

氏 名	いち じょう かず お 一 条 和 夫
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成9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) 電子工学専攻
学位論文題目	半導体製造装置におけるパーティクル計測
指 導 教 官	東北大学教授 坪内 和夫
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 大野 英男 東北大学助教授 益 一哉

論 文 内 容 要 旨

第1章 序 論

半導体の極微細加工プロセスによる高集積化、高速化はコンピュータや通信機器の性能を飛躍的に向上させることが可能となり科学、文化、医療の発達をはじめ我々の生活に多大な貢献をしている。半導体を研究、開発、製造する上で空気、液体、ガス中のパーティクルコンタミネーションはその性能、信頼性、歩留まりに大きな影響を与える。半導体製造装置の稼働率は点検、故障、待ち時間のため60%程度であると報告されている例がある。その中で点検の内容はほとんどが粒子汚染対策である。現在の半導体デバイスのデザインルールは約 $0.35\mu\text{m}$ 、2006年には $0.1\mu\text{m}$ になると予測される。将来において半導体の生産性と信頼性を維持、向上させるためにはさらに微細な粒子の計測と制御を行う必要がある。また、フラットパネルディスプレイなどのジャイアント・マイクロエレクトロニクス・プロセスにおいても、数10cm角の基板上の僅かのパーティクルによってディスプレイが不良となり、プロセスにおける粒子計測、管理は非常に重要な課題である。本研究の目的は、半導体の研究、生産において信頼性や生産性の向上、さらに半導体を生産する上でのエネルギー資源の効率化に寄与するため、空気、液体、ガス中の粒子を正確に計測、評価することのできるパーティクルカウンターを研究、開発することである。また将来のさらなる極微細加工プロセスでの粒子計測に寄与するため、より微小な粒子が検出可能な光散乱式パーティクルカウンターの開発とその検出限界要因について研究することである。

第2章 光散乱式パーティクルカウンターの測定原理

Mie、Rayleigh の散乱理論を基に、光の電界振動面と粒子からの散乱光を計算し、散乱光強度分布を算出した。また、従来ランプを光源とした光散乱式パーティクルカウンターの検出限界は $0.3\mu\text{m}$ であった。光源の波長スペクトル分布および光電変換素子の波長感度特性を考慮すると、粒子検出に有効な光エネルギーはランプへの投入エネルギーのわずか 0.045% である。さらに検出限界を向上させるにはランプ光源では非常に困難であることを明確にした。

第3章 空気用パーティクルカウンター

半導体の微細加工プロセス技術の進歩に伴い、管理対象粒径が $0.3\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ へと移行してきた。本章では前章の検討結果をもとに、空気中における $0.1\mu\text{m}$ 粒子の検出について述べている。 $0.1\mu\text{m}$ 粒子からの散乱光は $0.3\mu\text{m}$ 粒子からの散乱光と比較して約 330 分の 1 となる。光源をランプからレーザーとし、かつ共振内部光に粒子を通過させることにより散乱光強度を約 100 倍向上させた。

Rayleigh の散乱理論による粒子からの散乱光強度分布を考慮し、レーザー光の偏光面と集光系である楕円ミラーの位置関係を最適にし、従来のレンズによる集光系と比較して約 10 倍集光立体角を向上させた。その結果 $0.1\mu\text{m}$ 粒子を毎分 300mL の高流量で計測可能となった。

受光素子には常時空気分子からの散乱光が入射している。それを基準光源とするキャリブレーション系を考案した。その結果、レーザー光出力の変動や受光素子の感度変化が生じていても自動的に正確な粒径感度を維持することを可能とした。

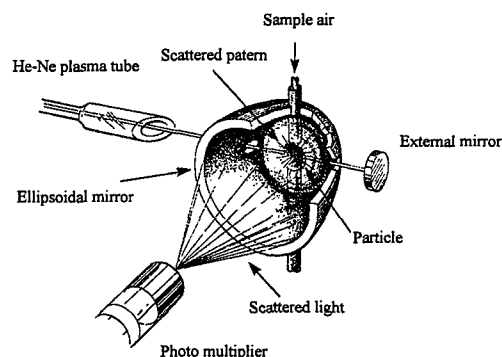


図1. $0.1\mu\text{m}$ レーザパーティクルカウンター

第4章 液体用パーティクルカウンター

本章は $0.3\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ の液体用パーティクルカウンターについて、さらに $0.1\mu\text{m}$ 高検出率パーティクルカウンターについて述べている。従来の液体用パーティクルカウンターの検出限界は $0.5\mu\text{m}$ であった。原因はフローセル壁面からの散乱光が粒子からの散乱光を阻害しているためである。この問題を解決するため、フローセルにレーザービームを斜めに入射させる光学系を考案した。その結果 $0.3\mu\text{m}$ 粒子の検出を可能とした。

光源を高出力半導体レーザーとし、フローセルに光学的に最適形状のシリンジカルサファイアセルを用いることにより、フッ酸中の $0.2\mu\text{m}$ 粒子を検出可能とした。従来、 $0.1\mu\text{m}$ 検出可能な液体用パーティクルカウンターはレーザー光を細く絞り粒径感度を向上させてい

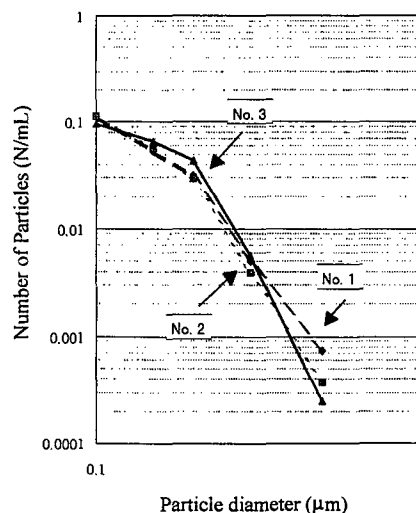


図2. 高検出率パーティクルカウンター3台による超純水中粒子の比較測定

るため検出率が低く、清浄度が高い試料の評価に問題があった。フローセルにミラーを装着し散乱光の集光立体角を向上し、流路部形状をレーザ光形状とほぼ一致させることにより高検出率で0.1 μm 粒子の検出を可能とした。その結果、超純水など清浄度が高い試料においても正確な粒子計測が可能となった。

第5章 ガス用パーティクルカウンター

半導体プロセスに用いる反応性ガス中の粒子の粒子計測および減圧下からののは不可能であった。本章では反応性ガス中の粒子計測を可能とするため、極低リーク量、微小なデッドボリュームのフローセル型パーティクルカウンターを初めて開発し、CVD装置内からの粒子計測とシランガス中の粒子計測をおこなった。発塵対策をしていないゲートバルブではその動作に起因して粒子が発生することが確認できた。シランガスは水分や酸素と反応して粒子が生成されること、さらに生成された粒子は時間とともに成長することが確認できた。

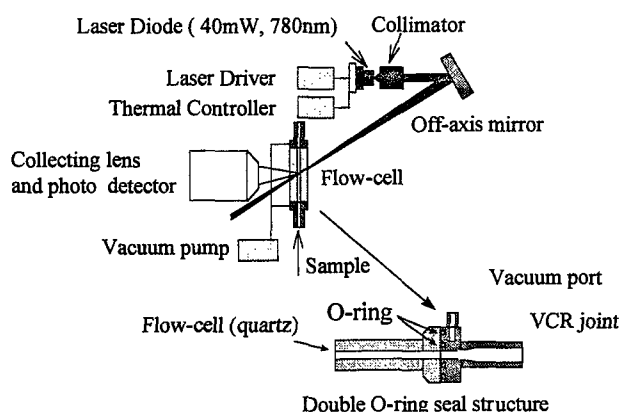


図3. ガス用パーティクルカウンター

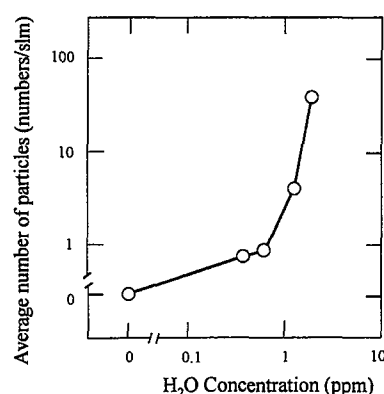


図4. シランガスへの水分添加量と粒子濃度
H₂O concentration vs. number of induced particles larger than 0.25 μm .

第6章 粒子計測における今後の課題

光の波長より十分小さな粒子からの散乱光強度は粒径の6乗に比例する。液体用やガス用パーティクルカウンターのようにフローセルを用いたものでは、レーザ共振内部に粒子を導入することが困難である。検出粒径感度を上げるためレーザビームを絞る方法がとられている場合がある。この場合の問題点はフローセル内を通過する試料の極一部しか粒子を検出していないことである。特に清浄度が高い試料においては粒子濃度の評価が困難となる。パーティクルカウンターの粒子の検出確率はポアソン分布に従うと仮定することにより、統計的に真の粒子濃度を求める方法を確立した。この方法により従来問題であった高清浄度域においても正確な粒子濃度の評価が可能となった。また、検出率の重要性を示唆した。

本研究で開発したパーティクルカウンターの粒径検出限界について検討を行った。開発した0.1 μm 検出のパーティクルカウンターを基に粒子の散乱光エネルギーと受光素子並びに増幅器のノイズエネルギーとの比を求め、理論値と実験値が一致することを明らかにした。ノイズ信号及び粒子信号の周波数スペクトル解析を行い、増幅器の低域及び高域の信号通過帯域を最適化することによりS/N比改善が可

能であることを示した。さらに将来の極微細加工プロセスでの粒子管理に対応するため、より微小な粒子検出の可能性について検討した。その結果、レーザの短波長化、出力向上及び電子回路系の S/N 向上によって、高検出率 $0.04\mu\text{m}$ の粒子が検出可能であることを示した。

第7章 結 論

半導体の高集積化、高速化の成否は極微細加工技術に強く依存している。これら極微細加工技術を支えるものとして、クリーン化技術は重要な要素である。クリーン化の対象として、クリーンルームなど半導体製造環境や超純水、また製造装置や薬液、流体システムなどがある。

本研究ではこれら半導体製造におけるクリーンルーム等の環境、薬液、製造装置におけるパーティクル計測を行うため、空気用パーティクルカウンター、液体用パーティクルカウンター、ガス用パーティクルカウンターの開発及び計測を行った。また高清浄度域における粒子濃度の評価方法を確立した。さらに今後の極微細加工プロセスでの粒子計測に対応するため検出限界について検討した。

審査結果の要旨

集積回路製造プロセスにおいて、クリーンルーム環境をはじめ、製造装置、純水、薬品、プロセスガス中に含まれる微量かつ微小なパーティクルは、集積回路の性能や歩留まりを低下させる直接の原因となることから、その粒径ならびに数を正確に計測評価することが必須である。本論文は、気体中及び液体中における粒径 $0.1\mu\text{m}$ のパーティクルを高い検出率で計測する技術を確立して装置化し、その検出装置を用いて、従来は計測がまったく不可能であったパーティクルが非常に少ない高洗浄度領域においても、十分信頼性の高いパーティクル計測が可能なることを実証した成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。第2章は、Mie 及び Rayleigh の光散乱理論について述べている。

第3章では、レーザ共振器内部に流路をもつ空気用パーティクル計測技術について、入射レーザ光の偏光方向と検出光学系の検討を行い、特に楕円ミラー集光系を新たに考案し、 $0.1\mu\text{m}$ パーティクルをほぼ 100%の検出率で計測可能な装置を実用化した結果について述べている。

第4章では、液体中パーティクル計測について、被測定流体の通過するフローセルに微小反射ミラーならびに集光レンズ光学系を付加した高効率集光系を考案し、純水をはじめフッ酸などの薬品中の $0.1\mu\text{m}$ パーティクルを 70%以上の高検出率で計測可能としたことについて述べている。世界最高性能を有する高検出率 $0.1\mu\text{m}$ 液体中パーティクル計測装置として完成させている点は極めて高く評価できる。

第5章では、リークタイト・フローセルを考案し、減圧環境下、あるいは特殊ガス中のパーティクル計測可能な技術を開発した結果について述べている。従来計測不可能であったシランガスについて、シランガスが残留微量水分や酸素と反応して、パーティクルが生成されることを定量的にはじめて明らかにした。これは優れた成果である。

第6章では、パーティクル濃度が非常に低い場合、計測数の評価には統計的管理手法が必要であることを指摘し、正確なパーティクル数評価には高検出率パーティクル計測装置が必須であることを明らかにしている。さらに、青色半導体レーザを利用し、検出電子回路系の S/N 比を向上することによって、 $0.04\mu\text{m}$ パーティクルを高検出率で計測可能であることを示し、今後のパーティクル計測技術の研究開発指針を明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、空気、純水、薬品、プロセスガス、製造装置内の微小パーティクルの高検出率計測技術および装置を開発、実用化し、粒径 $0.1\mu\text{m}$ の微小パーティクル計測技術として完成させたもので、半導体電子工学、集積回路プロセス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。