

低コスト・高性能の半導体デバイス製造に 貢献する成膜・アニール用縦型装置

Vertical Furnaces for Thin Film Deposition and Annealing Contributing to Low-cost, High-performance Semiconductor Device Manufacturing

国井 泰夫 中嶋 定夫 宮 博信
Kunii Yasuo Nakashima Sadao Miya Hironobu
柳川 秀宏 三瀬 信行
Yanagawa Hidehiro Mise Nobuyuki

現在、低コストで高性能の半導体デバイス製造に不可欠となっている大量バッチ式縦型成膜・アニール装置は、日立製作所と株式会社日立国際電気が協力し、世界に先駆けて量産用装置として開発・製品化した。この半導体デバイス製造装置では、一度に100枚以上の300 mmウェーハに、ナノメートルオーダーの精度での薄膜形成や、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の温度均一性でのアニール処理を行うことが可能である。縦型装置は、半導体製造技術として今後さらなる展開が期待されるだけでなく、半導体技術の領域からグリーンイノベーション技術への広がりの可能性もある。

1. はじめに

現在の高度情報化社会をもたらした大きな要因は、低コストで高性能の半導体デバイスを必要なだけ供給できるサプライチェーン体制であると言えるであろう。この半導体デバイスの製造には大量バッチ式縦型成膜・アニール装置が広く用いられている。縦型装置は、日立製作所と日立国際電気が協力し、世界に先駆けて量産用として開発・製品化した。現在主流の縦型装置では、一度に100枚以上の直径300 mmのSiウェーハに、ナノメートルオーダーの精度での薄膜形成や、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の温度均一性でのアニール処理を行うことが可能である。

ここでは、横型装置から縦型装置が開発された歴史と主流となった経緯、成膜およびアニール処理の最新技術動向、さらに、半導体技術の領域からグリーンイノベーション技術への広がり可能性について述べる。

2. 成膜・アニール用縦型装置開発の経緯

2.1 横型装置および縦型装置の歴史

日立国際電気は1970年代前半に国内で他社に先行して SiO_2 膜、 SiN 膜、多結晶Si膜などの半導体デバイス用薄膜の成膜装置を開発していた。1975年には横型装置（加熱

された横長の石英管反応炉に原料ガスを流して反応させる装置）を用いた減圧CVD（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）成膜技術の研究を開始して、1976年に第1号機を日立製作所武蔵工場（当時）へ納入した。1984年に「5年で売り上げ倍増」計画が策定されると、縦型装置に開発の重点を置く戦略を打ち出した。それまでの横型装置で培ってきた成膜技術を用いて、縦型装置に特化する方針の転換により、半導体装置事業は順調に伸び、10年後の1994年には縦型装置累計1,500台を出荷して電子機械事業部の主力製品となった。1995年4月には2,000台目の装置が日立製作所に納入されている。まさに「ダントツ製品」であった。

縦型装置はその後、ロードロック/ N_2 パージ機能や自動化対応機能などが追加され、また、大口径化に対応した開発を進め、現在は全世界で7,000台以上の日立国際電気の縦型装置が半導体製造プロセスの主要な工程を担っている。

2.2 縦型装置の開発

1983年ごろの半導体業界ではDRAM（Dynamic Random Access Memory）の主力製品が64 kビットから256 kビットへと移行して、高集積化の技術開発が行われていた。大口径化（直径150 mmウェーハ）、微細化（1.3 μm プロセス）に対応した装置開発が要求された。従来の横型装置が抱える問題としては、バッチ内・ウェーハ面内の膜厚の不均一性、パーティクル・自然酸化膜の発生、ウェーハの大口径化に伴う装置占有面積増大の問題などが顕在化していた。

横型装置ではパーティクルを低減するために石英ボートをカンチレバーによって石英管反応炉内に移載する方法が採用されていたが、石英と石英の接触によるパーティクル発生を抑えきれなかった。また、ウェーハ導入時の外気巻き込みによる自然酸化膜の増大は酸化膜薄膜化の障害とな

り、ウェーハの大口径化と処理ウェーハ枚数の増大はカンチレバー強度の課題となっていた。

それらの課題を解決するため、石英管反応炉を縦置きとした縦型装置の研究が始められた。開発にあたっては、日立製作所の機械研究所と武蔵工場生産技術部、日立国際電気が一体となり、熱シミュレーションや縮小モデルを用いた実験を活用し、下方開口方式による外気巻き込み防止、石英管と接触しない石英ポート構造、ヒータの4ゾーン化と発熱量制御の適正化による温度均一化、省エネルギーをキーとする縦型装置の基本技術を確立した。縦型ヒータを設計するにあたり、試作機では150点の熱電対を埋め込み、実際の温度を測定してシミュレーションの結果と比較しながら、温度の最適化を行った。縦型成膜装置では反応シミュレーションを用いて大口径ウェーハ対応の装置・プロセスの最適化を図った。

1986年に第1号機「VERTEX」を日立製作所に納入した(図1参照)。VERTEXとは頂点を意味する。縦型ヒータの要素技術開発の功績により、日立製作所と日立国際電気が共同で1992年度日本機械学会賞技術賞を受賞した¹⁾。

2.3 縦型装置・プロセスの新展開

2000年代の初め、半導体デバイスの微細化がさらに進展してきたことによる絶縁膜の薄膜化の問題を解決するため、従来のSiO₂膜、SiN膜に替わる高誘電率絶縁膜の採用が本格的に検討された。従来の減圧CVD技術よりも高



図1 | 縦型装置の第1号機「VERTEX」の外観
縦型ヒータの要素技術開発の功績により、日立製作所と日立国際電気が共同で1992年度日本機械学会賞技術賞を受賞した。

い膜厚均一性と高精度の組成制御性を得るため、新しい成膜用縦型装置・プロセスが開発された。2001～2003年には機械研究所と共同で高誘電率膜について検討し、開発の指針を明確にした。さらに、メタル膜や低温のSiO₂膜・SiN膜向けの縦型装置・プロセスを開発し、従来の減圧CVD技術では不可能だった高い膜厚均一性を持つ低温成膜技術を実現した。

また、2000年代初めには、縦型装置による高生産性のエピタキシャル成長という要求もあり、東北大学と日立研究所の協力を得て、従来よりも格段に清浄度を高めたロードロック装置を開発し、低温エピタキシャル成長を世界で初めて縦型装置において実現した²⁾。

酸化処理用の縦型装置に関しても、従来のウェット酸化処理を改良し、Si基板に対し面方位依存性が小さく、深い穴の底まで均一な酸化膜が得られる新規酸化プロセスを開発し、立体構造の先端ロジック用トランジスタやDRAMのメモリセル選択トランジスタなどへの応用が期待されている。

これらの新しい縦型装置³⁾は、枚葉装置が主流となってきた先端デバイス開発においても縦型装置の地位回復をもたらし、日立国際電気の事業規模も拡大した。以下では、それらの技術内容例について詳述する。

3. 縦型装置の技術動向

3.1 縦型成膜装置の技術動向

先端半導体デバイスの製造工程では、高集積・高性能を実現するため、より微細な構造に良好な被覆性で、より低温で、高品質な絶縁膜を形成する技術が求められている。また、より低コストでデバイスを提供するため、生産性の高いプロセスが必須となっている。これらの課題を克服するために、先に述べた新しい成膜技術を開発することによって、被覆性がよく、比較的低温で膜質の高い絶縁膜を形成するプロセスを実現した。この技術により、次世代のメモリやロジックデバイスの課題の多くが解決されると期待されている。

新成膜プロセスは、絶縁膜としてトランジスタのゲートサイドウォールスペーサ、DRAMキャパシタ容量膜としての採用のほかに、犠牲膜やリソグラフィの解像限界を超えたパターン形成への検討が行われている。日立国際電気では、この微細化対応技術をSRP (Super Resolution Patterning) 技術と呼び、精密な膜厚制御が可能な装置・プロセスを提供している。さらに、極低温でも成膜可能なプロセスも開発し、フォトレジストやアモルファスカーボンといった従来技術では成膜は不可能であった材料への成膜も可能とした。

また、成膜プロセスの低温化に伴い、工程の中で必要なウェットエッチング耐性が得られないという課題もあった。これを解決するため、低ウェットエッチングレート膜の開発を行った。

新成膜技術では、精密な膜厚制御、低温成膜、良好なステップカバレッジ(段差被覆性)、ローディング効果(パターン依存性)フリーなどの優れた特徴を実現している。面密度の異なる深溝(開口率=1:10)を持つSi基板に、新成膜技術で高品質SiO₂膜を形成した試料の断面を観察したものを図2に示す。密度1の基板の表面、密度7の基板の表面・溝側面・溝底面の膜厚がすべて68.5 nmと、ナノメートルオーダーの膜厚制御が溝やその密度に依存せずに実現できている。

新成膜技術では、開発当初は生産性が劣ることが課題であった。そこで、生産性を大幅に向上させるため、熱流体解析技術を駆使して、新しい原料供給系、反応室、排気系を開発した。各開発項目についての詳細を次に示す。

(1) 原料供給系

ウェーハ表面への原料供給では、原料分圧をすばやく正確に上昇させることが重要である。これを具現化するために、原料を高精度に短時間で反応室内に供給する方式を採用し、原料供給時間を短縮した。

また、AlO膜、HfO膜などの高誘電率膜などのように、成膜原料が室温・大気圧では液体である材料が増えてきている。これらの原料は、蒸気圧が低く、また熱分解しやすい物性のため、異物が発生しやすい。そこで、供給系内で熱分解せずに安定な気化を実現するため、熱流体解析技術を駆使した原料供給系設計により、均一なヒーティング方式と最適コンダクタンスを実現した。

(2) プラズマ源付き反応室

SiN膜形成プロセスでは、原料ガスにSi原料とN原料を使用する。600℃以下の低温域での膜形成には、ウェーハの極近傍でのN原料活性種の生成が必要である。世界で初めてプラズマ源を縦型装置反応室に設ける構造を考案し、効果的なN原料活性種の生成を実現するとともに、

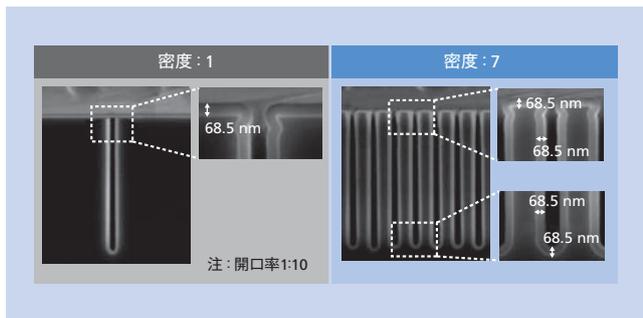


図2 | 高段差被覆性

新しい成膜技術により、ナノメートルオーダーの膜厚制御が実現できた。

従来の外部装着型プラズマ源を有する装置に比べ、N原料供給時間を大幅に短縮した。

(3) 排気系

一部の新成膜プロセスでは、新方式の排気系を採用し、堆(たい)積物付着による排気系メンテナンスサイクルを延ばすとともにパーズ時間も短縮して、生産性向上を実現している。

3.2 縦型アニール装置の技術動向

日立国際電気の縦型アニール装置はウェーハメーカーを対象に開発され、圧倒的に高いシェアを有している(図3参照)。アニール装置の需要、市場要求、日立国際電気の装置・技術の特徴について以下に述べる。

(1) 高温アニール装置の需要

高温アニール装置はウェーハメーカーにおいてはアニールウェーハ、SOI (Silicon-on-Insulator) ウェーハの製造に使われてきた。しかし、昨今のアニールウェーハ市場の縮小とSOIウェーハの伸び悩みで、この分野の装置販売は激減しているのが実情である。代わってデバイスメーカーでのSTI (Shallow Trench Isolation) のアニールなどの需要が拡大し、アニール装置販売の大多数を占めるに至っている。

(2) アニール装置への市場の要求

高温アニールでは従来から、スリップフリー、裏面傷フリー、高纯净度、高スループットの要求が強く、現在でも変わっていない。日立国際電気は、大バッチのプラットフォームにユニークなアニール技術を搭載し、これらの顧客の要求に応えている。

(3) 日立国際電気の縦型アニール装置



図3 | 300 mmウェーハ用縦型アニール装置「QUIXACE」の外観

150℃の低温から1,350℃の超高温まで用途に応じて対応が可能である。

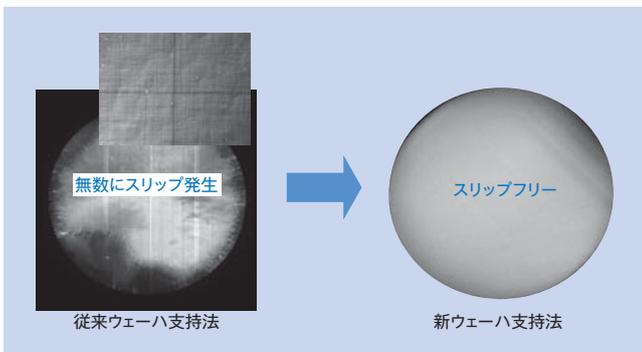


図4 | 1,350°CプロセスでのX線トポグラフィ

超高温アニールプロセスでは、1,350°Cという高温下においてのプロセスで発生するスリップを抑制し、大口径300 mmウェーハを高スループットに処理できる。

日立国際電気のアニール装置は、他社にはない長い均熱領域(±0.5°C, 1,150 mm)のヒータを搭載し、1,200°Cアニールで100枚/バッチが可能である。また、高速のウェーハ搬送システムを搭載し、高スループットでのプロセスが可能である。この装置には各種ヒータを取りそろえており、150°Cの低温から1,350°Cの超高温まで用途に応じて対応できる。超高温対応では、独自のポート形状でウェーハを支持し、ウェーハ内ストレスを極小にすることによってスリップフリーを実現している。1,350°Cでアニール処理したSi基板をX線トポグラフィで観察した結果を図4に示す。従来のウェーハ支持法ではウェーハ全面にスリップ欠陥が発生しているのに比べ、新しいウェーハ支持法ではスリップ欠陥の発生は認められない。

4. 縦型装置の今後の展望

縦型装置は微細化・複雑化・低コスト化が進む今後の半導体デバイス製造工程においても重要な役割を担っていくであろう。例えば、先行するデバイスメーカーでは直径450 mmウェーハを使用するパイロットラインを立ち上げ、低コスト化をさらに進めようという計画がある。酸化・アニール工程では450 mmへの大口径化が進んでも縦型装置は必要であろう。いかに省フットプリントを実現するか、ヒータの昇降温によるウェーハ面内温度差の拡大や安定時における温度均一性など克服すべき課題も多いが、これまでの大口径化の経験と新技術の導入によって解決できると考えている。

直径450 mmウェーハ対応に加えて、縦型装置の用途として、Siウェーハの処理以外の新しい展開が期待される。その代表例がSiCウェーハ処理への適用である。省エネルギーパワーデバイスの有力候補であるSiCデバイスの製造工程では、量産型の超高温(～1,600°C)エピタキシャル成長装置や超高温(～1,800°C)アニール装置が必要であり、縦型装置での実現が強く望まれている。これらの処理

はSiデバイス製造では未踏の温度領域であり、従来の抵抗加熱システムに代えて、超高温を可能とする新規加熱システムを具備した縦型装置が開発されれば、SiCデバイスの量産化を容易にし、グリーンイノベーションを加速する一助となるであろう。

5. おわりに

ここでは、横型装置から縦型装置が開発された歴史と主流となった経緯、成膜およびアニール処理の最新技術動向、さらに、半導体技術の領域からグリーンイノベーション技術への広がりの可能性について述べた。

日立国際電気は、長年蓄積したノウハウをベースに、半導体製造の成膜の分野で、世界トップレベルの技術によって半導体の高精度化を支えていく。

参考文献など

- 1) 日本機械学会：日本機械学会賞 受賞論文および製品、<http://www.jsme.or.jp/shoufirst.pdf>
- 2) 国井、外：サブ100 nm時代のデバイスに向けた縦形成膜装置—縦形SiGeエピタキシャル成長装置—、日立評論、84、3、249～252(2002.3)
- 3) 島田、外：次世代デバイス対応縦型拡散・CVD装置“QUIXACE”の展開、日立評論、88、3、303～306(2006.3)

執筆者紹介



国井 泰夫

1998年株式会社日立国際電気入社、電子機械事業部 営業本部 所属
現在、半導体製造装置などの技術マーケティングに従事
工学博士
応用物理学协会会员、IEEE会員、ECS会員



中嶋 定夫

2001年株式会社日立国際電気入社、研究開発本部 半導体装置システム研究所 所属
現在、次世代半導体製造装置開発および新分野事業探索の指揮に従事
工学博士
応用物理学协会会员



宮 博信

1978年株式会社日立国際電気入社、研究開発本部 半導体装置システム研究所 所属
現在、新事業探索に従事
博士(工学)
応用物理学协会会员、日本表面科学会会員、ECS会員



柳川 秀宏

1988年株式会社日立国際電気入社、電子機械事業部 縦形成膜装置設計部 所属
現在、縦型装置の設計・開発に従事



三瀬 信行

1988年日立製作所入社、中央研究所 エレクトロニクス研究センター ナノプロセス研究部 所属
現在、半導体デバイスおよび半導体製造プロセスの開発に従事
博士(工学)
応用物理学协会会员