U.D.C. 681. 32. 06: (536. 12:621. 315. 592-416). 001. 24: 621. 3. 049. 774. 002. 2

酸化・拡散装置内のウェーハ温度分布解析 Wafer Temperature Analysis in a Diffusion Furnace

半導体製造プロセスの酸化・拡散工程では、ウェーハの大口径化及びICの高集積 化が急激に増大するに伴い、反応装置内で熱処理によりウェーハ表面に形成される 酸化膜厚のばらつき、面内熱応力の低減化を図ることが不可欠になってきた。従来、 熱処理条件の設定は試行錯誤的な試作評価に頼るところが大きく、適切なパラメー 夕設定に長時間を要していた。

ウェーハ温度分布解析モデルに基づいて,現状の装置だけでなく,今後の大口径 ウェーハ用装置に対する制御設計,性能予測などを計算機上でシミュレーションし, 定量的にウェーハ温度分布を評価できるウェーハ温度分布解析システムを開発した。

松葉育雄*	Ikuo Matsuba
杢屋錦司**	Kinji Mokuya
松本邦顕***	Kuniaki Matsumoto
吉中 明****	Akira Yoshinaka
中込義之*****	Yoshiyuki Nakagomi

1 緒 言

VLSIの高集積化に伴い,最近では1µmからサブµmの微細 製造プロセスが,またウェーハでは6in以上の大口径化が用い られようとしている。このようなプロセスの開発,立上げの 早期化では,計算機シミュレーションを核としたプロセスCAE (Computer Aided Engineering)によるプロセス特性の事前評 価が重要である。本論文では,酸化・拡散工程を取り上げ,

述できるモデルは確立しておらず,更に微細化,ウェーハの 大口径化に進む半導体製造プロセスの事前評価などには高精 度なモデルは不可欠となってきた。

2 ウェーハ温度分布解析モデル

図1に示すように、シリコンあるいは石英ボート上に等間

熱処理を受けるウェーハの温度分布解析について述べる。

半導体製造プロセスの酸化・拡散工程では,図1に示すよ うに、ボート(治具)上に載せられた多数のウェーハ列を円筒 形をした反応管の中で同時に高温の熱処理を行なうのが一般 的な方法である¹⁾。このほか、CVD (Chemical Vapor Deposition)工程でも同様な装置が使用される場合が多い。ウェーハ 温度が支配的な酸化膜厚分布は,理想的にはすべてのウェー ハに対して設計などで定められた値に誤差なく制御されてい ることが望ましいが、実際にはウェーハ列でもウェーハ面内 でも均一な分布になっていない2)。特に,ウェーハの反応管への 挿入時には面内温度分布が最も大きくなり、それに伴い発生 する熱応力が降伏応力を超えると転位が増殖し, 半導体素子 の電気的特性を劣化させるだけでなく、 ウェーハが塑性変形 し反りが永続的に残る3)~5)。今後は、ウェーハの大口径化が加速 されるに伴い温度分布が更に増加し, 上記の悪影響が増大す ると予想されることから,従来のような試行錯誤的な熱処理 条件の設定に代わり、モデルに基づいた計算機シミュレーシ ョンで事前にウェーハ温度分布を評価する必要がある。これ により,半導体の高品質化,開発期間短縮が可能となる。

ウェーハ温度の理論解析は米国IBM社のS. M. Huにより先 駆的に行なわれた⁶⁾。高温に加熱したウェーハ列を瞬時に室温 雰囲気内に引き出したときの緩和現象が取り扱われたが、反 応管からの輻射は考慮されず、実際の熱処理プロセスでのウ ェーハ温度を計算することができない。また、超LSI技術研究 組合の奥は、Huのモデルに反応管からの輻射項を実験式を利 用して追加し、ウェーハの反応管への挿入・引出し過程での 温度推移を報告している⁷⁾。しかし、このモデルはウェーハ温 隔に並べられたウェーハ列が1,000℃程度の高温に加熱された 反応管へ挿入され,酸化あるいは拡散処理された後,管外へ 引き出される。このときの管内熱現象としては,管壁からウ ェーハとボートへの輻射,ウェーハの自己輻射損失とボート との輻射熱交換,ウェーハ間の輻射熱交換及び雰囲気ガスに よる熱伝導が考えられる。したがって,ウェーハ温度はウェ ーハ,ボート及び管壁間の熱収支を表わす熱伝達方程式とガ スの挙動を表わす熱流体方程式を数値計算することにより求 められる。しかし,ガス流量は一般に小さく,そのウェーハ 温度への影響は無視でき,更に管壁温度を与える反応管の熱 容量はウェーハ,ボートのそれに比べ十分大きいので,反応 管は恒温熱源と仮定できる。したがって,i番目のウェーハ温 度*T_iとボート*温度*T_b*の時間発展方程式は次の(1)式及び(2)式の ようになる^{8),9)}。



43

704 日立評論 VOL. 67 No. 9(1985-9)



図2 ウェーハ温度分布解析モデル ウェーハ温度分布は、ウェーハ、 ボート、反応管壁間の輻射熱伝達及び熱拡散によって決定される。 長時間の酸化処理が必要であり,ウェーハ温度は定常状態 に達していると考えられる。ボートはウェーハ温度分布の 不均一さを引き起こす一原因であるが,定常状態での実験 から判断してその効果は二次的なものであり,省略できる。 したがって,ウェーハ温度は(1)式を時間発展的に解き,そ の定常解として求まる。

図3は、シミュレーションで求めたウェーハ温度を、Deal-Groveの式¹⁰⁾を用いて酸化膜厚に換算した値と実測値と を比較したもので、極めて良い一致が見られた。実験では、 内径13cmで1,200℃に加熱された反応管に4inウェーハ をボート上に4mmピッチで並べ、膜厚測定にはCO₂レー ザ光干渉計を用いた。ウェーハ列での膜厚分布はほぼ対称 となっているので、同図には管入口から1番目、及びウェ ーハ列中央のウェーハの測定結果を示した。

1番目のウェーハでは中心部に比べ端部で膜厚が厚い のは、管壁からの輻射熱をより多く受けるからである。一 方、中央部のウェーハの膜厚分布が均一になっているのは、 管壁及び隣接ウェーハからの輻射熱がウェーハ間で何度 も反射を繰り返し、ウェーハ面内で分散し、結局、温度分 布が均一化していることによるものと思われる。

実際の製造ラインでは多数のウェーハが同時に熱処理 されるが、これらのウェーハに対するシミュレーションは CPU(中央処理装置)処理時間が膨大になり実際上不可能

𝓭₃:反応管壁からの輻射

𝗛:ボートからの輻射

₅:ウェーハ内の熱拡散

Ψ2:反応管壁からの輻射

𝗛3:ウェーハからの輻射

𝗛:ボート内の熱拡散

図2は、以上の熱現象を模式的に表わしたものである。こ こで重要なのは輻射の反射効果であり、例えば同一ウェーハ の別の位置から両隣のウェーハ表面で反射する項の2を上記の 基礎方程式で考慮する必要がある。この効果により輻射熱が ウェーハ面内で分散し、ウェーハ面内温度分布が均一化され ることが予想されるが、実際、定常状態で、ウェーハ温度が 支配的な酸化膜厚分布が実験的に均一になっていることから 裏づけられる。

基礎方程式(1)式,(2)式を差分化によりシミュレーションす ると、特に、反応管へのウェーハ挿入過程では膨大な計算時 間を要する。これは主に、反応管からウェーハとボートへの 輻射項**の**₃、**y**₂が挿入方向である管軸方向に温度分布をもつ管 壁との相対的な位置関係が、ウェーハ列挿入とともに時々刻々 変化し、各時間ステップごとにこれらの項を積分しなければ ならないからである。実用的な解決策として、ウェーハ列の 先端、中間及び後端ウェーハの3ケースに対するウェーハ面 上の差分化メッシュ点ごとに計算される輻射熱テーブルを用 意する。このテーブルを時間発展方程式を解く前に作成して おけば、単にその値を参照するだけで、挿入時の任意位置で と思われたが、実際にはその必要のないことがシミュレー ションからも、実験からも分かる。すなわち、ウェーハ列 両端の数枚のウェーハを除いたウェーハは、ほぼ均一な温 度分布となっているため、ウェーハ列端から反応管の加熱 端までの距離を固定して、ウェーハ枚数を増加しても均一 な温度分布をもつウェーハの枚数が増加するだけで、分布 の大きい両端のウェーハには変化がなかった。すなわち、 20~30枚程度のウェーハに対してシミュレーションを行な えば、それ以上のウェーハを用いた熱処理に対しても温度 分布の推定は可能である。



- の反応管からの輻射項が簡単な線形補間で近似的に求められる。以上の計算手法を適用することにより、計算時間を $\frac{1}{100}$ に低減できた。
- 3 シミュレーションと実験の比較
- 3.1 定常状態⁸⁾

44

1µm程度の厚い酸化膜厚を形成するためには、極めて

図3 定常状態での酸化膜厚分布 定常状態では、ウェーハ列中央部 ウェーハは均一な酸化膜厚分布を示すが、端部ウェーハは膜厚が薄く、しかも 膜厚分布の不均一性が大きい。

3.2 反応管へのウェーハ挿入過程⁹⁾

薄膜を形成するゲート酸化工程などでは,酸化時間が短く, ウェーハ温度の過渡状態が重要である。特に,反応管への挿 入・引出し時にウェーハ面内温度差が顕著になり,その結果, 酸化膜厚にばらつきを生じ,更には熱応力によりウェーハの 機械的強度を劣化させる。このような悪影響を防止するため には,ウェーハ温度の過渡特性を定量的に把握することが必 要である。

定常状態とは異なり過渡状態では、ボートのウェーハに及 ぼす影響が重要である。ボートの熱容量はウェーハに比べか なり大きく、(2)式に現われる ε は大きな値をとるので、ボー トの温度上昇はウェーハよりも遅れる。したがって、ボート に接触しているウェーハ下部とボートの影響の小さなウェー ハ上部の温度上昇に時間的ずれを生じ、面内温度分布の不均 一性が顕著になる。

図4に、シミュレーション及び実験で求めたウェーハ温度 の挿入時の時間変化を描いた。挿入速度が2m/minとかなり 速い本条件のもとでは、挿入開始とともにウェーハ温度は 700℃程度に急激に上昇し、その後、ボート移動終了時近傍で ウェーハ上部と下部との温度差が230℃程度の最大値に達し、 時間経過とともに漸近的にその差が減衰していく様子が明ら かとなった。このウェーハ面内最大温度差は処理条件に依存 するが、特に、ボート速度には敏感で、速度を更に上げると は逆で、ウェーハ上部は急激に冷却されるが、下部はボートの影響により徐々に冷却される。

4 ウェーハ温度分布解析システム

ウェーハ温度分布解析モデルに基づいた本解析システムは, 図5に示すように,酸化・拡散装置内のウェーハ温度を計算 機上でシミュレーションすることにより,装置設計者に対し ては設計パラメータの迅速な決定を,製造ラインのスタッフ に対してはエンジニアリングワークステーション(ES-310)を 用いたプロセス条件の迅速な会話的決定を支援する。

本解析システムはHITAC M200Hなどの大形コンピュー タ、ミニコンピュータ、画像処理装置などにより構成される。 大形コンピュータではモデルを記述する大規模な非線形偏微 分方程式(1)式,(2)式のシミュレーションを行ない、その結果 をミニコンピュータに転送する。ミニコンピュータでは即応 性を重視した対話的な環境をユーザーに提供し、その主な役 割は結果の編集、及びそれに画像処理を施した結果の表示で ある。

ウェーハ挿入過程で重要なウェーハ面内温度差だけに注目 した場合には、図6に示したように、ウェーハ上部と下部の 温度の時間変化が必要である。すなわち、ウェーハ挿入後、 いつ、どの位置で、どの程度温度差が発生するかが容易に分 かる。また比較検討のため、同時に2種類(同図ではボート速

面内最大温度差が急激に増大するが,速度をかなり下げても あまり減少しない。

ウェーハ温度分布解析モデルは、反応管の熱容量が大きい と仮定して管壁温度を一定として導出したが、実際にはウェ ーハ挿入後に管壁温度が50℃程度低下することが分かってい る¹。この実験事実をモデルに組み込むと、図4に示したよう に、ウェーハ温度が一時的に低下することがよく説明できる。 ただし、ウェーハ下部で若干異なるのは、管壁温度分布の周 方向依存性を考慮することにより改善される。

熱処理後のウェーハ引出し過程での熱現象は、挿入過程と

度の速い場合と遅い場合)の温度変化を表示できる。

ウェーハ面内温度分布の時間推移を見たい場合には、3次 元表示を用いたアニメーション画面を利用すると直感的に分 かりやすい。図7には、ボートの反応管への挿入直後、及び ボートが静止した直後の時刻でのアニメーション画面を静止 させた画面を表示した。同図から容易に、挿入過程でボート の影響によりボートに接する部分の温度が低いウェーハ面内 温度分布が読み取れる。



ウェーハの反応管への挿入過程で.

図4 ウェーハ温度の時間変化

ボートの影響によりウェーハ面内温度差が顕著になる。



図 5 ウェーハ温度分布解析システム 酸化・拡散装置の設計者に対しては設計パラメータ,製造ラインのスタッフに対してはプロセス条件の迅速 な決定の支援をする。

45

706 日立評論 VOL. 67 No. 9 (1985-9)



ウェーハ温度分布の 区 6 時間変化 ボート速度が速 い場合と遅い場合について、ウ ェーハ上部(実線)と下部(破線) の時間変化を表示した。

図7 ウェーハ温度分布の 3 次元表示 5 inウェーハ 温度分布の時間推移を, アニメ ーション的に表示できる。本図 はある時刻での静止画面を示し たものである。

5 言 結

以下に得られた結論を要約する。

(1) 酸化・拡散装置内で熱処理を受けるウェーハの温度分布 を記述するモデルを導出し、ウェーハ温度分布解析システム を開発した。

(2) 処理時間の長い場合には、定常状態に達したウェーハ温 度はほとんどボートの影響を受けず、酸化膜厚分布はウェー ハ温度分布によって説明できることを明らかにした。

(3) ゲート酸化工程のように処理時間の短い場合に重要なウ ェーハ面内温度差は、ボートの影響により挿入過程で最も顕 著となることがシミュレーション結果から分かり、実験的に も確認された。

(4) シミュレーション結果を3次元表示を用いたアニメーシ

nology, 27, 12, pp. $105 \sim 109(1984)$

- R. S. Rosler : Low Pressure CVD Production Processes 2)for Poly, Nitride, and Oxide, Solid State Technology, pp. $63 \sim 70(1977)$
- 3) 杉田:プロセス誘起欠陥,半導体研究16,半導体研究振興会 編, 工業調査会, pp. 317~341(1979)
- K. Morizane, et al. : Thermal Stress and Plastic Defor-4) mation of Thin Silicon Slices, J.Appl. Phys., 40, 10, pp. $4104 \sim 4107(1969)$
- G. Bentini, et al. : Defects Introduced in Silicon Wafers 5) During Rapid Isothermal Annealing : Thermoelastic and Thermoplastic Effects, J. Appl. Phys. 56, 10, pp. 2922~ 2929(1984)
- S. M. Hu: Temperature Distribution and Stresses in 6)Circular Wafers in a Row During Radiative Cooling, J. Appl. Phys., 40, 11, pp. 4413~4423(1969)

ョン画面に表示することにより, ウェーハ面内温度分布の時 間推移を容易に把握できるようになった。 (5) CAEによるプロセス特性の事前評価により、試作、量産

の早期立上げに有効に活用できる見通しを得た。

参考文献

46

1) J. C. Maliakal, et al. Trends in Automated Diffusion Furnace Systems for Large Wafers, Solid State Tech-

7) 奥:ウェーハ反りの計算機シミュレーション,応物応用電子 物性分科会資料, 382, pp. 9~12(1980) 8) 松葉,外:半導体炉内のウェーハ温度分布,電子通信学会論 文誌, J67-C, 4, pp. 332~338(1984) **杢屋**,外:半導体酸化・拡散装置におけるウェーハ温度過渡 9) 解析モデル,電子通信学会論文誌,J68-C, 6, pp. 425~432 (1985)10) 徳山: MOSデバイス, 工業調査会(1979)