketch of the experimental setup. The band edge thermometer consists of the Lamp, Lenses for focusing and the Spectrometer 2 for determining the band edge wavelength.

Fig. 2 Temperature changes on the Si wafer surface plotted as a function of the applied RF power for inward (circles) and outward (triangles) configurations measured after 5 minute etching.

において ΔT と OES の時間変化をモニタした結果が **Fig. 4** である. ΔT に重ねている直線は, 100–300 s のデータを線形近似して得られたものである. ΔT はエッチング開始直後に急速に上昇してから徐々に一定の温度上昇へと近づく. 一方この間の OES の変化を 200–1000 nm の積分強度, および F における $3p\ ^4D_{7/2} \rightarrow 3s\ ^4P_{5/2}$ の電子遷移に由来する発光^{12–14)}として知られている 686 nm の発光強度で見ると, エッチング開始と同時にこれらは最大値に達し, その後若干の減少傾向を示しながらほぼ一定値となる. OES の時間変化に若干の減少が観察される原因としてはキャピラリーの熱膨張などによってプラズマの状態に微小な変動が起きていることが考えられる.

Fig. 4 の結果から, 基板の温度変化及び OES の主な変化

Fig. 3 Temperature changes on the Si wafer surface as a function of the mass flow of the etching gas for inward (circle) and outward (triangular) configurations after 5 minute etching.

Fig. 4 Time dependence of the temperature change (upper trace), its linear fitting (straight line), and the total (200–1000 nm) and 686 nm intensities of the optical emission (lower traces).

はエッチング開始後 10 s 以内で終了することが予想される. そこで, エッチング初期の変化を拡大して **Fig. 5** に示す. 温度変化の様子をより明確にするため ΔT の対数を縦軸にプロットする. ΔT の初期の変化には Fig. 4 の 100 s までにみられる温度上昇のほか約 3 s 以内に完了する急激な上昇が存在することがわかる. また, OES の結果においては Fig. 4 の結果に見られた初期の OES 信号強度の増加が約 3 s 以内に完了しており, ΔT の 3 s 以内の急激な上昇は, プラズマ発光と相関があることがわかった.

エッチング初期の温度上昇と発光との関係をさらに調べるために, 温度上昇から定常的な温度変化の影響を差し引くため, Fig. 4 で示した近似直線を利用して ΔT 軸との切片を初期温度上昇と定義した. 初期温度上昇と, 発光強度がピークに達している時刻 3 s に測定した 686 nm の発光線強度との関係を **Fig. 6** に示したところ, 両者は原点を通る比例関係にあることが見出された. 686 nm の発光線は F 原子由来で

Fig. 5 Time dependence of the logarithm of the temperature change (upper trace) and the integrated (200–1000 nm) and 686 nm intensities of the optical emission (lower traces).

Fig. 6 Initial temperature changes plotted as a function of the light intensities at 686 nm emitted by F atoms. An initial temperature change is defined as the intercept of the linear equation deduced by the linear fitting of the temperature change data in the steady state region (see Fig. 4).

Fig. 7 Initial temperature changes plotted as a function of the total light intensities integrated between 200 and 1000 nm.

あることが知られており、初期温度上昇はプラズマ中のラジカルの濃度と関係があると結論できる。一方初期温度上昇と積分強度との関係を図示すると Fig. 7 のようになり、両者の相関は Fig. 6 と比較すると曖昧となる。Fig. 5 を見る限り 3 s 以内の温度上昇の時間変化と積分強度、686 nm の強度の時間変化の傾向は一致していることから、光の吸収の影響は支配的であると考えられるが、Figs. 6, 7 の結果を考慮すると初期温度上昇は紫外および可視光の吸収だけでは完全に説明できず、他の要素、たとえばプラズマガスと Si 表面との熱交換、エッチングに伴う発熱などを加味する必要がある。

Figs. 5-7 の結果からわかる範囲で基板の温度上昇の機構について推定すると、エッチング開始後約 3 s までは、RF 電力によりプラズマの発生が進行し、プラズマ内のラジカル濃度が急速に上昇する。これに比例して Si 基板表面からの光吸収が急激に進行するとともに、プラズマガスから基板表面への熱伝導も進行する。これらの温度上昇はラジカルによるエッチング速度を加速するため、結果として反応熱による温度上昇も加味される。これらの複合的な効果により、基板温度は急激に上昇する。3 s を過ぎると、プラズマの状態はほぼ安定し、Si の温度変化は基板内の熱拡散が支配的となる。さらに 100 s から 300 s の間では、プラズマによる加熱と熱拡散とが釣り合って温度上昇が定常となる。

4. 結 論

以上のように BET を用いた温度測定は局所プラズマ加工装置を用いたエッチングにおいて、試料の温度上昇に関する種々の情報を与えることが示された。基板温度の時間変化は

エッチング初期 3 s 以内は急激に上昇し、そののちは 1 次関数的に緩慢な上昇を続けた。この時刻 (3 s) はフッ素ラジカルからの発光、およびプラズマ発光の積分強度が極大となる時刻と一致し、初期温度上昇が輻射の吸収に起因することが示唆された。一方基板における初期温度上昇の大きさと、フッ素ラジカルからの発光、およびプラズマ発光の積分強度との比例関係を検討したところ、初期温度上昇の大きさは、フッ素ラジカルからの発光との比例関係がより明確であった。この比例関係の原因や、短時間プラズマエッチングされた基板の加工深さや表面形状を調べることは今後の検討課題であるが、温度変化の結果と比べることにより、本装置によるエッチングの再現性やエッチング精度を高めるための基礎的知見を得られるものと期待される。

謝辞

本開発は、独立行政法人 科学技術振興機構による研究成果展開事業【先端計測分析技術・機器開発プログラム】の一環として行われました。ここに謝意を示します。

〔文 献〕

- 1) International Roadmap Committee (Eds.): *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*, 2010 update, <http://www.itrs.net/links/2010itrs/home2010.htm>
- 2) M. Fukui, Y. Mitsui, Y. Nara, F. Yano and T. Furukawa: *Hitachi Rev.*, **55** (2006) 68.
- 3) M. Krishan, J. W. Nalaskowski and L. M. Cook: *Chem. Rev.*, **110** (2010) 178.
- 4) Y. Ahn, J.-Y. Yoon, C.-W. Baek and Y.-K. Kim: *Wear*, **257** (2004) 785.
- 5) S. Shimbori, Y. Shirayama, T. Kawakami, S. Yokosuka, K. Kashimura, T. Wataya, T. Shimizu, Y. Naitoh and H. Tokumoto: *J. Vac. Soc. Jpn.*, **53** (2010) 234.
- 6) R. P. S. Thakur, N. Chhabra and A. Ditali: *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 3428.
- 7) S. R. Johnson, C. Lavoie, T. Tiedje and J. A. Mackenzie: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **11** (1993) 1007.
- 8) T. P. Pearsall, S. R. Saban, J. Booth, B. T. Reard, Jr. and S. R. Johnson: *Rev. Sci. Instrum.*, **66** (1995) 4977.
- 9) <http://www.k-space.com/>
- 10) R. N. Sacks, D. Barlett, C. A. Taylor II and J. Williams: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **23** (2005) 1247.
- 11) S. R. Johnson and T. Tiedje: *J. Crystal Growth*, **175/176** (1997) 273.
- 12) NIST ASD Team (Eds.): *NIST Atomic Spectra Database*, ver. 4 (2009), <http://physics.nist.gov/asd>
- 13) M. Shimizu, K. Yasutake, H. Ohmi, A. Takeuchi, H. Kakiuchi, K. Yoshii and Y. Mori: *Appl. Phys. B*, **72** (2001) 227.
- 14) M. Shimizu, H. Ohmi, H. Kakiuchi and K. Yasutake: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **24** (2006) 2133.