

## 目 次

### 序章 半導体集積回路プロセスにおけるプラズマの応用の重要性 1

#### 1. プラズマ化学反応の物理 5

##### 1.1 プラズマを用いると、なぜ化学反応が早く進行するか 5

- 1.1.1 はじめに 5
- 1.1.2 化学反応の量子化学的表現 9
- 1.1.3 並進・回転・振動エネルギーの相互移行 13
- 1.1.4 反応座標 16
- 1.1.5 衝突エネルギーの反応への寄与 19
- 1.1.6  $\text{CF}_4$  プラズマ中で発生する反応 23
- 1.1.7 活性化エネルギーの分析——ラジカル反応性とイオン反応性の意味 26
- 1.1.8 Si と  $\text{SiO}_2$  のエッチング反応 33

##### 1.2 プラズマエッチングの物理化学 38

- 1.2.1 エッチングの機構 39
- 1.2.2 エッチングの物理的効果 43
- 1.2.3 エッチング機構の評価技術 46

##### 1.3 プラズマ CVD の物理化学 50

- 1.3.1 プラズマ CVD とは 50
- 1.3.2 プラズマの生成と状態 52
- 1.3.3 プラズマ CVD における反応種と反応機構 55
- 1.3.4 反応条件と生成物 59

##### 1.4 イオンビーム蒸着と結晶の物理化学 60

- 1.4.1 薄膜形式に対するイオンの役割 60
- 1.4.2 各種イオンビーム蒸着法とその特徴 66
- 1.4.3 イオンビーム蒸着とデバイス 77

##### 1.5 プラズマ酸化の物理化学 83

- 1.5.1 プラズマ酸化とは 83

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 1.5.2 | プラズマの状態と表面反応          | 87  |
| 1.5.3 | 酸化膜の成長機構              | 89  |
|       | 参考文献                  | 91  |
| 2.    | プラズマ装置                | 101 |
| 2.1   | トンネル型から枚葉式自動エッチング     | 101 |
| 2.1.1 | 円筒型のプラズマエッチング装置       | 103 |
| 2.1.2 | 枚葉式自動プラズマエッチング装置      | 108 |
| 2.2   | 放電式分離型ケミカルドライエッチング    | 120 |
| 2.2.1 | 長寿命活性種                | 120 |
| 2.2.2 | マイクロ波励起ケミカルドライエッチング   | 122 |
| 2.2.3 | CDE のエッチング機構          | 131 |
| 2.2.4 | CDE 技術の他技術への応用        | 135 |
| 2.3   | マイクロ波プラズマエッチング        | 138 |
| 2.3.1 | まえがき                  | 138 |
| 2.3.2 | 装置構成および放電特性           | 139 |
| 2.3.3 | ガス圧力とエッチング分布          | 141 |
| 2.3.4 | イオンと中性ラジカルの効果         | 144 |
| 2.3.5 | Si のエッチング速さに関する検討     | 146 |
| 2.3.6 | 質量分析, 分光分析, モニタ法      | 150 |
| 2.3.7 | まとめ                   | 152 |
| 2.4   | リアクティブイオンエッチング        | 153 |
| 2.4.1 | 概要と原理                 | 153 |
| 2.4.2 | 装置の構成と実施例             | 154 |
| 2.5   | プラズマ流輸送法の特徴と半導体膜の製作技術 | 165 |
| 2.5.1 | プラズマ流輸送方式の原理と動作モード    | 165 |
| 2.5.2 | プラズマ流輸送装置             | 171 |
| 2.5.3 | 3つのモードにおけるプラズマ流の光放射測定 | 172 |
| 2.5.4 | 他方面への応用               | 176 |
| 2.5.5 | 附録(式(2.5.9)の証明)       | 176 |
| 2.6   | プラズマ CVD 装置           | 180 |
| 2.6.1 | PCVD 装置               | 181 |
| 2.6.2 | PCVD の構成機器            | 183 |
| 2.6.3 | 装置の特徴と性能              | 188 |
| 2.7   | プラズマ酸化                | 193 |
| 2.7.1 | 種々の酸化装置               | 193 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 2.7.2 | プラズマ酸化装置の実際                          | 201 |
|       | 参考文献                                 | 205 |
| 3.    | 半導体集積回路への応用                          | 211 |
| 3.1   | プラズマアッシング                            | 211 |
| 3.1.1 | プラズマによるレジスタアッシングの必要性                 | 211 |
| 3.1.2 | レジスト膜のアッシング速度                        | 212 |
| 3.1.3 | レジストのプラズマエッチング耐性                     | 215 |
| 3.2   | プラズマエッチング                            | 218 |
| 3.2.1 | 最近の技術動向                              | 218 |
| 3.2.2 | 等方性エッチングと異方性エッチング                    | 221 |
| 3.2.3 | Si (poly Si) エッチング                   | 227 |
| 3.2.4 | SiO <sub>2</sub> エッチング               | 228 |
| 3.2.5 | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> エッチング | 230 |
| 3.2.6 | Al および他の金属膜エッチング                     | 231 |
| 3.2.7 | 半導体集積回路への応用                          | 234 |
| 3.3   | プラズマ CVD                             | 238 |
| 3.3.1 | プラズマ CVD シリコン窒化膜                     | 238 |
| 3.3.2 | その他のプラズマ CVD 膜                       | 242 |
| 3.4   | プラズマ酸化                               | 243 |
| 3.4.1 | GaAs 酸化膜の電界効果トランジスタへの応用              | 243 |
| 3.4.2 | 半導体レーザ端面保護膜への効用                      | 252 |
| 3.4.3 | シリコンのプラズマ陽極選択酸化                      | 254 |
| 3.5   | イオンおよびプラズマ状態からの不純物ドーピング              | 259 |
| 3.5.1 | 分子線エピタキシー法におけるイオンドーピング               | 259 |
| 3.5.2 | グロー放電非晶質 Si へのドーピング                  | 265 |
| 3.6   | プラズマアッシュステッドエピタキシー                   | 271 |
| 3.6.1 | PAE の特徴                              | 271 |
| 3.6.2 | PAE の装置                              | 272 |
| 3.6.3 | エピタキシーにおけるプラズマの効果                    | 274 |
| 3.6.4 | PAE のデバイスへの応用                        | 277 |
| 3.7   | ポリマー表面のスパッタエッチ                       | 278 |
| 3.7.1 | スパッタエッチされたポリマー表面の特性                  | 278 |
| 3.7.2 | PTFE フィルムの接着力増大に対する応用                | 281 |
|       | 参考文献                                 | 285 |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 4.    | プラズマプロセスの評価           | 291 |
| 4.1   | アッシング後の残渣             | 291 |
| 4.1.1 | MOS 構造を用いた電気的特性による評価  | 291 |
| 4.1.2 | 残渣の表面観察および IMA による分析  | 294 |
| 4.2   | プラズマエッチングによる損傷        | 296 |
| 4.2.1 | 表面の汚染                 | 297 |
| 4.2.2 | 照射欠陥                  | 308 |
| 4.2.3 | 電気特性                  | 311 |
| 4.2.4 | 今後の問題点                | 314 |
| 4.3   | デバイス作成工程への適用の評価       | 314 |
| 4.3.1 | LSI プロセスとプラズマエッチング工程  | 314 |
| 4.3.2 | エッチング速度の制御            | 318 |
| 4.3.3 | 加工形状の評価               | 320 |
| 4.3.4 | プロセスへの適用例             | 323 |
| 4.4   | レジストの耐プラズマ性とドライ現象     | 326 |
| 4.4.1 | レジストの耐プラズマ性           | 326 |
| 4.4.2 | レジストのドライ現象            | 326 |
| 4.5   | パターン形式とプラズマプロセス       | 332 |
| 4.5.1 | パターン寸法変化              | 332 |
| 4.5.2 | その他の問題                | 335 |
| 4.6   | プラズマ CVD 膜の特性         | 336 |
| 4.6.1 | はじめに                  | 336 |
| 4.6.2 | プラズマ SiN 膜の特性         | 338 |
| 4.6.3 | プラズマ SiON 膜の特性        | 339 |
| 4.6.4 | おわりに                  | 349 |
| 4.7   | 酸化膜の特性                | 349 |
| 4.7.1 | GaAs 酸化膜および MOS 界面の特性 | 349 |
| 4.7.2 | Si 酸化膜の性質             | 359 |
|       | 参考文献                  | 362 |
|       | 索引                    | 369 |