

2. プラズマエッチング装置技術開発の経緯，課題と展望

関根 誠

名古屋大学大学院工学研究科附属プラズマナノ工学研究センター

(原稿受付：2007年1月24日)

半導体デバイス製造におけるプラズマエッチング技術について、その発展の経緯を技術自体の基本的な要素を踏まえて概説する。また、現在使用されているフルオロカーボンプラズマを使った装置やプロセス技術の課題をあげ、今後の開発のポイントを考察する。

Keywords:

etching, etcher, fluorocarbon, semiconductor device process, reactive ion etching, surface reaction

2.1 はじめに

半導体デバイス生産のためのドライエッチング技術は、リソグラフィにより被加工膜の上に形成したフォトレジストパターンなどをマスクにして、反応性ガスのプラズマ[1-7]に晒すことにより、シリコン (Si) や金属、絶縁物材料に溝やホールのパターンを作製する手法である。溶液を使用する湿式 (ウェット) エッチングに対し、ガスやガスを放電で励起して発生した活性な原子・分子さらにイオンを利用する。特に反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE) が開発されてからは、リソグラフィとともに半導体デバイスの高集積化を牽引し、半導体デバイスの隆盛とともに発展した基盤技術である。デバイスの高集積化、高性能化、さらにコストパフォーマンスの追及には今後ともプラズマを利用したドライエッチング技術の開発が不可欠である。

本稿では、その発展の経緯を技術自体の基本的な要素を踏まえて概説する。また、現在使用されているフルオロカーボンプラズマを使った装置やプロセス技術の課題をあげ、今後取り組むべき技術開発の方向を提案する。

2.2 プラズマエッチング技術開発の経緯

2.2.1 プラズマエッチングの黎明

トランジスタの発明[8,9]から、素子をウェハ上に多数形成する集積回路が1950年代末に発明され、その製造方法としてプレーナ技術[10]が提案された。これはシリコン酸化膜 (SiO₂) をマスクとして、シリコン中に不純物を拡散する工程を繰り返すことにより半導体集積回路を作る方法である。さらに、トランジスタ素子を絶縁膜で被い、その上に Al 等の金属パターンを形成して配線とする構造が開発された[11]。これらの基本技術によってウェハ上への素子の集積化が実現し、微細化による高性能化が可能となった。しかし、当時はウェットエッチングが使われ、図1 (a) に示すように、薬液の回り込みによりアンダーカットが発生

生し、2~3 μm レベルのパターン寸法しか実現できなかった。

一方、ドライプロセスの開発は、酸素プラズマによるフォトレジスト膜のアッシング技術[12]から始まる。プラズマで活性化した酸素原子とレジストの有機材料が反応して揮発性の高いガスとなり排気される。従来、強酸を使用したレジスト除去をドライで行うことが可能となった。さらに、ハロゲンガスのプラズマにより Si をエッチングする技術が提案された[13]。代表的なフルオロカーボンガスである CF₄ のプラズマで発生した反応性の高い F 原子 (F ラジカル) が Si と反応して蒸気圧の高い SiF₄ となり排気され、エッチングが可能となる。その後、CF₄ に O₂ を添加することで F 原子を大量に供給できることがわかり、

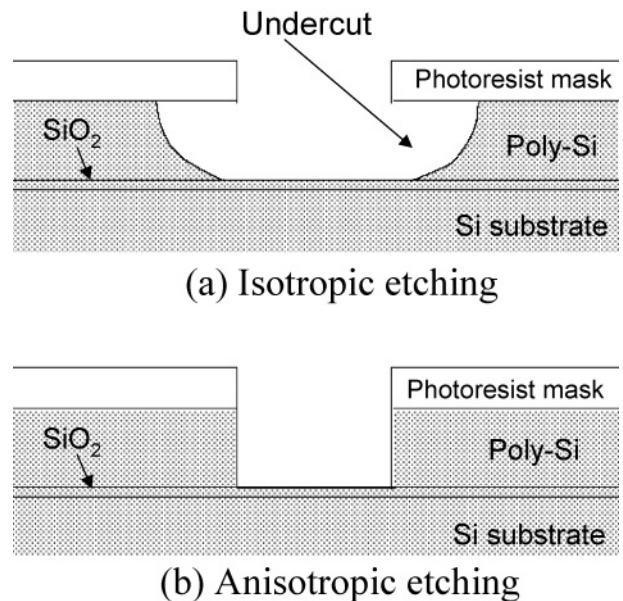


図1 エッチングした薄膜の断面形状の例、(a)等方性エッチング形状、(b)異方性エッチング形状。

Chemical Dry Etching (CDE) 技術[14]が発明された。拡散で供給される F 原子によるエッチングでは、ウェットプロセスと同様に等方的なエッチング形状となるが、薄膜の除去や表面処理などで現在も利用されている。

プラズマでの異方性加工が見出されたのは、高周波 (RF) 放電スパッタリングの研究において、RF を印加したカソード電極にイオンを加速する DC バイアスが発生することがわかってからである (図 2) [15]。さらに1970年代中期に平行平板型の電極間でフルオロカーボンガスを含むプラズマを発生させ、電極に載せたウェハ表面の加工が可能であること [1, 2] から、反応性イオンエッチング (RIE) が開発されるに至った [3, 4]。しかし、下地の Si に対する SiO₂ や Si₃N₄ 膜のエッチング速度比 (選択比) は低く、フルオロカーボンガスが SiO₂ や Si₃N₄ 膜のエッチングに本格的に使用されるようになったのは、CF₄ と H₂ の混合ガスにおいて H₂ 流量を増加させることで下地 Si に対して高い選択比 (～40) が得られることによる [5]。

図 3 に CF₄-H₂ 混合ガスを使用した RIE 装置において、H₂ 流量変化に対する SiO₂ と Si のエッチング速度の変化を示す。CF₄ だけでは選択比は小さい (SiO₂/Si～1.3) が、H₂ を加えると Si のエッチング速度が低下し選択比が向上する。H₂ の導入により気相の F 原子が HF の形で除去され、ラジカル種の平均の C/F 比が増加し、表面に CF_x の重合膜が形成されやすくなる。SiO₂ 表面ではエッチング反応に伴い酸素が供給されるため、重合膜は CO, CO₂ あるいは COF₂ 等の形で除去される。一方、Si 表面ではイオン衝撃によるエッチング反応以外に重合膜を除く過程はなく、イオンエネルギー等の条件を調整することで、Si 表面だけに選択的に重合膜を形成し、エッチング速度を抑制する (選択比を向上させる) が可能となる。この反応過程を簡略化して示すと下記のようなになる。

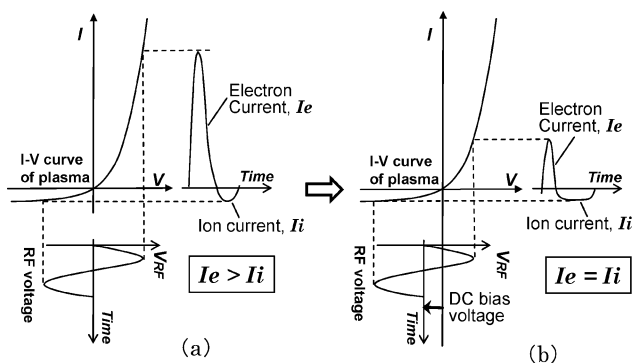
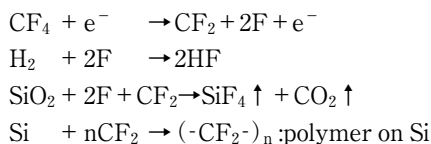


図 2 プラズマに晒した電極に RF を印加した時に DC バイアスが発生する機構。RF 1 周期での電子電流 (I_e)、イオン電流 (I_i) は、(a) 移動度の差から $I_e > I_i$ となり電極が負に帯電し、(b) $I_e = I_i$ となるように DC バイアスが発生する。

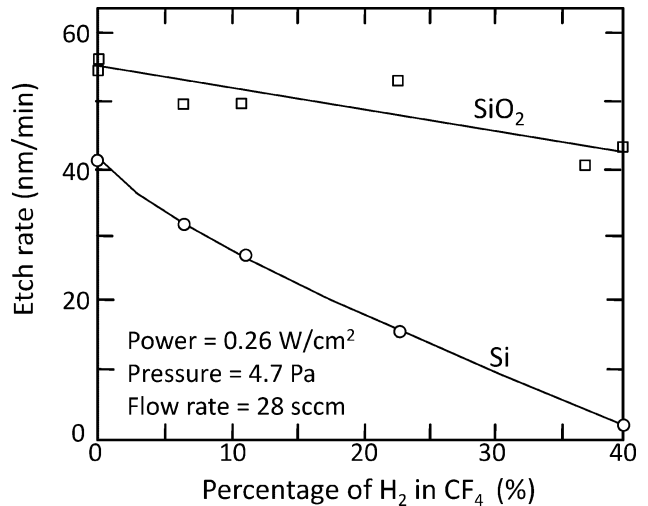


図 3 CF₄-H₂ 混合ガスを使用した RIE 装置において、H₂ 流量変化に対する SiO₂ と Si のエッチング速度の変化 [5]。

実際には CF, CF₃, さらに C₂F_x, CO あるいは SiF_x や SiCF など多くのラジカル種、反応生成物、イオン種が存在する。また重合膜の組成も厳密に CF₂ とは限らず、表面では反応の中間生成物を含む反応層が形成されながらエッチングが進む。デバイス生産の数々の要求から、高性能の装置、プロセス開発のために、このような反応機構が詳細に検討され続けてきた。その詳細は他の章に譲り、ここでは30年以上前に開発された基本的なスキームが現在の微細加工においても利用されているということを理解いただきたい。

その後、1980年代初めにかけて Coburn や Flamm らにより RIE における異方性加工の機構が調査され [16, 17]、ハロゲン元素の存在下でイオン衝撃を受けた表面のエッチング反応が著しく促進される現象が明らかにされた。図 4 に RIE における異方性エッチングの機構を図示した。(a) は上述のイオン支援エッチング反応 (Ion assisted etch reaction) であり、エッチング種が吸着した表面 (Adsorbed

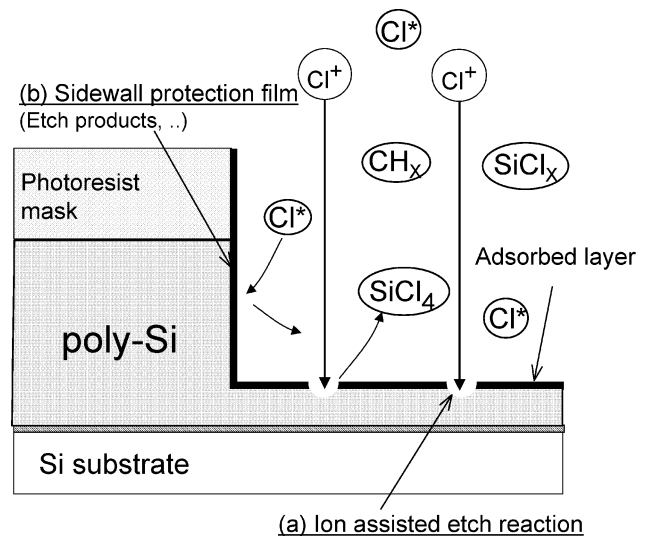


図 4 RIE による異方性エッチングの機構、(a) イオン支援エッチング (Ion assisted etch reaction)、(b) 側壁保護膜 (Sidewall protection film) の形成。

layer) をイオンが衝撃することで、エッチング種と被エッチング材料の反応が促進される。一方、(b)の側壁保護膜 (Sidewall protection film)の形成は、中性のエッチング種と容易に反応が進む材料 (例えば、リンを高濃度に添加した n⁺ poly-Si と Cl 原子, Si と F 原子の反応) を加工する場合に有効である。エッチング生成物 (図の例では SiCl₄) やレジストの分解物がパターン側面に堆積し、中性のエッチング種との反応を抑制する [18]。イオンが衝撃するパターンの底面ではこの薄膜が除去されるために、異方性の加工が可能となる [6]。

その後、ウェハの大口径化と生産性の向上に対応するために、ウェハを1枚ごとに高速に加工する新方式 (ECR 装置やマグネトロン RIE) が提案され、技術開発は新たな世代に入る。

2.2.2 プラズマエッチングの発展期

図5にエッチング装置開発の経緯を、上述した黎明期から現在までの期間に亘り、年代、ウェハ口径、DRAMの最小の加工寸法 (最小線幅) および容量等の技術の世代に対して導入されたプラズマ生成方式により示した。重要な装置の構成図、プロセス技術上のイノベーション、装置技術としてウェハ搬送についてもまとめた。括弧内は、A: 微細化, S: 選択比, E: エッチング速度, D: ダメージ, R: 再現性についての性能向上を目的として開発された技術で

ある。

前節で紹介した基本的な RIE のコンセプトは80年代初期までは変わらず、ウェハのロボットアーム搬送、カセット・ツー・カセット方式、ロードロック機構などの自動化により、生産性や信頼性の向上がなされた。70年代までは電極上に複数のウェハを並べて処理するバッチ処理方式であり、チャンバを開放して作業者が専用のピンセットで1枚ずつウェハを電極上に配置した。その後ウェハをロボットアームで搬送する技術が導入され、ウェハ (1ロット~25枚) を PTFE 等の耐薬品性のある素材を使ったカセットに収めて、装置への導入を行った。さらに、プロセスチャンバを大気開放することによる不安定性が問題となり、真空搬送容器を介してプロセスチャンバへウェハを導入するロードロック機構が採用された。

ウェハが6インチ径程度となるとバッチ処理では装置が大型化するため、80年代中頃からウェハを1枚ごとにエッチングする枚葉処理方式の装置が導入された。バッチから枚葉となると1ロットの処理時間が著しく増加するため、ここでエッチング速度の大幅な向上が検討された。また、同時に幅 1 μm を下回る寸法の高精度加工が要求され、プラズマ生成方式に立ち返った検討がなされた。すなわち、従来 1 Torr~数百 mTorr であったガス圧力を下げ、表面を衝撃するイオンの方向性を良くすると同時に、プラズマ密

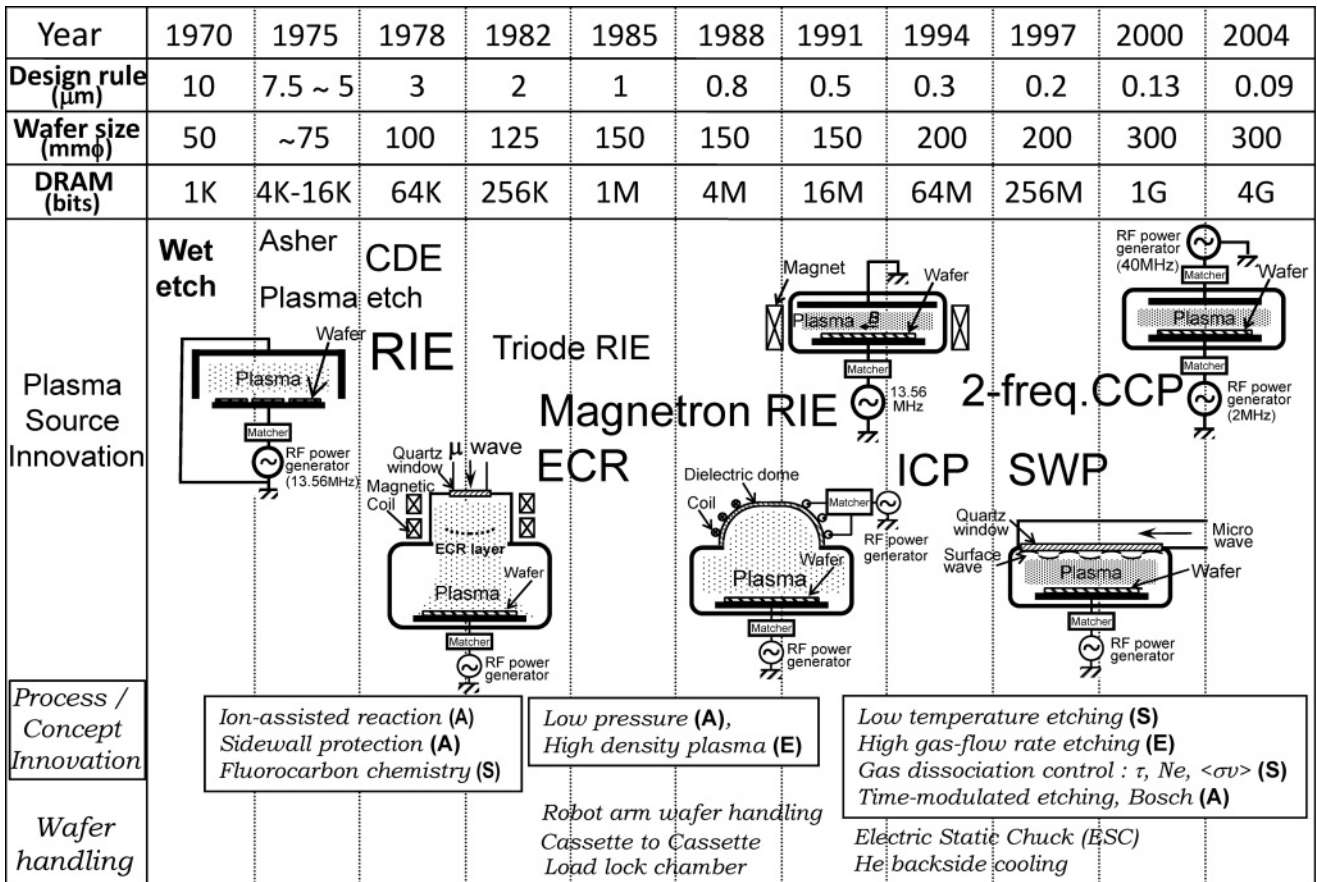


図5 エッチング装置開発の経緯を黎明期から現在までの期間に亘り、年代、ウェハ口径、DRAMの最小の加工寸法 (最小線幅) および容量等の技術の世代に対して導入されたプラズマ生成方式および装置構成図、プロセス技術上のイノベーション、ウェハ搬送の装置技術。括弧内は、A: 微細化, S: 選択比, E: エッチング速度, D: ダメージ, R: 再現性について、それぞれ性能向上を目的として開発された技術。

度(従来は $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$)を高めることで高速の加工を目指した。

その一方式が電子サイクロトロン共鳴 (ECR) を利用して低ガス圧力で高密度プラズマを形成する ECR プラズマエッチング装置[7, 19]であり, もう一つが RIE カソード電極付近に電極と平行な磁場を与えるマグネトロン RIE 装置[20]であった。また, プラズマ密度とバイアス電圧を独立に制御する 3 電極 (トライオード: Triode) 方式も提案された[21]。詳細は各文献に譲るが, ECR 方式は高精度・低ダメージの加工方式としてゲート電極や配線の加工に活用された。大口径化への対応やフルオロカーボン系ガスでの制御性低下などの課題から現在の先端 LSI 製造ではほとんど使用されていないが, 低ガス圧力での加工や MEMS (Micro Electro Mechanical System) あるいは CVD やスパッタリングの応用などではなお広く活用されている。マグネトロン RIE はプラズマの不均一性に起因する静電ダメージ[22]が課題であったが, 均一磁界を形成するダイポールリング磁石[23]の採用により, 特にフルオロカーボン系ガスでの SiO_2 や高アスペクト比 Si トレンチの加工において高いプロセス性能を発揮した。

この時期に大きく進歩した装置技術は静電チャック (ESC: Electric Static Chuck) である。プラズマ密度を高めて高速エッチングを実現したためエッチング中のウェハの昇温が問題となった。電極上に静電吸着したウェハと電極間に He ガス (圧力 $\sim 1 \text{ kPa}$) などの熱伝導率の高いガスを導入することで, ウェハの温調を可能とした。その他, ウェハを従来より低い温度 (0°C ~ 液体窒素温度) に維持することで選択比や形状制御を行う低温エッチング技術[24], エッチング生成物の再吸着を抑制し高速エッチングを可能とする高ガス流量 (あるいは高速排気) 技術[25]が提案されている。

以上のように, 80年代から90年代中期にかけては, 日本のデバイスメーカーを中心にプラズマエッチング装置, プロセス技術の開発が極めて活性化した時期である。その背景には, 日本のデバイスメーカーが DRAM 生産に集中し, その市場の 8 割以上を占めるまで至った時代であり, 共通の材料やプロセスに各社が同じ目標で開発していたこともある。また, 原子・分子・イオンで加工するプラズマプロセスのポテンシャルが極めて高く, 現場での擦り合わせで生産の対応ができたためと考える。

2.2.3 プラズマエッチングの高度化と現在

その後, さらに微細化, 高生産性への対応が求められ, 米国の装置メーカーを中心に, 誘導結合型プラズマ (ICP: Inductively Coupled Plasma) 源[26, 27]が装置化された。これは, チャンバの上部や側面の高周波コイルでプラズマを誘導加熱する方式である。高密度プラズマを容易に形成できることから HDP (High Density Plasma) とも呼ばれた。特にトランジスタのゲート電極加工や配線金属加工では良好な特性を示し, 急速に普及した方式である。

しかし, フルオロカーボンガスを使用した SiO_2 膜のエッチングでは, 特に Si_3N_4 膜に対して選択比が安定せず, HDP 方式は生産現場に本格採用されなかった。高密度プラ

ズマでフルオロカーボンガスを高度に解離し F 原子が多く生成されることが低選択比の一因である。構成上チャンバ体積が大きいことも (ガスの滞在時間が増加して) ガスの解離度を上げた。さらにチャンバ上面や側面の誘電体は温度調整が困難であり壁の状態が安定せず, また誘電体がエッチングされ放出されるガス (酸素など) も不安定要因となった。

この間にマグネトロン RIE は, 3 cm 程度の電極間隔 (容積の小さい) 構成と CO あるいは Ar ガスを大流量で導入する (ガス滞在時間が短い) ことで, フルオロカーボンガスの分解を抑制, Si_3N_4 膜に対する SiO_2 の高選択比エッチングプロセスを実現した。その後の ASET[28]における解析[29, 30]から, ガスの解離制御の一指針として, ガス分子が排気されるまでにプラズマ中で受ける電子衝撃の回数 ($\tau \cdot N_e \cdot \langle \sigma v \rangle$), τ : ガスの滞在時間, N_e : 電子密度, $\langle \sigma v \rangle$: 電子衝突解離断面積と電子速度の積分値で衝突解離レートに相当) を制御することの重要性が確認された。このコンセプトは二周波 CCP (Capacitively Coupled Plasma) 型 RIE と呼ばれる方式でも実現されている。

その後, プラズマ励起に従来の 13.56 MHz から VHF 帯を利用する CCP や ICP が提案され発展した。また, 誘電体ランチャーやスロットアンテナを使用して表面波を励起することでプラズマへエネルギーを供給する表面波プラズマ (Surface Wave Plasma: SWP) [31]が開発されている。ICP では特殊な磁場配置を使った NLD (Magnetic Neutral Loop Discharge) 方式[32]が主に MEMS 加工やリソグラフィで使用するレチクルの加工において実用化されている。SWP と NLD は低電子温度の高密度プラズマを実現しやすいプラズマ生成方式であることが謳われており, ともに大学のシーズから発展して装置化された。

その他に, 側壁保護膜形成とエッチングを交互に行うことで異方性の高速エッチングを行う Time-modulated etching 法[33]がある。堆積性のガス (例えば CCl_4 や C_4F_8) とエッチングガス (例えば SF_6) を短時間 (\sim 数秒ごと) に切り替えて, エッチングガス導入時にバイアス RF を印加する。Bosch 法[34]と呼ばれる同様の方法が MEMS 等における高アスペクト比の Si トレンチの形成に使われている。さらに, プラズマ自体に変調をかけるパルスプラズマ法では, RF 電源を数十 msec で ON/OFF 駆動してプラズマを生成することで平均の電子温度が低下する[35, 36]ことが知られ, ガス解離の制御や帯電に起因するデバイスへのダメージ低減が検討された。

以上, エッチング装置とそれに伴うプロセス開発の流れを示した。高性能化と高生産性を追求する半導体デバイス製造の要求が技術を大きく発展させた。90年代中頃までは, デバイスメーカーの研究開発陣が新たなハードウェアとプロセス技術を考案することで発展させてきた。しかし, それ以降は特にハードウェアについて半導体製造装置専門メーカーが開発能力を高め, デバイスメーカーと協力して開発する傾向にある。最近では, デバイスメーカーはプロセス開発に集中し, 基本的な装置技術, プロセス技術の開発は装置メーカーに依存している。

一方で、上述のプラズマ源やプロセスにおいて大学のシーズから開発されたものは少ない。しかし、1980年代末に科研費重点領域研究「反応性プラズマの制御」[37]が組織され、反応性プラズマの発生と制御、診断、モデリング等に関する研究が推進されたことにより、その後アカデミアにおいても反応性プラズマ研究の機運が高まり、気相、表面反応機構の理解と計測技術の発展に貢献し、現在に至っている。

2.3 装置・プロセス技術の課題と展望

フルオロカーボンガスを使用したSiO₂膜や絶縁膜の加工は、微細化、大口径化の急激な進展に対応し、30年前からの「古い」課題（形状制御、低ダメージ、高選択比、高エッチング速度、均一性）が常に新しい課題として検討され続けている。経時変化や機差といった問題も常に存在する。さらにデバイス性能の物理限界を拡張するために、多岐にわたる新材料（ポーラス low-k, high-k, 高感度エキシマレジスト…）や新構造（ダマシン配線、歪みシリコン、Fin 型ゲート…）が次々に考案されたことから、新たな課題が現れてきている[38]。

しかし、微妙な材料、構造の違いにより発生する現象は多様であり、その解決へのアプローチはエッチングプロセスだけではすまない。工程の前後でパターン寸法などを計測し直ちに装置へフィードバック（APC: Advanced Process Control）、前後工程を含めた複数のプロセスをモジュールとして最適化を図る、あるいはデバイスの設計まで遡り最適化を図る（DFM: Design for Manufacturing）等の手法が検討されている。

以下では、生産技術開発を見通し良く迅速に進めるための共通基盤的な装置開発技術について3点に絞り述べる。

まずその一つは、見通しの良いプロセス開発を行うための、モニタリングとフィードバック手法の開発である。これについては本小特集第3章で辰巳氏がモニタリングの技術を活用したプロセス開発について詳述している。その実現には、試行錯誤を繰り返す経験的な開発手法から、外部パラメータ（ガス種、圧力、RF電力など設定条件）と内部パラメータ（プラズマ密度、ラジカル組成・密度、イオン種・エネルギー…）、エッチング特性（エッチング速度、形状、…）の相関を科学的に理解することが必要である。また同時に基礎反応過程データベースの充実が必要である。これによりハードウェアによらず普遍的に活用できる反応データを蓄積していくことが初めて可能となる[39]。

二番目は内部パラメータの制御技術の開発であり、上記のフィードバック手法の具体的な手段である。高誘電絶縁膜上のメタルゲート加工における選択比、薄い絶縁膜下のSi基板のダメージ[40]などを始めとして、今後は薄い界面での反応制御が特に重要であり、それはイオンエネルギーに非常に敏感である。したがって、イオンエネルギー幅の縮小と制御、特に低エネルギーでの制御が必要となる。さらに、エッチングの進行する表面反応層の高精度制御には、特定のラジカル種を選択的に供給したり、プラズマからの高エネルギー光、ウェハ表面温度まで含めた理解と制

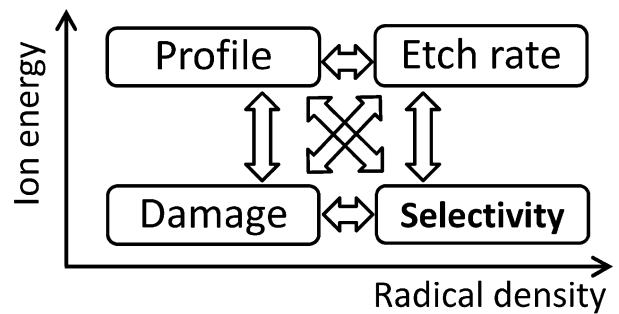


図6 イオンエネルギーとラジカル密度に対してのマトリクスで示した基本的なエッチング特性の項目。

御が求められる。

三番目は均一性の制御である。基本的なエッチング特性への要求項目について、イオンエネルギーとラジカル密度に対して一般的な傾向をマトリクスに配置して図6に示した。例えば、エッチング速度や選択比はラジカルが多い場合に有利になり、ダメージ低減や選択比向上のためには低いイオンエネルギーが好ましい。これらはどれも重要であるが、それぞれの特性は基本的にトレードオフの関係にある。ところが、均一性は他の特性と強いトレードオフの関係にはなく、独立に制御しやすい特性である。しかも、数nmの薄膜や界面層での高い選択比の実現が一層困難となっている状況で均一性向上の効果は大きい。

また、パターンの加工寸法（CD: Critical Dimension）の変換差の制御においても均一性が強く影響することが知られている。これはエッチング生成物[41]やラジカル、イオンの不均一が原因となって側壁保護膜（図4）の厚さがウェハ面内で不均一となるためである。エッチング種の供給と反応生成物の排気、温度について一層の均一性が求められる状況になっている。

もちろんプロセス条件は均一性に影響するが、特にハードウェアによる均一性の制御は高生産性装置開発のポイントとなる。プロセス条件に比較的鈍感で均一性制御が容易な（チャンバ構造や内壁での反応まで考慮した）プラズマ生成方式が待ち望まれている。これは、半導体デバイスのみならずフラットパネルディスプレイ（FPD）や今後のプラズマ応用技術すべてに共通の課題であり、基盤技術としてアカデミアで取り組むべきテーマであると考えられる。

2.4 まとめ

プラズマエッチングは、70年代にパターン側面にアンダーカットのない異方性加工の基本原理が発見され、さらにフルオロカーボンプラズマによるSiO₂の高選択比エッチングの達成により、半導体デバイスの微細化を推進する強力なツールとなった。微細化とウェハの大口径化のためバッチ処理から枚葉処理へ変わり、そこから生じた高速エッチングの要求が、低ガス圧力・高密度プラズマのECRやマグネトロンRIEの開発を促した。80年代から90年代にかけては、サブミクロンからナノ加工へ、さらにはφ300mmウェハ加工へ向けて新たなプラズマ源開発が活性化し、ICPの台頭、さらに二周波CCP、あるいはSWPといっ

た装置が続々と開発された。

プロセス技術の課題には、従来からのエッチング形状制御、エッチング速度、選択比、ダメージと均一性に加えて、デバイスの物理限界を突破しようと検討されている多種多様な新材料や新構造用の効率的な技術開発がある。

見通しの良いプロセス開発を行うためのメカニズムの理解に基づいたモデリング技術の向上とそれを支えるデータベースの充実が必要である。また、高性能プロセスを実現、維持するために、生産装置で使用できるモニターの活用が望まれる。新構造トランジスタや多層配線では薄膜のストッパー層や密着層を考慮したエッチングが求められ、選択比を補い、ナノレベルの寸法均一性を実現するために、プラズマとガス種の均一性をハードウェアやプラズマ生成原理に基づいて追及し、制御するシステムが重要である。

参考文献

- [1] R.A.H. Heinecke, *Solid-State Electron.* **18**, 1146 (1975).
- [2] R.S. Rosler, W.C. Benzing and J. Baldo, *Solid-State Technol.* **45**, 6 (1976).
- [3] N. Hosokawa, R. Matsuzaki and T. Asamaki, *Jpn. J. Appl. Phys., Suppl.* **2**, 435 (1974).
- [4] J.A. Bondur, *J. Vac. Sci. Technol.* **13**, 1023 (1976).
- [5] L.M. Ephrath, *J. Electrochem. Soc.* **126**, 1419 (1979).
- [6] D.L. Flamm, V.M. Donnelly and D.E. Ibbotson, *J. Vac. Sci. Technol.* **B1**, 23 (1983).
- [7] S. Matsuo and Y. Adachi, *J. Appl. Phys.* **21**, L4 (1982).
- [8] J. Bardeen and W.K. Brattain, *Phys. Rev.* **71**, 717 (1947).
- [9] W. Shockley, *Bell Syst. Tech. J.* **28**, 435 (1949).
- [10] U.S. Pat. 3,064,167, U.S. Pat. 3,025,589 (1959).
- [11] U.S. Pat. 2,981,877 (1959).
- [12] S.M. Irving, *Kodak Photoresist Seminar Proc.* **2**, 26 (1966).
- [13] U.S. Pat. 3,615,956 (1971).
- [14] Y. Horiike and M. Shibagaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **15**, Suppl. 15-1,13 (1976).
- [15] H.R. Koenig and L.I. Maissel, *IBJ. Res. Dev.* **14**, 168 (1970).
- [16] J.W. Coburn and H.F. Winters, *J. Appl. Phys.* **50**, 3189 (1979).
- [17] D.L. Flamm and V.M. Donnelly, *Plasma Chem. Plasma Process* **1**, 330 (1981).
- [18] I. Hasegawa, Y. Yoshida, Y. Naruke and T. Watanabe, *Proc. Dry Process Symp.* (Inst. Electr. Eng., Tokyo, 1985) p.126.
- [19] K. Suzuki, S. Okudaira, N. Sakudo and I. Kanomata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **16**, 1979 (1977).
- [20] H. Okano, Y. Horiike, T. Yamazaki and T. Tokura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **23**, 486 (1984).
- [21] V.J. Minkiewics and B.N. Chapman, *Appl. Phys. Lett.* **34**, 192 (1980).
- [22] M. Sekine, K. Horioka, Y. Yoshida and H. Okano, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 6268 (1995).
- [23] M. Sekine, M. Narita, S. Shimonishi, K. Horioka, Y. Yoshida and H. Okano, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 6274 (1995).
- [24] S. Tachi, K. Tsujimoto and S. Okudaira, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 616 (1988).
- [25] K. Tsujimoto, T. Kumihashi, N. Kofuji and S. Tachi, *J. Vac. Sci. Technol.* **A12**, 1209 (1994).
- [26] Lam Research Corporation, Technical Note TN-003 (1992).
- [27] J. Givens, S. Geissler, J. Lee, O. Cain, J. Marks, P. Keswick and C. Cunningham, *J. Vac. Sci. Technol.* **B12**, 427 (1994).
- [28] Association of Super-Advanced Electronics Technologies, <http://www.aset.or.jp/>
- [29] 関根 誠：応用物理 **70**, 387 (2001).
- [30] <http://www.aset.or.jp/plasma/>
- [31] H. Sugai, I. Ghanashev and M. Nagatsu, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 192 (1998).
- [32] 陳 魏, 林 俊雄, 伊藤正博, 坪井秀夫, 内田岱二郎, *J. Plasma Fusion Research*, **74**, 258 (1998).
- [33] K. Tsujimoto, S. Tachi, K. Ninomiya, K. Suzuki, S. Okudaira and S. Nishimatsu, in *Ext. Abstracts 18th Int. Conf. S. St. Devices and Materials*, Tokyo (IEEE, New York, 1986), p. 229.
- [34] F. Laermer and A. Schilp, Robert Bosch GmbH, US-Patent No. 5501893.
- [35] S. Samukawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2133 (1994).
- [36] H. Sugai, K. Nakamura, Y. Hikosaka and M. Nakamura, *J. Vac. Sci. Technol.* **A13**, 887 (1995).
- [37] 板谷良平 (領域代表者)：昭和 63 年度文部省科学研究費重点領域研究「反応性プラズマの制御」。
- [38] R.A. Gottscho, K. Nojiri and J. LaCara, *Proc. Dry Process Symp.* **28**, 1 (Inst. Electr. Eng. Tokyo, 2006).
- [39] 堀 勝：応用物理 **74**, 1328 (2005).
- [40] H. Kokura, K. Okabe, M. Nakaishi and M. Miyajima, *Proc. Dry Process Symp.* **27**, 4-03 (Inst. Electr. Eng. Tokyo, 2005).
- [41] M. Izawa, T. Tachi, R. Hamasaki, T. Yoshida and M. Kojima, *Proc. Dry Process Symp.* **19**, 45 (Inst. Electr. Eng. Tokyo, 1997).