

## 論文の内容の要旨

論文題目 半導体微細加工プロセスにおける層間絶縁膜エッチング技術に関する研究

氏名 中川 秀夫

半導体デバイスの多層配線を形成する上で、第1層目の配線と基板及びゲートなどの電極への接続を目的とするコンタクトホールのエッチングは極めて重要な技術である。しかしながら、半導体デバイスの微細化に伴いコンタクトホールの高アスペクト比化が急激に加速してきたため、コンタクトホールエッチングにおいて垂直断面形状、対下地 Si 高選択比、低 RIE-lag\*という特性を同時実現するのは非常に困難になってきた。また、エッチングによるレジストパタンからの寸法変換差が製造上の大きな問題となってきている。このエッチングによる寸法の制御は、まさしくエッチング形状の制御に他ならない。ドライエッチングは、イオンとラジカルの競合反応として取り扱うことができ、イオンがエッチング反応の駆動力となっている。しかしながら、垂直断面形状、対下地 Si 高選択比及び低 RIE-lag という特性を実現するためには、イオンよりもラジカルの役割の方が大きい。

本研究では、この点に着目して高アスペクト比コンタクトホール (HARC) エッチングにおいて、高アスペクト比 HARC パタン内部へのラジカルの供給と、その素となる気相中のラジカル生成に焦点を絞って研究を遂行した。層間絶縁膜材料は、 $\text{SiO}_2$  を主骨格とする膜と有機膜に大別できる。本研究ではその両方について高性能な HARC エッチングの実現を目指した。

本論文のテーマは大きく4つあり、それぞれの要旨を以下に述べる。

---

\* RIE-lag[11]とは、パタンのアスペクト比の増大に伴ってエッチレートが低下する現象を言う。逆に、パタンのアスペクト比の増大に伴ってエッチレートが増大する現象を逆 RIE-lag と言う。

### 1. 高アスペクト比3次元構造表面観察のための高解像度 SEM の研究開発

HARC エッチング技術開発を加速し、量産性の高いエッチング技術を提供するために、従来不可能であった高アスペクト比構造パターン底部の観察を可能にし、エッチング時の寸法制御を定量化可能な走査型電子顕微鏡 (SEM) を開発した。イメージンタイプ対物レンズを新規に設計開発してウエハ表面に強い軸方向磁場 ( $> 0.17\text{T}$ ) を印加可能な構成を実現し (図 1)、高アスペクト比微細構造パターン底部から放出される 2 次電子の収集効率を飛躍的に向上できることを実証した。新開発の SEM は、約  $2.5\text{ mm}$  という非常に短い焦点距離持ち、 $0.7\text{kV}$  の 1 次電子加速電圧で  $30\text{ \AA}$  の解像度を実現した。アスペクト比 10 のトレンチ底部にある  $0.55\text{ }\mu\text{m}$  L&S (line and space) の  $\text{SiO}_2$  パタンの測定において、 $5\text{nm}/3\sigma$  ( $\sigma$ : standard deviation) の良好な測定再現性が達成された。実際の 64MDRAM ( $0.35\text{ }\mu\text{m}$ ) 及び 256MDRAM ( $0.25\text{ }\mu\text{m}$ ) のプロセス開発への適用を通じて、本研究の主目的である HARC エッチングの研究における寸法の制御、すなわち、エッチングパターン形状制御の重要性が明確になった。

### 2. $\text{SiO}_2$ 膜の高アスペクト比コンタクトホール (HARC) エッチング

ワイドギャップ平行平板型反応性イオンエッチング (ワイド RIE) 装置を用いて、垂直断面形状、対下地 Si 高選択比、低 RIE-lag 及び高速エッチングのすべてを満たすドライエッチング技術を実現するために、高アスペクト比微細構造中のラジカル輸送に関する研究を実験とシミュレーションの両面から行った。HARC パターン内部壁に対する CF 系ラジカルの吸着率が処理中のウエハ温度を変えることにより制御できることを見出し (図 2)、ウエハ温度を最適化 ( $\sim 83^\circ\text{C}$ ) して、CF 系ラジカルの吸着率 (すべてのラジカルの加重平均値) をおよそ 0.05 程度に低下させることにより、パターン底部に十分な量のラジカルを供給できることを明らかにした (図 3)。その結果、 $\text{CHF}_3/\text{CO}$  プラズマを用いてアスペクト比 4 を超える  $0.35\text{ }\mu\text{m}$  HARC エッチングにおいて垂直断面形状、対下地 Si 高選択比 (69:ホール底部/97:スクライブライン)、低 RIE-lag (93%)、高速エッチング (従来の 3 倍) を同時実現した。

### 3. 誘導結合プラズマ (ICP) におけるラジカル生成

量産性の向上を目指し、さらに高速のエッチングを実現するために高密度プラズマを生成可能な ICP において、プラズマの励起機構と CF、 $\text{CF}_2$  ラジカルの生成機構との関連性を空間的に捉えて研究を遂行した。ICP における励起周波数の効果を調べるために、VHF-ICP (100 MHz) と RF-ICP (13.56 MHz) においてラングミュアプローブにより Ar プラズマの電子密度とラジカル密度 (図 4)、レーザ誘起蛍光 (LIF) と出現電位質量分析法 (AMS) を組み合わせにより  $\text{CHF}_3/\text{Ar}$  プラズマ中の CF、 $\text{CF}_2$  ラジカル密度を円筒形反応室内の径方向分布として計測し、ICP パワー依存性を評価した。RF-ICP では ICP コイル直下で誘導結合が効率よく生じ、電極直下に集中したプラズマが形成され、CF、 $\text{CF}_2$  ラジカルが中心部で少なく反応室側壁部で多い中空状のラジカル分布となった。(図 5 (a))。一方、VHF-ICP では誘導電界による誘導結合に加え、低密度プラズマ空間を伝搬する電波により生じる表面波励起の様なプラズマ励起機構が存在していることが明らかになった。そのため比較的低パワーの  $1\text{kW}$  近傍でプラ

ズマ反応室全体に亘ってほぼ一様なプラズマが生成され、ラジカル密度分布もほぼ一様になった（図 5 (b)）。RF-ICP の中空状ラジカル分布は電子密度分布の影響（中心部でのラジカルの過剰解離）だけではなく、むしろ壁からの CF、CF<sub>2</sub> ラジカルの生成の影響を大きく受けていると推定した。そこでプラズマと壁との相互作用を調べるためにウエハ近傍の軸方向ラジカル分布計測を行った結果、CF、CF<sub>2</sub> ラジカルは共にバイアスの印加の有無に拘わらずウエハ表面から生成されており、ウエハ表面近傍のラジカル密度は気相中の密度の少なくとも 2 倍以上になっていることが確認された。

#### 4. 低圧高密度プラズマ（磁気中性線プラズマ：NLD）による高性能有機 low-k 膜エッチング

有機 low-k 膜(FLARE)エッチングにおいても、SiO<sub>2</sub> 膜の HARC エッチングの様なラジカルによる堆積膜（側壁保護膜、表面反応層）を伴うエッチングシステムを構築することが重要であると考え、高アスペクト比微細構造中に供給するラジカル成分の生成をガスケミストリの設計から取り組んだ。パターン側壁及び底部にコンフォーマルに CH 膜を形成可能することを目的に、添加ガスとして CH<sub>x</sub> (x = 1,2,3) フラグメントを容易に発生可能で H/C 比が最も大きいメタン CH<sub>4</sub> (H/C 比：4) を選び、CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> プラズマにより、垂直形状でマイクロレンチ及び RIE-lag の無い有機 low-k 膜の HARC エッチングを実証した。しかし、順テーパ形状が容易に実現できないことと、期待した堆積膜はパターン内部だけでなくウエハ表面にも過剰に形成されることが課題として残った。CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> ガスケミストリの利点を備え、CH<sub>4</sub> ラジカルを生成せず、CH<sub>x</sub> ラジカルの生成も抑制できるガスをさらに探索した。メチル基 (CH<sub>3</sub>-) と窒素を含む一分子からなるガスが最適であると考え、C、H 及び N からなる分子の最小分子であるメチルアミン(CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>)を見つけ出した。CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> プラズマにより順テーパ形状でマイクロレンチがなく（図 6）、逆 RIE-lag 特性（図 7）を有する 0.17 μm レベルの高性能高アスペクト比パターン（ホール/レンチ）エッチングを達成し、有機 low-k 膜エッチング技術を大きく進展させた。XPS による堆積膜評価から、有機 low-k 膜のエッチングでは SiO<sub>2</sub> 膜のエッチングにおける CF 膜の役割を CN 膜が担っていることを明確化し、ガスケミストリに拘わらず Si 基板表面に形成された堆積膜の C/N 比が約 2 ~ 3 となることが良好なエッチング特性が得られるための必要条件であることを明らかにした。一方、四重極質量分析器 (QMS) によるプラズマ中のラジカルとイオンの計測から、CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> を含むプラズマでは CN 結合を含む CNH<sub>x</sub> (x = 1, 2, 3 & 4) 分子をラジカルとしてだけでなくイオンの形でホール底部に供給可能なガスケミストリが、堆積膜を伴う有機膜のエッチングに適していること明確化した。

以上、総括すると、本研究では層間絶縁膜の 2 大構成要素である SiO<sub>2</sub> 膜と有機膜の両方の膜に対して、ラジカルの供給制御という観点から堆積膜を伴うエッチングシステムを確立するための手段を提供し、高性能 HARC エッチングを実現した。また、高アスペクト比微細加工中の堆積膜を制御する上で、吸着率制御、プラズマ中のラジカル生成制御、ラジカル源となるガスケミストリ設計の重要性を明らかにし、学術的にも実用的にも層間絶縁膜の HARC エッチングの進展に寄与した。

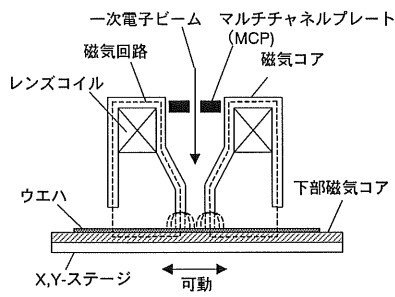


図1 新SEMの対物レンズの概略説明図

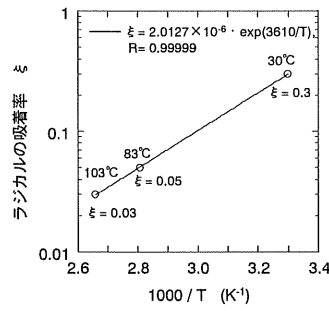


図2 ラジカルの吸着率ξのウエハ温度T依存性

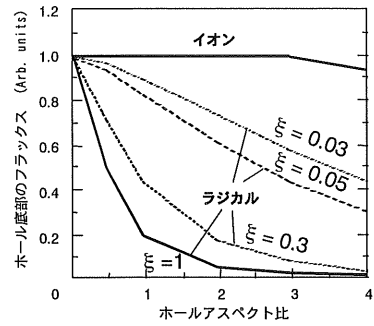


図3 ホール底部に供給されるイオンフラックスとラジカルフラックスのホールアスペクト比依存性に関するシミュレーション結果

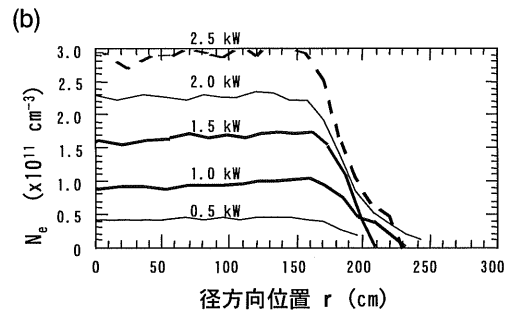
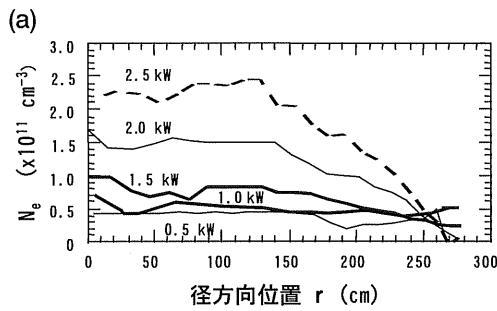


図4 ICPパワー0.5、1.0、1.5、2.0及び2.5の場合のArプラズマにおける電子密度の径方向分布 (a) VHF-ICP (100MHz)、RF-ICP (13.56MHz) [Ar = 400 sccm、3 Pa、ノーバイアス]

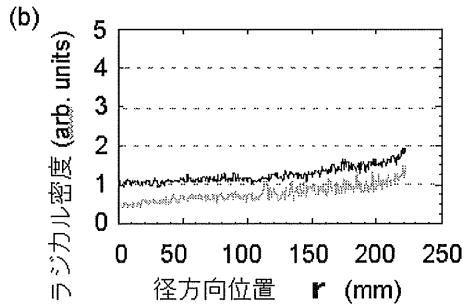
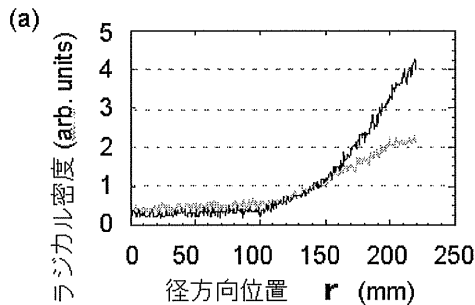


図5 RF-ICPにおいてICPパワーが1 kWのときのCF、CF₂ラジカルの径方向密度分布と、VHF-ICPにおいてICPパワーが(e) 200 W、(f) 600 W及び(g) 1 kWのときのCF、CF₂ラジカルの径方向密度分布 [CHF₃/Ar = 80/320 sccm、圧力3 Pa、ノーバイアス]

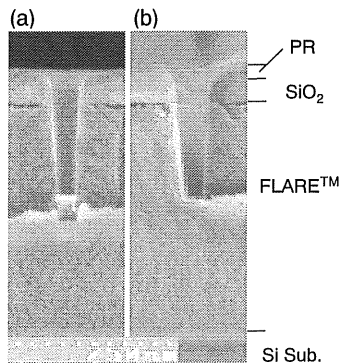


図6 CH₃NH₂/N₂プラズマによる0.17 μm高アスペクト比ホール(a)とトレンチ(b)のエッチング形状 [NLD; CH₃NH₂/N₂プラズマ = 90/10 sccm、0.4 Pa、ソースパワー: 1 kW、バイアスパワー: 200 W]

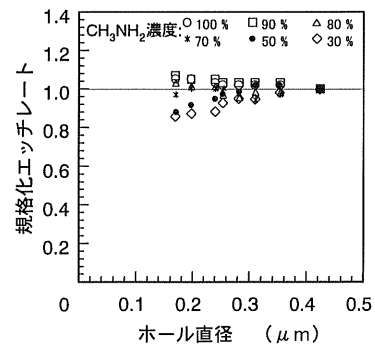


図7 CH₃NH₂濃度が30、50、70、80、90及び100%の場合におけるFLAREの規格化エッチレートのホール直径依存性 [総ガス流量: 100 sccm、圧力: 0.4 Pa、Pₛ = 1000 W、Pₑ = 200 W]