



# 半導体酸化拡散・化学気相成長装置の高精度熱処理・成膜反応プロセスに関する研究

渡邊, 智司

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2016-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6437号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006437>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名 渡辺 智司

専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

半導体酸化拡散・化学気相成長装置の高精度熱処理・成膜反応プロセスに関する研究

指導教員 平澤 茂樹

## 第1章 緒論 (研究の背景と目的)

半導体製造工程では集積度増大とシリコンウエハ直径増大の結果により、製造工程の高精度・均一化が強く要求されている。その半導体製造工程の中の酸化拡散プロセスでは、シリコンウエハを電気ヒータあるいはハロゲンランプヒータにより 800~1200℃に加熱し、シリコン基板への不純物の拡散、結晶損傷の回復、熱酸化膜の形成などを行う。また、薄膜形成の中にある化学気相成長 (CVD) プロセスでは、シリコンウエハを 600~1000℃に加熱し、シリコン基板表面に酸化シリコン膜、窒化シリコン膜、多結晶シリコン膜などの薄膜を形成する。不良率低減や生産自動化のためには、加熱中のウエハ温度を精度良く測定し、ウエハ全面が所定の温度で均一になるように加熱量を制御することが重要である。しかし、従来は 1000℃レベルの製造プロセス中のウエハ温度を測定することができなかった。その理由は、半導体製造プロセス中でのウエハ温度計測は、非接触計測であることが必須であるためである。そのためにノイズが多い環境中でシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発が必要であった。また、多数のシリコンウエハを同時に処理するバッチ処理と一枚ごとに処理する枚葉処理の両方がある。そのバッチ処理熱処理の縦形熱処理装置に関しては、装置高さの制約でヒータ全体に対するウエハ熱処理領域の割合を増す必要があり、また均一熱処理やウエハ大直径化の要求に対応するため、温度分布低減を目的としたヒータ発熱量制御の適正化やウエハ配列間隔、挿入・取出し速度の適正化の検討が必要であった。シリコンウエハ上に薄膜を堆積させる CVD 装置においては均一成膜を実現するためには反応室内における流れやガス濃度分布を正確に把握することが不可欠であり、ウエハ上に堆積する薄膜の成長速度を予測する成膜シミュレーションの重要性が高く、高速に解析できる成膜反応解析手法の開発が必要であった。また、バッチ処理縦形 CVD 装置ではキャパシタに必要な 10 nm 以下の薄い膜の成膜ができず、シリコンウエハを1枚ごとに処理する枚葉熱処理装置が用いられるが、1枚ごとでは生産能力が低い。そこで生産能力を増した枚葉熱処理装置の開発が必要であった。

本研究では、シリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発、バッチ処理酸化拡散プロセスについて高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発、バッチ処理低圧 CVD プロセスについて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発、生産能力を増した枚葉熱処理装置の開発を行う。それらについて新しい技術を開発し、学術的に基礎技術を体系的にまとめることを目的とする。

## 第2章 バッチ処理拡散装置内のウエハの放射温度計測技術

第2章では、シリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発を目的とする。特に横形拡散装置を対象に、石英のプリズムによる全反射を利用して熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にある 1000℃レベル

のウエハ温度を測定する方法について検討した。

検討の結果、シリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法として、2個の石英プリズムからなる光ガイドを用いて熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にあるシリコンウエハの放射測温を行う方法を開発した。開発した放射測温法では光ガイドとウエハでの迷光による測定誤差は定常状態では約0.5℃以下であり、定常状態では熱電対の測定値を基準とすると、本測定による放射温度計の測定値は±2℃以内の差でこれと一致することを明らかにした

### 第3章 バッチ処理縦型拡散装置のウエハ温度分布解析

第3章では、バッチ処理酸化拡散プロセスについて高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発とウエハ面内温度差に及ぼす各種因子の影響を検討することを目的とする。ヒータ発熱量をPID制御させたときの、装置とウエハの過渡温度変化を計算する軸対称二次元放射伝熱解析プログラムを作成し、定常時のヒータ内空間温度分布、挿入時のウエハ温度上昇特性に及ぼすヒータ発熱量制御の影響や、ウエハの透過の影響、ウエハ面内温度分布に及ぼす挿入・取出し速度の影響などを検討した。

上記検討の結果、縦形拡散装置において、ヒータ発熱量にフィードフォワード制御(挿入時に挿入口近傍のヒータ設定温度を高くする)を用いると、全ウエハの温度上昇速度を速くすることができることを示し、取出し時のウエハ面内温度差に及ぼすウエハ直径、厚さ、間隔、取出し速度の影響について無次元図表を作成した。

### 第4章 バッチ処理低圧CVD装置の成膜反応プロセス解析

第4章では、バッチ処理低圧CVDプロセスについて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発を目的とする。新たに考案した縦型低圧CVD装置用のネットワーク法による反応解析モデルを用いて高速に解析できる一次元ネットワーク反応解析手法を開発し、さらにその反応解析手法を用いて $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜、TEOS- $\text{SiO}_2$ 膜、D-Poly膜の成膜シミュレーションを行った。

上記検討の結果、バッチ処理低圧CVDプロセスについて開発した一次元ネットワーク反応解析手法により計算した成膜速度やそのバラッキが、既存の二次元FEM解析の計算値と5～10%程度の差に収まることを確認した。さらに解析時間はFEM解析の約1/1000～1/2000の時間で解析が可能であることを示した。

### 第5章 二枚葉CVD装置による均一成膜反応技術

第5章では、生産能力を増した枚葉熱処理装置の開発を目的として、二枚葉CVD装置を開発し、それを用いて温度均一性と $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜の成膜速度(膜厚)均一性を実験で評価した。

上記検討の結果、定常状態における二枚のウエハ全体での温度ばらつきは±1℃以内であり、フィードフォワード発熱量制御で連続処理制御無しの場合の1/2～1/3に相当する成膜開始時点で0.7℃終了時点で0.8℃に低減でき、フリップフロップガス供給技術で、目標のウエハ間の成膜速度均一性±2%を達成できることを示した。

以上に述べたように、本研究によりシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法を開発し、バッチ処理酸化拡散プロセスについて高速に解析できるウエハ温度分布解析手法を開発し、バッチ処理低圧CVDプロセスについて高速に解析できる成膜反応解析手法を開発し、生産能力を増した枚葉熱処理装置を開発し、学術的に基礎技術を体系化した。

| 氏名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 渡辺 智司                                  |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----|-------|
| 論文<br>題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 半導体酸化拡散・化学気相成長装置の高精度熱処理・成膜反応プロセスに関する研究 |     |       |
| 審査委員                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 区 分                                    | 職 名 | 氏 名   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 主 査                                    | 教 授 | 平澤 茂樹 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 副 査                                    | 教 授 | 山根 隆志 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 副 査                                    | 教 授 | 鈴木 洋  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 副 査                                    | 准教授 | 川南 剛  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 副 査                                    |     |       |
| 要 旨                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                        |     |       |
| <p>半導体集積度はムーアの法則にしたがって毎年2倍で増加しており、それに伴って回路パターンの微細化が進んでいる。半導体製造工程では集積度増大とシリコンウエハ直径増大の結果により、製造工程の高精度・均一化が強く要求されている。その半導体製造工程の中の酸化拡散プロセスと化学気相成長(CVD)プロセスでは、シリコンウエハを電気ヒータなどにより800～1200℃に加熱し、シリコン基板への不純物の拡散、結晶損傷の回復、熱酸化膜の形成、酸化シリコン膜などの薄膜の堆積を行う。熱処理装置として、バッチ処理型装置、バッチ処理縦型装置、枚葉装置の順に開発されている。熱処理装置の不良率低減や生産自動化のためには、加熱中のウエハ温度を精度良く測定し、ウエハ全面が所定の温度で均一になるように加熱量を制御する手法の開発が必要であった。そのためにノイズが多い環境中でシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発が必要であった。また、多数のシリコンウエハを同時に処理するバッチ処理熱処理の酸化拡散装置に関しては、均一熱処理やウエハ大直径化の要求に対応するため、温度分布低減を目的としたヒータ発熱量制御の適正化やウエハ配列間隔、挿入・取出し速度の適正化の検討が必要であった。シリコンウエハ上に薄膜を堆積させるCVD装置においては均一成膜を実現するために反応室内における流れやガス濃度分布を正確に把握することが不可欠であり、ウエハ上に堆積する薄膜の成長速度を高速に解析できる成膜反応解析手法の開発が必要であった。また、バッチ処理CVD装置では10 nm以下の薄い膜の成膜ができず、シリコンウエハを1枚ごとに短時間処理する枚葉熱処理装置が用いられるが、1枚ごとでは生産能力が低い。そこで生産能力を増した枚葉熱処理装置の開発が必要であった。</p> <p>本研究では、シリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発、バッチ処理酸化拡散プロセスについてウエハ面内温度差を低減する最適条件を明らかにし、バッチ処理低圧CVDプロセスについて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発、生産能力を増した枚葉熱処理装置の開発を目的とする。それらについて新しい技術を提案し、学術的に系統的にまとめるものである。</p> <p>第1章では、研究の背景、既存の知見、本研究の目的と方法が纏められている。</p> <p>第2章では、シリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法を検討した結果を述べている。特に石英のプリズムによる全反射を利用して熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にある1000℃レベルのウエハ温度を測定する方法について検討した。検討の結果、2個の石英プリズムからなる光ガイドを用いて熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にあるシリコンウエハの放射温度計測を行う方法を開発した。開発した放射測温法では光ガイドとウエハでの迷光による測定誤差は定常状態では約0.5℃以下であり、放射率の自動補正方法やノイズの低減方法について新しい手法を提案し、定常状態で熱電対の測定値を基準とすると本測定による放射温度計の測定値は±2℃以内の差でこれと一致することなどの成果を述べている。</p> <p>第3章では、バッチ処理酸化拡散プロセスについて高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発とウエハ面内温度差に及ぼす各種因子の影響の検討を行った結果を述べている。ヒータ発熱量をPID制御させたときの、装置とウエハの過渡温度変化を計算する軸対称二次元放射伝熱解析プログラムを作成し、定常時のヒータ内空間温度分布、挿入時のウエハ温度上昇特性に及ぼすヒータ発熱量制御の影響や、ウエハの透過の影響、ウエハ面内温度分布に及ぼす挿入・取出し速度の影響などを検討した。検討の結果、縦形</p> |                                        |     |       |

|    |       |
|----|-------|
| 氏名 | 渡辺 智司 |
|----|-------|

拡散装置において、ヒータ発熱量にフィードフォワード制御(挿入時に挿入口近傍のヒータ設定温度を高くする)を用いると、全ウエハの温度上昇速度を速くすることができることを示し、取出し時のウエハ面内温度差に及ぼすウエハ直径、厚さ、間隔、取出し速度の影響について無次元図表を作成したことなどの成果を述べている。この縦形拡散装置についての研究成果は、産業界で広く活用され、産業界の発展に大いに貢献し高い評価を得ている。

第4章では、バッチ処理低圧CVDプロセスについて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発を目的とする縦型低圧CVD装置用のネットワーク法による反応解析モデルを用いて高速に解析できる一次元ネットワーク反応解析手法を開発し、さらにその反応解析手法を用いてSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜、TEOS-SiO<sub>2</sub>膜、D-Poly膜の成膜シミュレーションを行った結果を述べている。検討の結果、開発した一次元ネットワーク反応解析手法により計算したバッチ処理低圧CVDプロセスでの成膜速度やそのバラッキが、二次元FEM解析の計算値と5~10%程度の差に収まることを確認し、さらに解析時間はFEM解析の約1/1000~1/2000の時間で解析が可能であることなどの成果を述べている。

第5章では、生産能力を増した枚葉熱処理装置の開発を目的として、二枚葉CVD装置を提案し、それを用いて温度均一性とSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜の成膜速度(膜厚)均一性を実験で評価した結果を述べている。検討の結果、定常状態における二枚のウエハ全体での温度ばらつきは±1℃以内であり、フィードフォワード発熱量制御で連続処理制御無しの場合の1/2~1/3に相当する成膜開始時点で0.7℃に、終了時点で0.8℃に低減でき、フリップフロップガス供給技術で、目標のウエハ間の成膜速度均一性±2%を達成できることなどの成果を述べている。

第6章には、本研究の成果が総括されている。

以上、本研究は、製造工程にあるウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法を開発し、バッチ処理酸化拡散プロセスについてウエハ面内温度差に及ぼす各種因子の影響を定量的に明らかにし、バッチ処理低圧CVDプロセスについて高速に解析できる成膜反応解析手法を開発し、生産能力を増した枚葉熱処理装置技術を提案し、半導体熱処理・成膜反応プロセスに関する技術を系統的にまとめた。その成果は半導体製造工程の高精度化のための生産技術や評価に広く活用され、産業界の発展に大いに貢献している。本研究成果は、機械工学における価値ある成果といえる。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の渡辺智司は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。