

誘導結合 Cl_2 プラズマ Si エッチングにおける表面ラフネスの解析： パルスバイアスエッチングの効果

Analysis of Surface Roughness during Si Etching in Inductively Coupled Cl_2 Plasmas: Effects of Pulse Bias Etching

京大院工 °中崎 暢也, 松本 悠, 江利口 浩二, 斧 高一

Kyoto Univ., °Nobuya Nakazaki, Haruka Matsumoto, Koji Eriguchi, and Kouichi Ono

E-mail: nakazaki.nobuya.58x@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年の半導体デバイスの微細化により、プラズマプロセスにおける原子スケールの形状異常や表面ラフネスがデバイスの性能を左右する重要な問題となっている。これらが生成される過程は、プラズマから基板表面へ入射するイオンやラジカルの挙動だけでなく、基板表面から脱離する粒子の微細構造内およびプラズマ内での挙動など、様々な要因が関係する複雑な物理現象である。本研究は、誘導性結合プラズマ (ICP) を用いた Cl_2 による Si エッチングにおける表面ラフネスに着目し、プラズマおよび Si 表面の解析を通じて、その生成メカニズムの解明と制御を目指している。

2. 実験装置・条件

Fig. 1 に、ICP リアクタ (直径 25 cm、高さ 30 cm) の概略を示す。プラズマは放電電力 450 W の高周波 (13.56 MHz) で維持され、基板ステージ (直径 4 インチ) に高周波バイアス ($P_{\text{rf}} = 0\text{--}200\text{ W}$, 13.56 MHz) が印加される。リアクタ内には Cl_2 ガスが流量 $F_0 = 5\text{--}50\text{ sccm}$ で導入され、放電時のガス圧力は $P_0 = 20\text{ mTorr}$ である。サンプルには抵抗率 ρ の異なる 4 インチ N 型単結晶 Si(100) ($\rho \approx 10, 0.04\ \Omega\cdot\text{cm}$) および熱酸化 SiO_2 を用いた。エッチング後のサンプルに対して、エッチ深さを段差計で測定し、エッチレート (ER) を算出した。また、表面ラフネス (RMS) を原子間力顕微鏡 (AFM) で測定した。

今回は、Fig. 2 に示すように、バイアス電力 P_{rf} をパルス制御

($f_{\text{pulse}} = 0.01\text{--}100\text{ kHz}$, $D = 0\text{--}100\%$) で ON/OFF することにより、イオン入射エネルギー E_i を時間変化させ、その表面ラフネス生成への寄与を考察した。

3. 結果と考察

Fig. 3 に、 $f_{\text{pulse}} = 1\text{ kHz}$, $D = 50\%$, 100% (CW) で 2 分間エッチングした際の Si および SiO_2 の ER と RMS の E_i 依存性を示す。ここで E_i は、バイアスが ON の場合の値である。いずれの条件下でも、ER は E_i の上昇とともに増加することがわかる。 $D = 50\%$ での ER は、CW での 60–80% となるが、これはバイアスが OFF の場合でもエッチングが進行するためである。

また、CW の場合の RMS は、 $E_i < 200\text{ eV}$ では E_i の上昇とともに増加するが、 $E_i > 300\text{ eV}$ では減少する。 $D = 50\%$ の場合も RMS の E_i 依存性は同様であるが、RMS の値は CW の場合と比較して、 $E_i < 300\text{ eV}$ では小さいが、 $E_i > 300\text{ eV}$ では大きい。特に、 $E_i = 50\text{--}150\text{ eV}$ において、RMS は CW の場合の 30–50% となり、ER の減少率を上回るため、パルスバイアスエッチングによる表面ラフネス抑制の可能性が示唆される。一方で、CW における $E_i < 20\text{ eV}$ および $E_i > 400\text{ eV}$ での RMS はほぼ等しいが、その 2 つの条件が同時に課される $D = 50\%$, $E_i > 400\text{ eV}$ では RMS が大きく、 E_i の時間変化によって表面ラフネス生成・成長メカニズムが強められていることが示唆される。

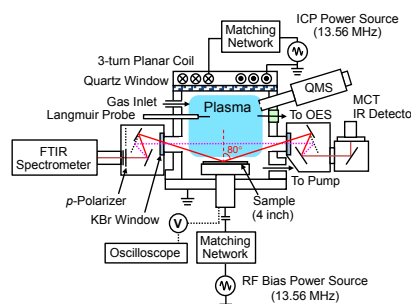


Fig. 1. Experimental setup for plasma etching using an ICP reactor, including several plasma and surface diagnostics employed.

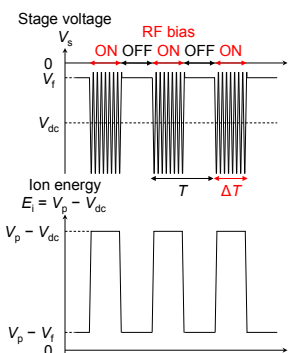


Fig. 2. Schematic of the pulse bias etching with a repetition frequency $f_{\text{pulse}} = 1/T$ and a duty ratio $D = \Delta T/T$.

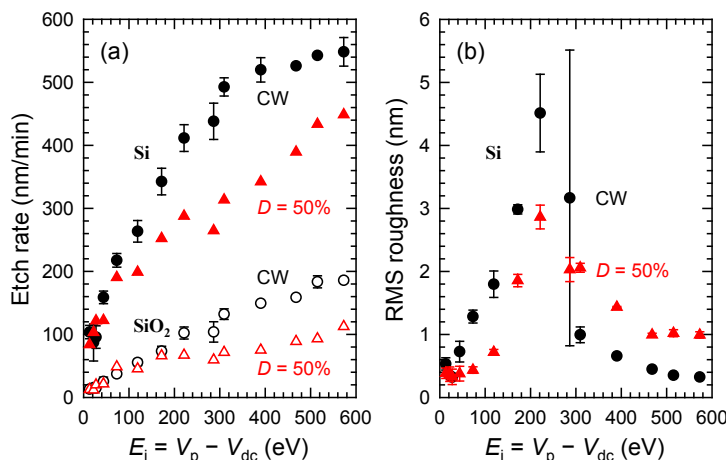


Fig. 3. (a) Etch rates of Si and SiO_2 , and (b) rms roughness of etched Si surfaces as a function of ion incident energy $E_i = V_p - V_{\text{dc}}$, measured after 2-min plasma etching in Cl_2 at $P_0 = 20\text{ mTorr}$, $F_0 = 20\text{ sccm}$, and $f_{\text{pulse}} = 1\text{ kHz}$ with different $D = 50$ and 100% (with a 10-s breakthrough step).