
目次

第2版 原書序文	xiii
第1版 原書序文	xvi
監修者序文	xix
訳者序文	xxi
記号と略語	xxiii
物理定数と変換定数	xxx
実用公式	xxxi
第1章 序論	1
1.1 材料プロセス / 1	
1.2 プラズマとシース / 6	
(1) プラズマ / 6	
(2) シース / 9	
1.3 放電 / 12	
(1) rf ダイオード / 12	
(2) 高密度プラズマ源 / 15	
1.4 記号と単位 / 18	
第2章 プラズマの基礎方程式と平衡状態	21
2.1 はじめに / 21	
2.2 電磁場方程式, 電流, 電圧の式 / 22	
(1) マックスウェルの方程式 / 22	
2.3 保存の方程式 / 24	
(1) ボルツマンの方程式 / 24	
(2) 巨視的諸量 / 26	
(3) 粒子の保存 / 26	
(4) モーメントの保存 / 27	
(5) エネルギーの保存 / 29	

(6) まとめ / 29	
2.4 平衡状態の性質 / 30	
(1) ボルツマンの関係 / 31	
(2) デバイ長 / 32	
(3) 準中性 / 33	
問題 / 33	
第3章 原子との衝突	37
3.1 基本的概念 / 37	
(1) 弾性衝突と非弾性衝突 / 37	
(2) 衝突パラメータ / 37	
(3) 微分散乱断面積 / 39	
3.2 衝突運動論 / 41	
(1) 重心座標 / 41	
(2) エネルギー転移 / 43	
(3) 小角度散乱 / 44	
3.3 弾性散乱 / 46	
(1) クーロン衝突 / 46	
(2) 分極散乱 / 48	
3.4 非弾性衝突 / 52	
(1) 原子エネルギー・レベル / 52	
(2) 電気的雙極放射と準安定原子 / 54	
(3) 電子の電離断面積 / 56	
(4) 電子の励起断面積 / 58	
(5) イオン—原子間の電荷転移 / 58	
(6) イオン—原子間の電離 / 62	
3.5 分布内の平均化と表面効果 / 62	
(1) マックスウェル形分布内の平均化 / 62	
(2) 生成される電子—イオン対当りのエネルギー損失 / 64	
(3) 表面効果 / 65	
問題 / 66	
第4章 プラズマ運動論	69
4.1 粒子の基本的な動き / 69	
(1) 電磁場が一定のときの粒子の運動 / 69	
(2) $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト / 71	
(3) エネルギーの保存 / 72	
4.2 磁場がないときのプラズマ運動 / 73	

(1) プラズマ振動 / 73	
(2) 誘電率と導電率 / 75	
(3) オーム加熱 / 77	
(4) 電磁波 / 78	
(5) 静電波 / 79	
4.3 ガイド中心運動 / 80	
(1) 平行力 / 81	
(2) 磁気モーメントの断熱一定性 / 82	
(3) 磁場に沿う運動によるドリフト (曲率ドリフト) / 83	
(4) 回転によるドリフト (∇B ドリフト) / 83	
(5) 分極ドリフト / 84	
4.4 磁化プラズマの運動論 / 85	
(1) 誘電率テンソル / 86	
(2) 波の分散式 / 88	
4.5 磁化プラズマ内の波動 / 88	
(1) 主要電子波 / 90	
(2) イオン運動を入れた主要波 / 92	
(3) CMA 線図 / 94	
4.6 波動診断 / 95	
(1) インタフェロメータ / 96	
(2) 空洞の摂動 / 98	
(3) 波動伝搬 / 99	
問題 / 100	

第5章 拡散と輸送 105

5.1 基本的関係 / 105	
(1) 拡散と移動度 / 105	
(2) 自由拡散 / 106	
(3) 両極性拡散 / 106	
5.2 拡散方程式の解 / 107	
(1) 境界条件 / 107	
(2) 時間に依存する解 / 108	
(3) 定常状態における拡散方程式の平行平板解 / 109	
(4) 定常状態における拡散方程式の円筒解 / 111	
5.3 低圧力における密度解 / 113	
(1) 可変移動度モデル / 113	
(2) ラングミュア解 / 115	
(3) 発見的解 / 116	

- 5.4 磁場を通しての拡散 / 117
 - (1) 両極性拡散 / 119
 - 5.5 多極磁場による閉じ込め / 121
 - (1) 磁場 / 122
 - (2) プラズマの閉じ込め / 123
 - (3) リーク幅 w / 125
- 問題 / 125

第6章 直流シース

131

- 6.1 基本的概念と基礎方程式 / 131
 - (1) 衝突がないシース / 132
 - 6.2 ボームのシース基準 / 133
 - (1) プラズマの条件 / 134
 - (2) プリシース / 135
 - (3) 浮動電位壁におけるシース電位 / 136
 - (4) 衝突があるシース / 137
 - (5) シミュレーション結果 / 138
 - 6.3 高電圧シース / 139
 - (1) マトリックス・シース / 139
 - (2) チャイルド則シース / 139
 - 6.4 一般化したシース形成基準 / 141
 - (1) 電気的負性ガス / 142
 - (2) 多種類の正性イオン / 144
 - 6.5 衝突がある高電圧シース / 146
 - 6.6 静電探針によるプラズマ診断 / 147
 - (1) シース内に衝突がない場合の平板状探針 / 149
 - (2) エネルギー分布が非マクスウェル形の電子 / 150
 - (3) シース内に衝突がない円筒状探針 / 152
 - (4) 二重探針と熱電子放出探針 / 155
 - (5) 衝突の効果と DC 磁場の効果 / 157
 - (6) 探針構成と探針回路 / 158
 - (7) 時間的に変化する電場内の探針 / 159
- 問題 / 161

第7章 化学反応と平衡状態

165

- 7.1 はじめに / 165
- 7.2 エネルギーとエンタルピー / 166
- 7.3 エントロピーとギブスの自由エネルギー / 171

- (1) エントロピー / 171
 - (2) ギブスの自由エネルギー / 173
 - 7.4 化学的平衡状態 / 175
 - (1) 圧力変化と温度変化 / 178
 - 7.5 均一系の平衡状態 / 179
 - (1) 相間の平衡状態 / 179
 - (2) 表面における平衡状態 / 182
- 問題 / 183

第8章 分子との衝突

187

- 8.1 はじめに / 187
- 8.2 分子構造 / 187
 - (1) 振動運動と回転運動 / 188
 - (2) 光放射 / 190
 - (3) 負性イオン / 192
- 8.3 電子と分子の衝突 / 193
 - (1) 解離 / 193
 - (2) 解離電離 / 195
 - (3) 解離再結合 / 195
 - (4) 水素の例 / 196
 - (5) 解離電子付着 / 196
 - (6) 極解離 / 199
 - (7) 準安定な負イオン / 200
 - (8) 電子衝撃離脱 / 200
 - (9) 振動励起と回転励起 / 200
 - (10) 弾性散乱 / 201
- 8.4 重い粒子の衝突 / 201
 - (1) 共振電荷転移と非共振電荷転移 / 202
 - (2) 正イオンと負イオンの再結合 / 204
 - (3) 結合離脱 / 205
 - (4) 励起転移 / 207
 - (5) 化学結合体の再配置 / 209
 - (6) イオン-中性粒子の弾性散乱 / 209
 - (7) 3体プロセス / 210
- 8.5 反応レートと詳細バランス / 210
 - (1) 温度依存性 / 211
 - (2) 詳細バランスの原理 / 212
 - (3) 酸素のデータ / 214

- 8.6 光放射と放射エネルギー測定 (アクチノメトリー) / 215
 (1) 光放射 / 218
 (2) 光放射エネルギー測定 / 219
 (3) O 原子の光放射エネルギー測定 / 220
 問題 / 222

第9章 化学運動論と表面プロセス 227

- 9.1 基本反応 / 227
 (1) 平衡定数との関係 / 229
 9.2 気相運動論 / 230
 (1) 1 次の連続反応 / 230
 (2) 対抗反応 / 232
 (3) 光子放出による2分子結合 / 233
 (4) 3体結合 / 234
 (5) 3体正イオン-負イオン再結合 / 236
 (6) 3体電子-イオン再結合 / 237
 9.3 表面プロセス / 237
 (1) 正イオンの中和と2次電子放出 / 238
 (2) 吸着と離脱 / 240
 (3) 破片化 / 244
 (4) スパッタリング / 244
 9.4 表面運動 / 247
 (1) 中性粒子の拡散 / 247
 (2) 拡散による気相分子の損失レート / 248
 (3) 吸着と離脱 / 250
 (4) 解離吸着と結合離脱 / 250
 (5) 物理吸着 / 251
 (6) 表面との反応 / 251
 (7) 表面上の反応 / 251
 (8) 表面運動論と損失確率 / 252
 問題 / 253

第10章 放電中の粒子バランスおよびエネルギー・バランス 259

- 10.1 はじめに / 259
 10.2 電氣的正性プラズマの平衡状態 / 261
 (1) 基本的性質 / 261
 (2) 密度が様な放電モデル / 264
 (3) 密度が不均一な放電モデル / 267

- (4) 中性ラジカルの発生と損失 / 268
 10.3 電氣的負性プラズマの平衡状態 / 270
 (1) 微分方程式 / 271
 (2) 負イオンに対するボルツマンの平衡条件 / 274
 (3) 粒子保存の方程式 / 276
 (4) 単純化した方程式の有効性 / 276
 10.4 近似的な電氣的負性平衡状態 / 278
 (1) グローバル・モデル / 278
 (2) 圧力が低い場合の2次関数近似 / 281
 (3) 圧力が比較的高い場合のフラット・トップ・モデル / 284
 10.5 電氣的負性放電に関する実験とシミュレーション / 285
 (1) 酸素放電 / 285
 (2) 塩素放電 / 291
 10.6 パルス放電 / 294
 (1) パルス動作の電氣的正性放電 / 295
 (2) パルス動作の電氣的負性放電 / 299
 (3) 中性ラジカルの運動 / 302
 問題 / 304

第11章 容量性放電 309

- 11.1 一様密度モデル / 310
 (1) プラズマ・アドミッタンス / 311
 (2) シース・アドミッタンス / 312
 (3) 粒子バランスとエネルギー・バランス / 314
 (4) 放電パラメータ / 317
 11.2 不均一密度モデル / 319
 (1) 衝突がないときのシースの運動 / 319
 (2) チャイルド則 / 321
 (3) シース容量 / 322
 (4) オーム加熱量 / 323
 (5) 統計加熱量 / 323
 (6) 自己整合モデルの方程式 / 324
 (7) 比例則 / 327
 (8) 衝突があるシース / 328
 (9) rf 電圧が低電圧および中間電圧の場合 / 329
 (10) シース内のオーム加熱 / 330
 (11) 自己整合的な無衝突加熱モデル / 330
 (12) 2周波放電と高周波放電 / 332

(13) 電氣的負性プラズマ / 333	
11.3 実験と模擬計算 / 334	
(1) 実験結果 / 334	
(2) PIC シミュレーション / 338	
(3) 2次電子の役割 / 341	
(4) モデル化の意義 / 342	
11.4 非対称放電 / 343	
(1) 容量性電圧分割器 / 343	
(2) 球殻モデル / 344	
11.5 低周波数の rf シース / 346	
11.6 電極におけるイオン衝撃エネルギー / 351	
11.7 磁気強化放電 / 356	
11.8 整合回路網と電力測定 / 360	
(1) 整合回路網 / 360	
(2) 電力測定 / 363	
問題 / 364	

第 12 章 誘導性放電

367

12.1 高密度、低圧力放電 / 367	
(1) 誘導性プラズマ源の構造 / 368	
(2) 電力吸収と動作領域 / 369	
(3) 放電動作と結合 / 370	
(4) 整合回路網 / 373	
12.2 他の動作領域 / 374	
(1) 低密度動作 / 374	
(2) 容量性結合 / 375	
(3) ヒステリシスと不安定動作 / 376	
(4) 電力伝達効率 / 379	
(5) 正確な解 / 379	
12.3 平面状コイル / 380	
12.4 ヘリカル共振器放電 / 384	
問題 / 388	

第 13 章 電磁波加熱放電

391

13.1 電子サイクロトロン共振 (ECR) 放電 / 391	
(1) ECR 放電の特性と形状 / 391	
(2) 電子加熱 / 396	
(3) 共振波の吸収 / 399	

(4) モデル化とシミュレーション / 404	
(5) プラズマの拡大 / 404	
(6) 測定 / 407	
13.2 ヘリコン放電 / 408	
(1) ヘリコン・モード / 409	
(2) アンテナ結合 / 412	
(3) ヘリコン・モードの吸収 / 414	
(4) 中性ガスの枯渇 / 418	
13.3 表面波放電 / 420	
(1) 平面状の表面波 / 421	
(2) 円筒形の表面波 / 422	
(3) 電力バランス / 423	
問題 / 424	

第 14 章 直流放電

427

14.1 グロー放電の定性的特性 / 427	
(1) 陽光柱 / 427	
(2) カソード・シース / 428	
(3) 負グローとファラデー暗部 / 429	
(4) アノード降下 / 429	
(5) 他の効果 / 429	
(6) スパッタリングと他の形状 / 430	
14.2 陽光柱の解析 / 430	
(1) T_e の計算 / 431	
(2) E と n_0 の計算 / 432	
(3) 運動論的效果 / 433	
14.3 カソード領域の解析 / 433	
(1) 真空の絶縁破壊 / 434	
(2) カソード・シース / 436	
(3) 負グローおよびファラデー暗部 / 438	
14.4 ホロー・カソード放電 / 440	
(1) 簡単な放電モデル / 441	
(2) ホロー・カソード放電における金属蒸気の生成 / 443	
14.5 平面マグネトロン放電 / 446	
(1) グロー放電スパッタリング源の限度 / 446	
(2) マグネトロン形状 / 448	
(3) 放電モデル / 448	
14.6 電離 PVD / 451	

問題 / 454

第 15 章 エッチング

457

15.1 エッチングの要求事項とプロセス / 457

- (1) プラズマ・エッチングの要求事項 / 457
- (2) エッチング・プロセス / 461

15.2 エッチング運動論 / 464

- (1) 表面運動論 / 464
- (2) 放電運動論とローディング効果 / 467
- (3) 化学的枠組み / 469

15.3 ハロゲン原子によるシリコンのエッチング / 470

- (1) F 原子による純化学的エッチング / 470
- (2) イオン・エネルギーで駆動した F 原子のエッチング / 473
- (3) CF_4 放電 / 475
- (4) 材料ガスへの O_2 および H_2 の添加 / 478
- (5) Cl 原子によるエッチング / 480

15.4 他のエッチング系 / 481

- (1) F および CF_x による SiO_2 のエッチング / 481
- (2) Si_3N_4 のエッチング / 483
- (3) アルミニウムのエッチング / 483
- (4) 銅のエッチング / 484
- (5) レジストのエッチング / 485

15.5 基板のチャージング / 487

- (1) ゲート酸化膜の損傷 / 487
- (2) アースした基板 / 488
- (3) 不均一なプラズマ / 489
- (4) エッチング中の過渡的損傷 / 491
- (5) 電子遮蔽効果 / 491
- (6) rf バイアス / 493
- (7) エッチング形状の歪 / 495

問題 / 495

第 16 章 デポジションとイオン注入

499

16.1 はじめに / 499

16.2 プラズマ支援形の CVD / 501

- (1) アモルファス・シリコン / 502
- (2) 二酸化シリコン / 504
- (3) 窒化シリコン / 508

16.3 スパッタ・デポジション / 508

- (1) 物理的スパッタリング / 508
- (2) 反応性スパッタリング / 510

16.4 プラズマ界浸形イオン注入 (PIII) / 512

- (1) 無衝突のシース・モデル / 514
- (2) 衝突があるシース・モデル / 518
- (3) PIII の材料プロセスへの応用 / 521

問題 / 523

第 17 章 ダストがあるプラズマ

525

17.1 現象の定性的説明 / 525

17.2 粒子のチャージングと放電の平衡状態 / 526

- (1) 平衡状態における電位と電荷 / 526
- (2) 放電の平衡状態 / 531

17.3 微粒子の平衡状態 / 533

17.4 ダスト粒子の形成と成長 / 535

17.5 物理現象と診断 / 540

- (1) 密結合プラズマ / 541
- (2) ダスト音響波 / 541
- (3) 被駆動微粒子の動き / 542
- (4) レーザ光の散乱 / 543

17.6 微粒子の除去あるいは生産 / 544

問題 / 546

第 18 章 放電の運動理論

549

18.1 基本的概念 / 549

- (1) 2 項近似 / 549
- (2) クルークの衝突演算子 / 550
- (3) 衝突があるときの 2 項運動方程式 / 550
- (4) 拡散と移動度 / 553
- (5) Druyvesteyn 分布 / 553
- (6) rf 電場内の電子分布 / 554
- (7) 実効電気伝導率 / 555

18.2 局部的運動 / 556

18.3 非局部的運動 / 560

18.4 準線形拡散と統計加熱 / 564

- (1) 準線形拡散係数 / 565
- (2) 統計加熱量 / 567

- (3) 速度キック・モデルとの関係 / 568
- (4) 2項運動方程式 / 568
- 18.5 表皮深さ層内のエネルギー拡散 / 570
 - (1) 統計加熱 / 570
 - (2) 実効衝突頻度 / 572
 - (3) エネルギー分布 / 572
- 18.6 放電の運動論的モデル化 / 574
 - (1) 非マックスウェル形のグローバル・モデル / 574
 - (2) 誘導性放電 / 576
 - (3) 容量性放電 / 578
- 問題 / 581

付録 583

- 付録 A 衝突運動 / 583
 - (1) クーロン断面積 / 585
- 付録 B 衝突積分 / 585
 - (1) ボルツマンの衝突積分 / 585
 - (2) マックスウェル形分布 / 586
- 付録 C 可変移動度モデルの拡散解 / 587

参考文献 591

索引 605