

# ミニマルファブ用熱処理装置の開発

## Development of Heat Treatment Tool for Minimal Fab

鈴木真之佑 S. SUZUKI

Minimal Fab is a new semiconductor manufacturing system that is specialized for small lot production, advocated by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). The project has been proceeding so smoothly that developers have demonstrated the manufacture of transistors at an exhibition venue<sup>1)</sup>. Koyo Thermo Systems currently participates in the project and is in charge of the heat treatment tool. In this paper, we introduce the details of the development of the tool.

**Key Words:** Minimal Fab, semiconductor manufacturing equipment, resistance furnace, energy saving

### 1. はじめに

ミニマルファブとは半導体デバイス製造への投資を大幅に下げることが目的とした、新しい半導体製造システムである。半導体デバイスの大量製造を行う大規模工場（以下、メガファブ）では、直径300mmのシリコンウェーハを各工程において処理するためのメートル単位の大サイズの処理装置群が設置されている。またウェーハへの微粒子の付着を抑えるため、装置群はクリーンルーム内に設置されている。これに対し、ミニマルファブでは、直径12.5mmのウェーハを枚葉、すなわち1個流して処理し、各工程が1分以内に終わることを目標としている。すべての処理装置は幅294mm、奥行き450mm、高さ1440mmの筐体に規格化されており、装置内でウェーハが露出する部分だけを局所的にクリーン化し、装置間の移動はシャトルと呼ばれる密閉容器に入れて行い、クリーンルーム自体を不要とする。その結果、1工場当たり5000億円もの投資が必要とされるメガファブに対して、ミニマルファブはその1/1000である5億円の投資で設置を可能とする。またクリーンルームが不要であるなどの理由により、維持費も安価に抑えられる<sup>2)</sup>。

ミニマルファブのターゲットは多品種少量市場である。半導体市場のうち、多品種少量市場は金額ベースでその約半分をも占めており、その規模は10兆円市場とされている。ミニマルファブは多品種少量生産に適しており、1万個のLSI（大規模集積回路）を生産する場合、チップ面積当たりのコストはメガファブの約1/8、また

納期はメガファブが1～6ヶ月であるのに対し、わずか1～3日まで短縮できる<sup>3)</sup>。

ミニマルファブの開発は国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）が主催し、約130の団体・企業などが参画する（2016年4月時点）コンソーシアム「ファブシステム研究会」で行われているが、特にプロセス開発および装置開発を推し進めるため、産総研と民間企業23社（同年月時点）によってミニマルファブ技術研究組合が設立された。装置開発においては各社がそれぞれ専門とする工程の装置を開発している。光洋サーモシステム株式会社は抵抗加熱式の熱処理装置開発を担当して、大気圧の窒素ないしは酸素雰囲気下でウェーハの熱処理をすることのできるミニマル抵抗加熱炉を開発した。

以下、第2章では、ミニマル抵抗加熱炉の概要について述べ、シリコンウェーハの熱酸化への適用について説明する。第3章においては、抵抗加熱炉をベースとした他のプロセスへの応用について述べる。

### 2. ミニマル抵抗加熱炉

#### 2.1 装置概要

ミニマル抵抗加熱炉の外観を図1に示す。タッチパネル下のドッキングポートにシャトルをセットし、スタートボタンを押すと、ウェーハは自動でシャトル内から取り出され、プロセス室まで搬送される。処理終了後、ウェーハは自動でシャトルに戻される。そしてそのシャトルを次工程の装置にセットする……、といった一連の動

作の繰り返しにより工程が進んでいく。

ミニマル装置において、筐体フレームとカバー、タッチパネル、および、装置内ウェーハ搬送機は標準化されており、各社は処理部分のみの開発に専念すればよいこととなる。



図1 ミニマル抵抗加熱炉の外観  
Schematic view of the minimal resistance furnace

## 2.2 加熱炉のミニマル化

図2に、ミニマル抵抗加熱炉の熱処理部の構造を示す。基本構造は従来の当社製半導体熱処理用縦型炉がベースである。ミニマル装置の電源容量が1kVAに定められていることから、加熱源であるヒータの最大消費電力は700Wとし、最高使用温度である1200℃におけるヒータの消費電力を、装置最大電力の半分以下になるように熱系の設計を行った<sup>4)</sup>。ヒータからの放熱は筐体天井部のファンにより排出されており、ヒータ表面と筐体表面との間が最短で5cmしか離れていないにもかかわらず、オペレータが触れられる筐体表面の温度は40℃程度まで抑えられている。

ウェーハポートはエレベータにより上下し、処理時はヒータの下の搬送室で搬送機からウェーハを受け取った後、プロセスチューブ内にロードされる。温度制御は従来炉と同じ外温熱電対（以下、TC：Thermocouple）と内温TCによるカスケード制御により、外乱の影響を抑える構成としているが、内温TCをウェーハポート内に配置することにより省スペース化を図っている。処理

時のプロセスチューブ内容積はわずか50cm<sup>3</sup>であり、そのためドライ酸化処理においては、酸素ガスの使用量を毎分20cm<sup>3</sup>まで低減した。本装置には容量1L、充填圧9.8MPaの酸素ガスボンベを1本内蔵しているため、ガスボンベ1本で72時間の本処理が可能である。

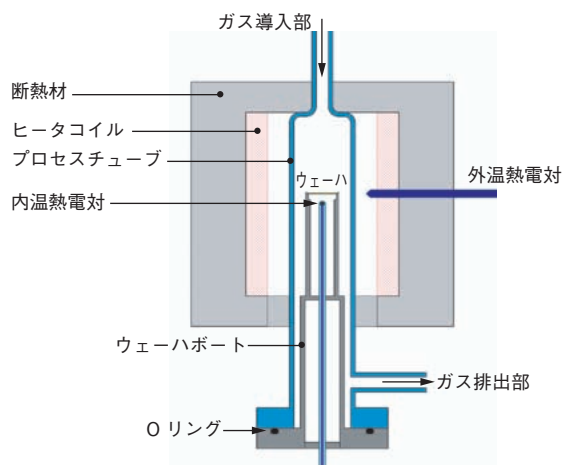


図2 熱処理部の断面図  
Cross section view of heat treatment unit

## 2.3 処理時間の短縮

抵抗加熱炉は周辺雰囲気加熱することで間接的にウェーハを温めるため、ウェーハの投入枚数に関係なく熱処理に要する時間は同一である。したがって、メガファブ装置ではウェーハ数十枚のバッチ処理が行われている。しかし、ミニマル装置は枚葉で処理するため、半導体製造工程の中でボトルネックとなってしまう、処理時間の短縮が必須となる。

処理時間の短縮には二つのアプローチがある。一つは熱処理時間そのものの短縮であり、熱酸化プロセスにおいてはプロセスガスの変更（酸素→水蒸気）やプロセスガスの高圧化などが考えられる。二つ目は熱処理以外の時間の短縮であり、本節では後者について説明する。

半導体熱処理装置においては、ウェーハのポートへの載せ・降ろしや、ポートのプロセスチューブへの投入・取り出しに加え、高温での処理の場合はそれより低いヒータ温度でポートを投入・取り出しする必要があるため、投入温度から処理温度への昇温および処理後の取り出し温度への降温が必要となり、本来の熱処理以外の部分で時間を要する。これはウェーハおよびポートの熱容量、そしてウェーハの面積・厚みが大きいいため、ウェーハに結晶欠陥が生じないようにウェーハ内の温度分布を極力抑えながら行う必要があるからである。

ミニマル抵抗加熱炉においては、ポートおよびウェーハの熱容量が小さいことから、ポートのプロセスチューブへの投入・取り出しを高速に行うことができる。また高温での処理の場合でも、処理温度状態のヒータに直接ポートを投入・取り出しすることが可能であり、従来装置のような昇降温が不要となる。図3に示すように、当該装置においては熱処理以外の時間が10分と、従来装置より一桁少ない時間となる。

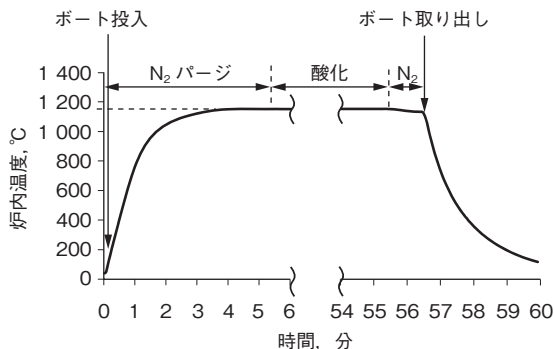


図3 熱酸化処理の温度プロファイル例

Example of temperature profile in thermal oxidation process

## 2.4 抵抗加熱炉の評価

ミニマル装置群の中でも、抵抗加熱炉は特に局所クリーン化が重要な装置である。なぜなら、熱酸化プロセスにおいて1000°C以上の高温で処理を行うため、ウェーハ上へ不純物が付着した場合、高温により不純物がウェーハ中へ速やかに拡散し、最終的なデバイスの特性を損ねるからである。そこで本装置において十分なクリーン化ができているのかを評価するため、産総研の池田らは本装置で熱酸化したシリコンウェーハを用いてMOSキャパシタを作製し、電気特性を評価した。

詳細な結果は文献<sup>5)</sup>に示されるが、MOS (Metal-Oxide Semiconductor) キャパシタの電気容量のゲート電圧依存性から酸化膜の固定電荷密度が $9.4 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 、界面準位密度が $1.38 \times 10^{10} - 1.77 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ となり、デバイス作製上問題のないレベルであることが分かった。

## 3. 展開

前章で紹介した抵抗加熱炉をベースとして、次の段階として取り組んでいるのがミニマルLP-CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 炉である。本

装置はシリコンウェーハ上への多結晶シリコンおよび窒化シリコンの成膜を目的としている。試作装置では、ミニマルコンセプトに従い複雑な原料ガス供給・排気系統から真空ポンプ、除害筒、ガス漏洩検知器までを1筐体に収めることに成功した。

現在、本試作装置を用いて実装部品の動作評価を行いながら、多結晶シリコン成膜のプロセス評価を行っている。多結晶シリコン成膜においては、通常モノシランが使われるが、ミニマルファブ用としてはジクロロシランによる成膜プロセスを検証している。その理由は、ジクロロシランは常温で液体であるため、筐体内の原料ガスの容器を小型化できることと、特殊高圧ガスの使用を避けるためである。

また熱酸化プロセスにおける処理時間短縮のため、ミニマルパイロジェニック酸化炉およびミニマル高圧酸化炉の開発にも取り組んでいる。

ミニマル装置の開発には乗り越えるべき課題も存在する。まず、従来装置からの小型化に伴い、要素部品によっては現状のラインアップで十分に小型化されたものが存在せず、LP-CVD 炉のような部品点数の多い装置においてはメンテナンス性の悪化に繋がる。このため、部品の小型化を部品供給メーカの協力を得ながら開発を進めている。他には上記のジクロロシランの利用のような、従来の半導体製造で実績のないプロセスの開発である。また、ファブとしての運用を見据え、装置やプロセスのロバスト性、経時的な安定性、メンテナンスサイクルとその方法などについて、実証ラインでのプロセス開発・評価と並行して進めていくことが必要である。

## 4. おわりに

ミニマルファブにおいて大気圧雰囲気下での熱処理をするために、ミニマル抵抗加熱炉を開発した。ヒータ消費電力は最高500W以下、使用酸素ガス流量は毎分 $20 \text{cm}^3$ と省エネルギーを実現した。本装置を用いて作製したMOSキャパシタの電気特性は、デバイス作製上問題のないレベルであり、局所クリーン化が実現していることを示した。また、ミニマル抵抗加熱炉をベースとして、多結晶シリコンおよび窒化シリコンを成膜するためのミニマルLP-CVD 炉を開発中である。

ミニマルファブは、半導体産業に新しい方向性を打ち出した試みであり、展示会において半日で製造ラインを立ち上げ、トランジスタを製作するレベルにまでなり、

その実用化の実現性が市場にもはっきりと認められるようになってきた。すでにミニマル装置を用いたファウンダリの設立も始まっており、実際の産業への応用へ向かって走り出したといえる。我々もこのプロジェクトがもたらす日本の新しいモノづくりの実現を目指して、努力を重ねていく所存である。

本取り組みは産総研および、ミニマルファブ技術研究組合、ファブシステム研究会での共同取り組みであり、この場を借りて改めて謝意を表します。

\*ミニマルは国立研究開発法人産業技術総合研究所の登録商標です。

## 参考文献

- 1) 居村史人, 浦 伸吾, 北山侑司, 古賀和博, 浅野 均, 中戸克彦, クンプアンソマワシ, 原 史朗: ミニマル装置群で作製した pMOS インバータ, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 14a-A29-9(2015).
- 2) 原 史朗: ミニマルファブ構想, クリーンテクノロジー, Vol. 23, No. 12(2013)1.
- 3) 業界地図を塗り替える刺客, 日経ビジネス, 2016 年 4 月 25 日号 38.
- 4) 服部 昌: ミニマル抵抗加熱炉, クリーンテクノロジー, Vol. 23, No. 12(2013)46.
- 5) 池田伸一, 石田夕起, 原 史朗, 中戸克彦, 森川清彦, 服部 昌: Si 熱酸化によるミニマル抵抗加熱炉の評価, クリーンテクノロジー, Vol. 24, No. 12(2014)48.

## 筆者



鈴木真之佑\*  
S. SUZUKI

\* 光洋サーモシステム株式会社 商品開発部