

### 真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究

TANDOU, Takumi / 丹藤, 匠

---

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

100

(発行年 / Year)

2019-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第456号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2019-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00021752>


2019年 2月 4日


学位論文審査委員会

委員長 藤井 章博 殿

学位論文審査小委員会

主査 教授 郷法川 学 

副査 教授 川上 忠重 

副査 教授 平野 元久 

丹藤 匠 氏 提出学位請求論文

「 真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究 」

論文内容の要旨と審査結果の要旨（報告）

(報告様式Ⅱ)

## 1. 論文内容の要旨

真空技術は半導体製造、食品の製造や保存、医療用診断など、様々な産業において基盤技術となっている。真空環境を用いた製造プロセスにおいては、プロセス中の被処理体の温度制御が求められることが多く、真空中において接触する固体間の伝熱現象を解明することは工業的に有用性が高い。本研究では、特に半導体製造分野に注目し、真空中における接触面の伝熱について検討を行った。

半導体製造分野では、半導体デバイスの製造に不可欠な微細加工（ドライエッチング）工程などで、真空中においてウエハの処理が行われている。この際、高い処理性能を得るためにはウエハの温度を高精度に制御することが必要となる。具体的には、半導体製造における加工寸法の高精度化、歩留まり向上にはウエハの高精度な温度制御が不可欠であり、ウエハとステージ（試料台）間の伝熱特性の解明が望まれている。上記半導体製造装置の一般的な構成として、ウエハは真空チャンバー内において温度調整されたステージ上に静電チャックで吸着固定される。また、ウエハとステージの接触面には伝熱用ガスの供給機構が設置されている。このため、ウエハとステージ間の伝熱性能を考慮してウエハ温度を最適に制御するためには、接触面における接触の効果、伝熱用ガスの効果などを詳細に検討する必要がある。本研究では半導体製造分野の実使用条件を考慮しながら、真空中における接触面の接触熱コンダクタンスを詳細に検討し、伝熱メカニズムを考察した。

本論文は、全6章から構成されている。

第1章では、緒論として、まず目的と研究対象について説明している。本研究の目的は、①接触熱コンダクタンスの各成分の基本特性の把握、②ガス成分の特性解明と算出方法の検討、③解明した伝熱メカニズムおよび得られた知見を基にして、半導体製造装置を設計・運用する上で課題となる接触面圧の変動、接触面粗さの経時変化などの外乱に対して、ロバストな接触面の設計指針を提案すること、である。また、本研究の研究対象（評価条件）は半導体製造装置の実使用条件を想定して接触面圧50kPa以下、ガス圧力1~5000Paとし、過去の報告例とは異なる領域の評価であることを示した。

第2章では、半導体製造装置における一般的なステージ構成と温度制御方法、および接触熱コンダクタンスの課題について述べた。半導体製造装置においてはウエハとステージ間の接触熱コンダクタンスが長期に亘って安定していることが望ましいが、その安定性の阻害要因として接触面圧の変化や接触面の表面粗さの変化などの外乱が想定される。接触熱コンダクタンスは接触成分、ガス成分、放射成分で構成されるものと考えられ、各種外乱に対する各成分の特性や挙動を理解し、対策を考察することで最適な設計指針を構築できるものと考えた。

第3章では、半導体製造装置におけるウエハとステージの接触状態を模擬した実験系を構築し、真空中における接触熱コンダクタンスの構成成分とその基本特性を検討した。その結果、接触熱コンダクタンスの接触成分、ガス成分、放射成分のうち、本実験における放射伝熱量は全伝熱量の1%程度であり、無視できる程度であった。また、接触成分は接触

面圧に伴って増加し、これは接触面圧に伴って真実接触面積が増加したためと考察した。一方、接触面圧が低い領域においては接触面圧に対する接触成分の特異的な変化が見られ、これは接触面の微小凹凸の形状特性に起因するものと推察した。更に、チャンバー内圧力 100Pa の実験において、接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的であることがわかった。半導体製造装置においては数百 Pa～数千 Pa で伝熱用ガスの圧力を制御する運用例が最も多いと考えられ、この場合にはガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考えた。このため、次章においてはガス成分に着目した評価を実施することにした。

第 4 章では、チャンバー内圧力 5000Pa 以下の真空状態と 50kPa 以下の接触面圧印加に対する接触熱コンダクタンスを評価し、特にガス成分に着目してその挙動の把握と算出方法の検討を実施した。また、得られた知見を基に接触面圧の変動に対してロバストな伝熱性能を有する接触面の設計指針を検討した。その結果、接触面圧が変化する真空中の接触面において、ガス圧力が自由分子流条件である場合には接触熱コンダクタンスの接触成分のみが変化し、ガス圧力が遷移流以上である場合には接触熱コンダクタンスの接触成分およびガス成分の両方が変化することを実験により明らかにした。これにより、接触面圧が変動する外乱を想定した場合には、ガスの平均自由行程と接触面の微小隙間の関係が自由分子流条件 ( $K_n > 10$ ) を満たし、かつその条件内で高いガス圧力となるように接触面を設計することで、ロバストな伝熱性能が得られることを設計指針として示した。また、自由分子流条件における接触熱コンダクタンスの実験値をチャンバー内圧力の一次関数として表し、接触成分とガス成分のそれぞれの値を算出する方法を検討した。算出したガス成分は理論値 (適応係数 0.73) と一致し、上記算出方法の妥当性を確認した。

第 5 章では真空中のウエハとステージの接触面を対象として、接触熱コンダクタンスへの表面粗さの影響を検討した。その結果、接触熱コンダクタンスの実験値から絶対真空 (0Pa) 時の接触成分を算出した結果、接触面の  $R_a$  が小さい試料ほど大きな値を示した。これは  $R_a$  が小さい接触面ほど真実接触面積が増加したためと考察した。一方、ガス成分は、自由分子流条件を満たす圧力領域においては接触面の  $R_a$  に関わらず、ほぼ同じ値を示した。また、接触面の  $R_a$  が小さい試料ほど、高いチャンバー内圧力でも自由分子流条件を維持した。これは  $R_a$  が小さい試料ほど、接触面における平均隙間距離が縮小したためと推察した。これらの結果より、接触面の表面粗さが経時変化する外乱が発生した場合においても、接触熱コンダクタンスの変動が少なく、高い伝熱性能を有する接触面の設計指針として、伝熱用ガスとして分子直径が小さい He などのガスを選定し、接触時の平均隙間距離が小さくなるように試料の接触面の  $R_a$  を小さく仕上げ、ガス圧力は自由分子流条件を保つ領域内で高めに設定することが有効であることを示した。

第 6 章では第 1 章から第 5 章までの結果をまとめて以下の結論を示した。

半導体製造装置で運用例の多い数百 Pa～数千 Pa の伝熱用ガスの圧力領域における接触面では、接触熱コンダクタンスは接触成分、ガス成分、放射成分の中のガス成分が支配的

となり、ガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考えられる。これにより、ステージとの伝熱によってウエハ温度を高精度に制御するためには、ガス成分が重要なパラメータであることがわかった。また、ガス成分は自由分子流となるガス圧力領域であれば、接触面圧、および表面粗さに関わらずほぼ一定の値であることが実験により明らかになった。この特性を考慮して、伝熱用ガスとしては分子直径が小さい He などのガスを選定し、かつ接触時の平均隙間距離が小さくなるように試料の接触面の  $R_a$  を小さく仕上げ、更にガス圧力は自由分子流条件を保つ領域内で高めに設定することで、接触面圧の変化や接触面の状態（表面粗さ）の変化などの外乱に対してもロバストな高い伝熱性能を有する伝熱面を実現できることがわかった。

## 2. 審査結果の要旨

本論文は、半導体製造装置におけるウエハの温度制御特性を向上させるための伝熱特性を明らかにしたものである。ウエハとステージ間に存在する弱い結合力で伝熱（接触熱コンダクタンス）は、材料の接触成分、接触領域に存在するすきまを流れる伝熱用ガスの成分、放射成分の 3 つから構成され、分子直径が小さいガスを選定し、試料の接触面粗さを小さく仕上げ、更にガス圧力は自由分子流条件を保つ領域内で高めに設定することが、ロバストな高い伝熱性能を有する伝熱面を実現できることを明らかにした。

以上、本論文で得られた真空中における接触熱伝達特性に関する知見は、半導体製造装置のみならず、各種の弱い締結力を有する材料間の熱伝達制御にも応用できるため、工学に資するところ大である。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するとの結論に達した。