

1.3 エッチング技術における重要な概念

1.3.1 ドライエッチングの分類とエッチング形状

プラズマエッチングは半導体の微細加工に不可欠な技術であり、リソグラフィとともに、大規模集積回路 (LSI) の高性能化を推進してきた。プラズマエッチングの役割は、リソグラフィ技術により感光性有機材料 (フォトリソ) に作成したパターン (マスク) を、その下の層 (導体、絶縁物薄膜、あるいは Si などの基板) へ転写し、トランジスタの電極、絶縁層、配線などの構造を作ることである。

プラズマエッチングなどのドライ技術が開発される以前には、フッ酸やリン酸溶液によって材料を溶かすウェットエッチングがパターン形成に使われた。しかし、溶液は、マスク下方へ浸み込み、横方向へ広がり、等方的なアンダーカットが発生するため、加工する膜の厚さ未満のパターンは形成できず、微細化に対応できない。ドライエッチングには、図 2 に示す種類があり、アンダーカットが生じるガスエッチングやダウンフローエッチングから、レジストマスク寸法どおりに垂直に加工する方向性 (異方性とも呼ばれる) の加工が可能な手法がある。

XeF_2 のようなガスを導入するだけでエッチングが進行するガスエッチングや、ハロゲン元素などを含むガスをプラズマで励起して、ラジカルを使用するダウンフローエッチング⁶⁾ は、化学反応だけを利用する。一方、スパッタリングはアルゴンなどの希ガスのイオンを加速して表面へ照射し、物理的に膜を除去する。方向性の加工は可能であるが、マスクに対する選択比は低い。

これらの中で、化学反応と物理的作用の両方を利用する手法がある。まず、広義のプラズマエッチングはウェハをプラズマ中へそのまま入れて、プラズマからの活性種とウェハ表面に形成されたシースにより加速されたイオン衝撃を利用する。プラズマに晒しただけで形成されるシース電圧はプラズマ電位程度の 10 数 eV であるため、物理的な作用は弱い。現在ではレジストなどの有機物を除去するための酸素プラズマアッシングに使用されている。

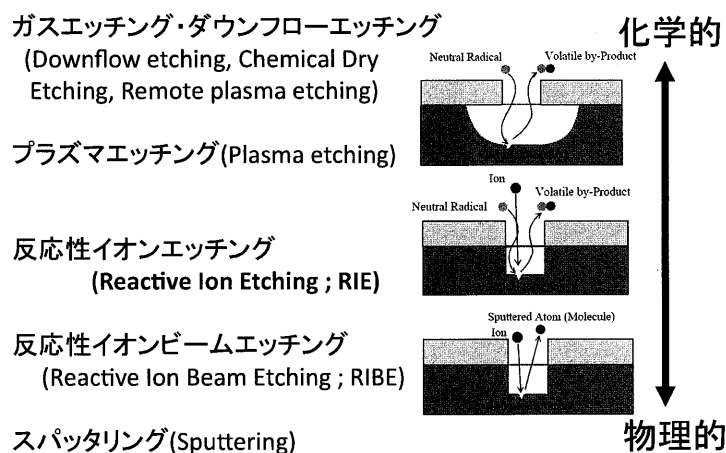


図 2 ドライエッチングの分類と典型的なエッチング形状

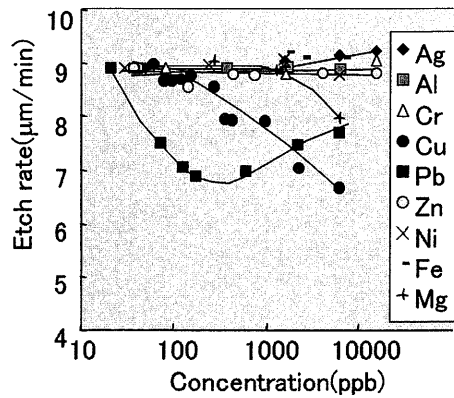


図1 110°C, 32 wt%KOH 水溶液における Si(110) 面エッチング速度の金属不純物依存性

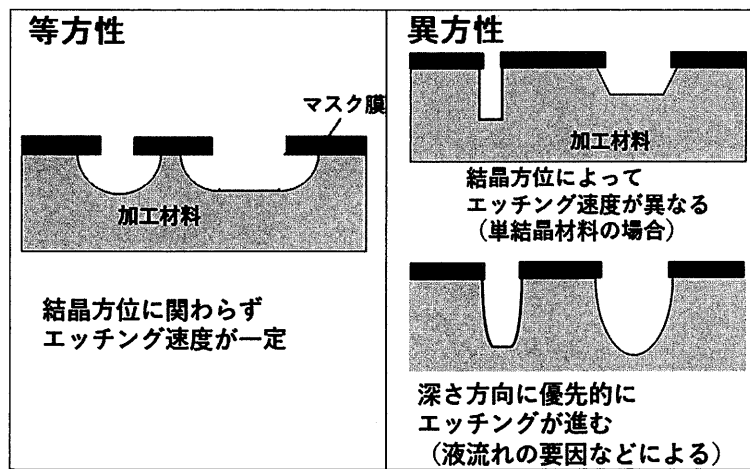


図2 ウェットエッチングで得られる加工形状 (断面)

板は単結晶でできており、使用する結晶方位により異方性が生じ、各結晶面でのエッチング速度が異なることに起因して発生する異方性形状が加工後に出来上がる。すなわち、半導体材料のウェットエッチング加工においては、各結晶面のエッチング速度の違いを把握しておく必要がある。各結晶面でのエッチング速度の違いを実験的に把握する方法も考案、実施されている。代表的な方法としてシリコン半球を用いて全方位のエッチング速度を系統的に得る方法がある⁵⁾。この方法では、エッチング後の表面外観についても系統的な変化を把握できる特徴がある。また、ワゴンホイール法と呼ばれる方法も考案、実施されている^{6,7)}。これは、半導体基板上に、放射状にマスク膜をパターンニングした試料を用いると、マスク膜のサイドエッチング量がエッチング速度の異方性の違いで変わり、エッチング後に半導体基板、あるいはエッチング液条件で放射状パターンが変化することを利用する方法である。

3つ目は、半導体材料のエッチング方法である。半導体プロセスでは基本的にウェハ（丸い薄

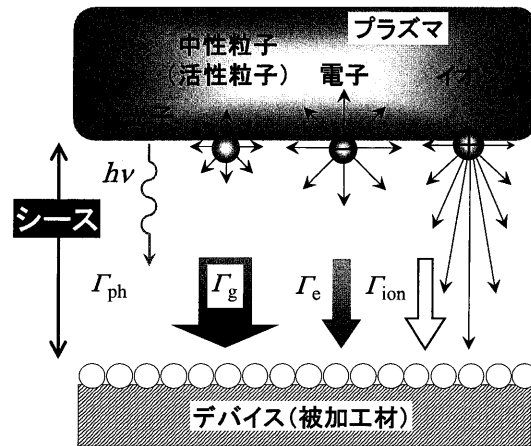


図1 プラズマ誘起ダメージメカニズムの概念図

シース領域を通して、イオン、電子、光子が半導体デバイス表面に照射され、侵入する。その結果、デバイス表面領域に欠陥が形成される。

上を目的とし、照射イオンエネルギーやプラズマ密度は増加している。このようなパラメータ間の不整合によって、これまで問題とならなかった想定外のPID機構が顕在化しているのである。RIE機構が発見⁴⁾されて間もなく、入射粒子（主にイオン）の一部が半導体デバイス奥深くまで侵入し材料中の局所構造を乱し⁶⁾、また伝導電流が流れ絶縁膜が破壊するような現象⁷⁾が報告された。1990年代に入ってから、従来の評価手法に代わる様々な評価手法が提案され、その恩恵もありPIDのメカニズム理解は深化してきた。本節では、PID形成機構の基礎を概観し、近年の課題に焦点を絞って述べることにする。概観を把握することを目的としているため、詳細については各文献を参照してもらいたい。

1.2 プラズマ誘起ダメージの分類とその評価手法

図1に示したように、プラズマプロセス中には、イオン、電子、ラジカル、光子がデバイス表面に入射する。それらと半導体デバイスとの相互作用には主に3つの機構がある。1つ目は、シースで加速され高エネルギー状態となったイオンによるものである。イオンはデバイス中に侵入し、その侵入過程で材料中の原子間結合に変化を与える。この変化した局所構造（例えば、不對電子構造、格子間原子、結合歪み）が「欠陥」となる。この機構をここではプラズマ誘起物理的ダメージ（PPD：Plasma-Induced Physical Damage）⁵⁾と記すことにする。図2にその機構を分子動力学法によって予測した結果⁸⁾を示す。シリコン（Si）基板を想定した構造（直方体の構造を準備しており、紙面方向には周期構造になっている）に、プラズマエッチングガスで広く使われている元素である塩素（Cl）を照射エネルギー500、100 eVで1000回打ち込んだ後の構造を示している。Si基板内部に侵入したCl原子が分布している層が形成されている。加えて、ダメージ層領域に、格子点からずれたSi原子も存在している。これらの（原子の乱れた）層がダ

塩素による原子層エッチング反応

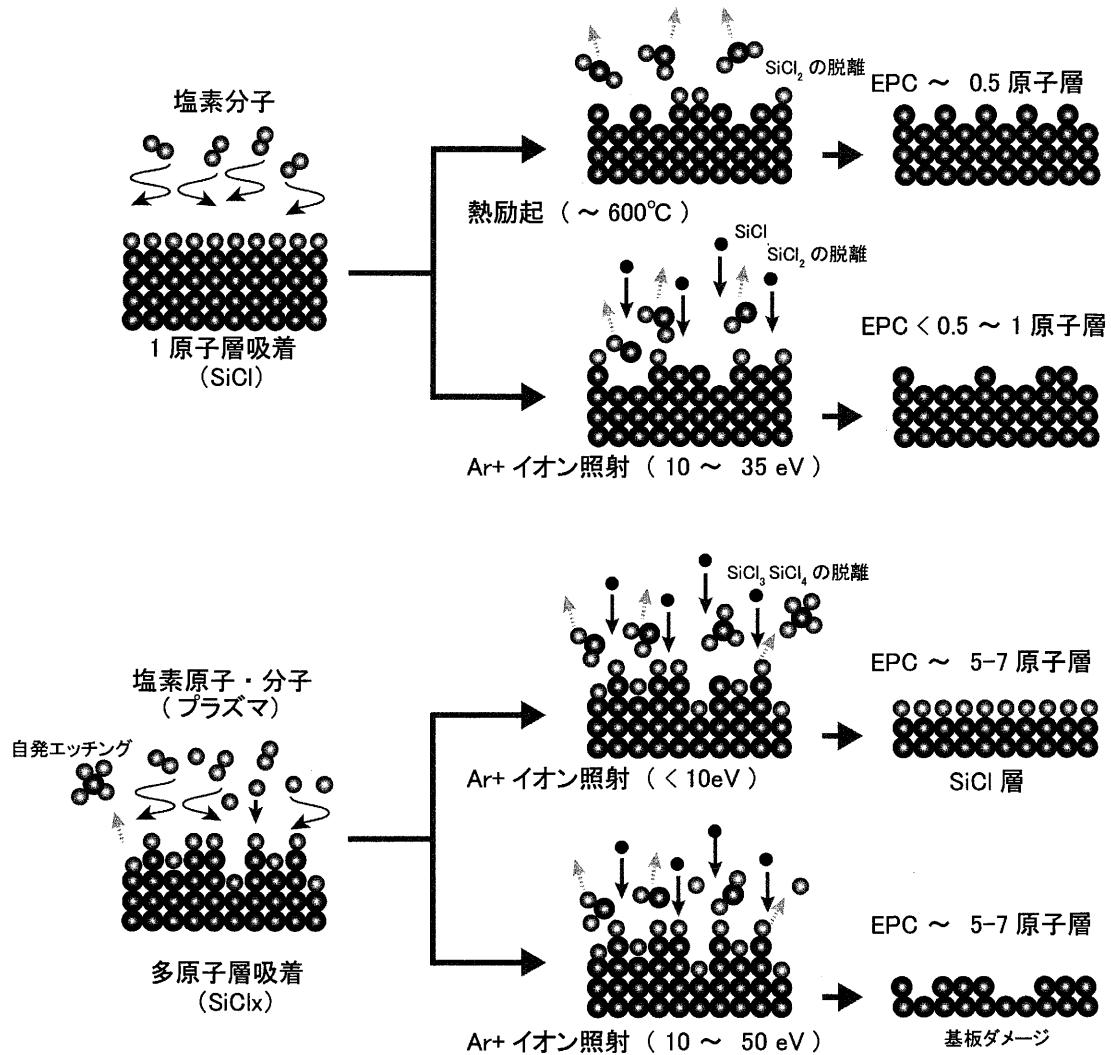


図8 異なる条件下での塩素によるシリコン ALE 反応の模式図

原子変位によるダメージ生成される。また、塩素分子およびフッ素分子がそれぞれ 2 eV, 0.16 eV の運動エネルギーを持つ場合、ハロゲン分子は SiCl および SiF に覆われた飽和吸着表面上においてエッチング反応を引き起こす。フッ素分子の場合は塩素に比べて解離の閾値が低いため、室温のフッ素分子であっても 10^7 L 程度の曝露で 1 原子層程度のエッチングが進行する¹⁶⁾。

プラズマを用いた場合、ハロゲン原子によって吸着層は 1 原子層を超えて増加し、SiCl₂, SiCl₃, および SiF₂, SiF₃ の結合を含むハロゲン化物層が形成される。ハロゲン化物層の増加速度は、1 原子層を超えると低下するため疑似的な飽和傾向を示す。さらに、ハロゲン原子は自発エッチン