

氏名	枕 辺 幸 次
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)化学工学専攻
学位論文題目	半導体製造用空調空間におけるクリーン化技術に関する研究
指導教官	東北大学教授 三浦 隆利
論文審査委員	主査 東北大学教授 三浦 隆利 東北大学教授 松本 繁 東北大学教授 今野 幹男

論文内容要旨

第1章 緒論

昨年来の世界的な半導体不況により、一時的に半導体産業の高集積化への設備投資は足踏みしている。しかしながら、中長期的視点に立てば現在の64Mbit DRAMから、西暦2000年には256Mbit DRAMの量産化が見込まれている。これに伴い、半導体デバイスの加工寸法も0.18~0.25 μm となり、ウェハサイズは300mm時代となることが予想されている。

このような半導体の高集積化に対応するため、半導体製造用の空調空間、いわゆるクリーンルーム(CR)の清浄度も徐々に高潔度が要求されるようになっており、0.1 μm の微粒子が1ft³内に1個以下というような超清浄空間が求められる時代になってきた。しかし、このようなタイプのクリーンルームを将来の高潔度を要求される大空間全てにおいて実現するには、初期設備コスト、運転コストとも膨大なものにならざるを得ないという大きな問題点がある。また、従来の汚染物質としては作業員や生産機器等から発生する微粒子が主な汚染物質であったが、近年では金属、イオン物質やクリーンルーム構成部材からの揮発性有機物質などのガス状化学汚染も問題にされるようになってきた。

本研究では、このような背景から次世代半導体製造用空調空間(CR)におけるクリーン化技術の開発を目的に、以下の3点について各種実験及び解析を行い検討した。第1点目は半導体の歩留り向上に貢献するため、最近問題とされてきたクリーンルーム内における化学汚染源の把握と防止対策の検討である。第2点目は低コストかつ省エネルギーなクリーン化を目指し、ファンフィルタユニットによる気流制御の適正化による局所清浄化技術の確立である。第3点目は次世代の300mmウェーハ対応の時代には、ウェーハ搬送ポッドの重量増と人体からの発塵を防止する点から、無人搬送車(AGV)が主流になってくることが予想され、このAGVの走行による気流・塵埃挙動の解明とウェーハへの汚染を引き起こさない必要局所清浄域の検討である。

第2章 クリーンルーム内化学汚染源の把握と防止対策

本章では、LSI歩留まり向上の一方策として、まずクリーンルーム空気が接するすべてのクリーンルーム構成部材に着目し、部材の種類とクリーンルーム空気が接する面積を調査し、各種構成部材からのボロ

ン及びリンの発生量について検討した。その結果、クリーンルーム構成部材の中では HEPA (High Efficiency Particulate Air filter) フィルタろ材の割合が圧倒的に多く、床面積の 38 倍にも達すること、ある種の壁紙はボロン及びリンを大量に発生し、クリーンルームでの使用を避けたほうが良いこと、フィルタろ材からのボロン発生量は湿度依存性があり、湿度が高い程多く発生する傾向があり、一度枯れると再発生はほとんどないことなどを明らかにした。次に、将来ますます重要になってくると言われる揮発性有機化合物 (VOC : Volatile Organic Compounds) について、その低減を目的として、クリーンルームに使用されている部材から発生する有機化合物を測定し評価するとともに、クリーンルーム用市販吸着材の VOC 除去性能及び寿命について検討した。揮発性有機化合物に関してもある種のシール材はシロキサンを多量に発生し、クリーンルームでの使用を避けるべきと思われること、揮発性有機化合物の吸着材として優れた特性をもつものがあり、その寿命を評価した結果、約 8 年程有効であることなどを明らかにした。また、この吸着材をケミカルフィルタとしてクリーンルームに組み込み、汚染対策防止に有効な設置方法を提案した。

本章では、以上のように 10^{-3} ~ 10^3 ng/l-Air 程度の極微量物質を ICP-MS、GC-MS 等を用いて分析し、汚染の少ないクリーンルーム構成部材のデータベースをまとめるとともに、ケミカルフィルタによる除去が汚染防止に有効なことを示し、汚染防止につながるケミカルフィルタ配置を提案した。

第3章 ファンフィルタユニットによる局所清浄化

本章では、ファンフィルタユニット直下の気流・塵埃挙動を詳細に評価し、ファンフィルタユニット低減方法及び清浄域拡大方法など、コスト低減と省エネルギーを同時に達成する局所清浄化技術について検討した。

設計クラス 1000~10000 のコンベンショナル型クリーンルーム内に、 $3\times 3\times 2.8$ m のファンフィルタユニット実験装置を設置し、パーティクルカウンタと超音波三次元風速計を用いて、ファンフィルタユニット単体が形成する気流性状と塵埃濃度分布の詳細検討及びファンフィルタユニットを 2 台運転した際の清浄域に及ぼすファンフィルタユニット間隔の影響を検討した。吹出し風速を変化させた場合の各々の定量的データを得るとともに、気流可視化による気流塵埃挙動の解明を行い、フィルタ直下の気流の巻込みによりウェーハ移載領域でウェーハ汚染が生じる可能性があり、局所清浄化のためにはこの巻込みを防止することが重要であることを明らかにした。次に、省エネルギー化、低コスト化のためのファンフィルタユニットによる清浄域拡大方法として、吊り下げパーティション、いわゆるアイリッドを用いた方式とパンチング板を加工した拡散吹出し方式について、その効果を実験的に検討した。その結果、ファンフィルタユニットによる清浄域拡大方法としてアイリッド方式の有効性を把握することができ、本実験条件下では FFU 間隔 0.3m で 0.5m 以上、FFU 間隔 0.6m で 1m 以上のアイリッド長さが有効であることを明らかにした。また、拡散吹出し方式のうちルーバ付パンチング型吹出し口は吹出部に気流の滞留域が生じ、ルーバからの高速気流によって巻込まれた塵埃が残るため、局所清浄化方法としては望ましくないこと、全面パンチング型吹出し口は、清浄空気を分散してゆっくりと吹出すため、気流の巻込みが少なく、ファンフィルタユニット単体の清浄域を拡大するには、有効な方法であることを示した。

第4章 局所清浄化の気流・塵埃解析

本章では、クリーンルームの気流・塵埃挙動を解明するためのシミュレーションについて検討した。

まず、従来広く用いられている $k-\epsilon$ 方程式モデルによる解析について検討し、時間平均モデルである $k-\epsilon$ 方程式モデルによるシミュレーションは、コンベンショナル型クリーンルーム (7.3×6.8×2.8m) の気流及び塵埃分布の測定結果とも比較的良く一致し、クリーンルーム全体の気流・塵埃挙動の把握には有効であることを示した。

次に、クリーンルームの分野ではほとんど取り上げられていない LES (Large Eddy Simulation) について $k-\epsilon$ 方程式モデルとの比較、実験との比較を行った。その結果、ファンフィルタユニットによる局所清浄化の解析には等方性乱流モデルである $k-\epsilon$ 方程式モデルでは塵埃の巻き込み現象などが計算できず不十分であること、この局所清浄化の解析には格子平均モデルである LES (Smagorinsky subgrid model) が可視化実験による気流・塵埃の巻き込み現象、ファンフィルタユニット下の非対称的な乱れの現象を良く再現していることを示した。また、定量的にも第 3 章の実験値と比較的良く一致することを示した。更に、アイリッドの効果を LES によりシミュレーションした結果、可視化実験とも良く一致することを確認している。なお、Smagorinsky 定数は 0.09~0.2 の間で種々計算させた結果、0.12が実験と良く一致したのでこの値を用いている。以上のように LES が次世代クリーンルームに必要な局所清浄化技術に対し、有力な設計手法であることを示している。

第5章 局所清浄化時の移動体廻りの気流・塵埃挙動

本章では、局所清浄化時の無人搬送車 (AGV) 走行による塵埃汚染防止を目的に、走行による気流の変化及び局所清浄時の塵埃拡散への影響について、実験及び解析の両面から検討を行い、塵埃拡散を低減するファンフィルタユニット配置を検討した。

まず、可視化実験により、AGV が走行 (移動速度 0.5m/s) した時に、本体後方の空気を誘引すること、停止した時には誘引空気が慣性により移動して AGV の後面に衝突し、AGV 本体上部に巻き上がり、高さ方向は AGV 上面から約 200mm、水平方向は約 1000mm に達することを明らかにした。次に、塵埃拡散を低減するファンフィルタユニット配置を検討し、ウェーハ付着塵埃数の測定から、ファンフィルタユニットを 6 台運転すればウェーハを扱うロード・アンロード領域 (高さ: 900mm、1200×600mm) でのウェーハ汚染を防止し、ウェーハ付着塵埃数比を 1/1000 程度にすることが可能であることを明らかにした。

また、従来ほとんど行われていなかった $k-\epsilon$ 移動体モデル (解析領域を固定メッシュ部分とスライディングメッシュ部分にわけ、スライディングメッシュ部分を実際に移動させながら計算する手法) による非定常解析により、無人搬送車廻りの気流・塵埃挙動の解析を行った。計算は実験による無人搬送車後方の気流塵埃の誘引などの挙動を良く再現していることを示し、 $k-\epsilon$ 移動体モデルにより AGV 廻りの気流・塵埃挙動を解析可能にした。本章では以上のように局所清浄化時の無人搬送車 (AGV) 走行による気流・塵埃挙動を解明し、ウェーハを扱うロード・アンロード領域でのウェーハ汚染を防止可能なファンフィルタユニットの運転台数について有用な知見を得ることができた。

第6章 結論

本章は本論文の総括であり、本研究で得られた結論を示した。

審査結果の要旨

半導体産業の中長期的動向は現在の 64Mbit DRAM から、2000 年には 256Mbit の量産化が見込まれ、300mm ウェーハ時代となることが予想される。このような半導体の高集積化に対応するため、半導体製造用の空調空間（クリーンルーム）も徐々に高潔浄度が要求され、粒子状物質だけにとどまらず、化学汚染物質までもが製品の歩留まりや信頼性に影響を与えるようになってきた。また、コスト的にも従来の部屋全体を高潔浄空間にするクリーンルームでは限度があり、必要な箇所のみを必要な潔浄度に保つ局所清浄化技術が必要になってきている。著者は、このような背景に基づき、次世代クリーンルームのクリーン化技術に関して化学汚染防止及び局所清浄化技術の開発を目的とし、各種実験及び解析を行った。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は、緒言であり、研究の背景、目的及び既往の研究についてまとめた。

第 2 章では、クリーンルーム内化学汚染源の把握と防止対策について検討している。実クリーンルームで問題とされたボロン、リン及び今後大きな問題となると言われる揮発性有機化合物の発生量を定量的に評価し、汚染の少ないクリーンルーム構成部材のデータベースを纏めた。また、吸着材を用いたケミカルフィルタが汚染防止に有効であることを示し、各種フィルタの除去率、寿命を評価した。これらにより、半導体歩留まり向上の一方策としての有用なデータを提供している。

第 3 章では、ファンフィルタユニットによる局所清浄化技術について検討し、ファンフィルタユニット下の気流・塵埃挙動を解明し、直下の巻き込み防止が局所清浄化のために重要であることを明らかにした。また、省エネ、低コスト化のためのファンフィルタユニット清浄域拡大方法として、アイリッド（吊り下げパーティション）方式及び拡散吹出し方式について実験し、その効果を定量的に示している。

第 4 章では、クリーンルームの気流・塵埃挙動を解明するためのシミュレーションについて検討している。時間平均モデル ($k-\epsilon$ 2 方程式モデル) と格子平均モデル (LES モデル) との比較、実験との比較を行い、 $k-\epsilon$ モデルがクリーンルーム全体の解析に有効であることを示した。また、局所清浄化の解析には $k-\epsilon$ モデルでは不十分であり、LES が有効なことを示し、局所清浄化に必要な計算手法を確立している。

第 5 章では、無人搬送車 (AGV) 走行による影響を気流・塵埃拡散の点から検討し、AGV 走行による後方空気の誘引が塵埃汚染につながることを明らかにした。また、AGV 走行・停止時に汚染を防止するためのファンフィルタユニット運転台数について有用な知見を得るとともに、 $k-\epsilon$ 移動体モデルにより AGV 廻りの気流・塵埃挙動の解析を可能にしている。

以上要するに本論文は、次世代クリーンルームのクリーン化技術について、上記のような各種実験及び解析を行い、半導体歩留まり向上に貢献するとともに、低コスト、省エネルギーにつながるいくつかの有用な知見を得ることができたものであり、半導体産業並びに化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。