

審査の結果の要旨

氏名 柳澤 道彦

近年の ULSI(超大規模集積回路)の高集積化により、露光光学系の開口数が上がり、焦点深度が浅くなったため、シリコン(Si)ウェーハには極めて高い平坦性が要求されている。Si ウェーハの平坦化技術は古くからパッドとスラリーを用いた砥粒加工技術、即ち化学的機械研磨技術が用いられており、現技術では要求に対応することは難しくなっている。本論分は現状を克服するため、フッ素原子を局所化し、その照射をウェーハの凹凸形状に応じて数値制御走査する新しい形状創成技術である「数値制御局所ドライエッチング(NC-LDE)技術」についての研究を行い、それをまとめたものであり、6章からなる。

第1章では序論として、研究の背景と目的が述べられている。まず ULSI に求められる次世代 Si ウェーハに関してその要求特性について説明され、また従来の研磨加工以外の新しい形状創成方法であるドライエッチングを利用した高精度加工技術として 1990 年代に米国で開発された PACE(プラズマ支援化学エッチング)技術、及び大阪大学の森教授らによって開発されたプラズマ CVM(化学気化加工)についてその概要を述べ、現状について説明している。

第2章では、大口径 Si ウェーハの平坦化に必須である Si の高速エッチング方法、及び数値制御加工に必要不可欠なエッチング領域の局所化技術についての検討について述べられている。高純度アルミナ管中で SF_6/H_2 ガスのマイクロ波プラズマを生成し、この下流域において Si を $130 \mu\text{m}/\text{min}$ という高速エッチングを達成している。また局所限定性についても差動排気構造、及びエッチング部近傍のガス圧力平衡状態を調査することで約 $40 \text{ mm}\phi$ の領域限定性を実現している。この局所エッチングの走査速度の逆数と、エッチング深さの間に精密な比例関係があることが見いだされ、これにより走査速度によってエッチング深さを精密に制御できる数値制御加工が可能であることが示されている。実際にこのような高精度数値加工技術を 300 mm 径の Si ウェーハ平坦化に応用した結果、グローバルフラットネスでは $0.860 \mu\text{m}$ から $0.101 \mu\text{m}$ へと格段に改善され、サイトフラットネスに関しても $0.12 \mu\text{m}$ から $0.04 \mu\text{m}$ へと従来の砥粒加工技術では全く実現不可能なレベルの平坦化が実現していることが報告されている。平坦化後の表面についても評価され、マイクロラフネス R_a は、ウェーハ全面を $1 \mu\text{m}$ エッチングした場合に $9.6 \times 10^{-2} \text{ nm}$ から $6.9 \times 10^{-2} \text{ nm}$ と改善されることが示されている。結晶へのダメージについても複数の評価がなされており、GOI(Gate Oxide Integrity)評価において平均破壊電圧 E_{BD} が $8.56 \text{ MV}/\text{cm}$ から $9.43 \text{ MV}/\text{cm}$ へと向上していることが示されている。これらの評価結果から産業的にも十分適用可能な技術であることが示されている。

第3章では、 SF_6 局所化ダウンストリームプラズマで走査エッチングしたときに Si 表面に生じる白濁現象について説明され、水素を添加したときになぜこの現象が解決したか、また白濁現象がなぜ生じるかについてその発現モデルについての研究結果が述べられている。まず放電管材質や添加ガスを変えたときの SF_6 ダウンストリームプラズマの気相状態を赤外吸収スペクトルによって調べ、石英放電管を使用した場合と、アルミナ放電管を使

用して酸素添加を行った場合にのみ気相の活性種として SOF_2 および OF_2 が含まれることを確認し、特に石英放電管では管壁のエッチング生成物である SiF_4 が生成しており 13% の分圧を占めていることを確認している。更にエッチング時の Si 表面を in-situ IR-RAS により評価し 5% 酸素添加時に生じる 1150 cm^{-1} から 1250 cm^{-1} のブロードな Si-O 吸収が 5% 水素添加では現れないことを確認している。気相状態はその質量スペクトルも評価されており、水素添加によって除去されているのが酸素分子ではなく酸素原子であることが確認されている。次にエッチング後の Si 表面状態を XPS(X 線光電子分光)によって調べ、局所エッチングの周囲には円環状に SiO_xF_y 膜が堆積していることを見出した。前述の気相状態評価結果と合わせて、この堆積膜は、ダウンストリームプラズマ中に含まれる微量の酸素と、Si のエッチング生成物である SiF_4 の反応により生じているというモデルの妥当性を確認している。また水素添加の効果は、この微量の酸素を除去することにより堆積膜の生成を防いでいることによるものであることを明らかにしている。

第 4 章では、数年前に発見された、Si ウェーハ形状に関する新しい不良要因である Nanotopography についてその背景を説明し、NC-LDE をこの Nanotopography 改善に応用するための検討について述べられている。実際にマイケルソン干渉計からの形状データを用いウェーハ上の Nanotopography を世界で初めて改善に成功したことが示されている。

第 5 章においては、様々な分野において高精度な形状創成技術がどのような背景で近年その要求が高まってきたかについて述べ、NC-LDE の適用可能性について説明されている。さらに SOI と SiO_2 (フォトマスク)の平坦化加工についての応用について述べられており、同様の高い平坦性が実現できていることが報告されている。

第 6 章では、本論文の総括を行い、NC-LDE 技術の今後の展望について述べている。

以上要するに、 SF_6/H_2 ダウンストリームプラズマによる Si 高速エッチングの追及と局所エッチング中の Si 表面反応についての詳細な解析により、数値制御局所ドライ平坦化エッチング技術を確立し、その産業的な実用価値を明らかにしている。本研究で得られた技術は今後の半導体材料の超高精度平坦化加工の重要な技術として期待され、マテリアル工学の発展に大きな貢献を果たしたものと考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。