

目 次

1. プラズマの性質と計測

1.1 プラズマの基本的性質	1
1.1.1 プラズマの条件	1
1.1.2 プラズマの密度と温度	2
1.1.3 デバイ長——荷電分離の特性的長さ	3
1.1.4 プラズマ周波数——荷電分離の特性時間	5
1.1.5 サイクロトロン周波数	5
1.2 プラズマ計測のカテゴリーについて	6
引用・参考文献	8

2. プローブ測定の実理と実際

2.1 静電プローブ	9
2.1.1 プローブ法の原理	9
2.1.2 プラズマパラメータの決定法	12
2.1.3 シー ス	15
2.1.4 より複雑な系での測定	17
2.1.5 各種プローブ	21
2.1.6 プローブ測定法の諸問題	24
2.1.7 ま と め	26
2.2 高周波プローブ	26
2.2.1 レゾナンスプローブ	26

2.2.2 プラズマ振動プローブ	27
2.2.3 表面波プローブ	29
2.3 磁気プローブ	32
2.3.1 磁気プローブによる磁場測定	33
2.3.2 ロゴスキーコイルによる電流測定	36
2.3.3 核融合研究で使用する電磁誘導を利用したおもな計測法	37
2.3.4 ま と め	39
引用・参考文献	40

3. マイクロ波測定

3.1 プラズマ中の電磁波伝搬	42
3.1.1 基 礎 方 程 式	42
3.1.2 磁界のない場合の伝搬	44
3.1.3 磁界のあるプラズマ中の伝搬	44
3.1.4 温かいプラズマの誘電率	47
3.2 干渉法・反射法による電子密度測定	48
3.2.1 透 過 干 渉 法	48
3.2.2 反 射 法	55
3.3 サイクロトロン放射による電子温度測定	63
3.3.1 サイクロトロン放射	64
3.3.2 サイクロトロン放射のスペクトルとプラズマの分散効果	67
3.3.3 サイクロトロン放射測定法	70
引用・参考文献	76

4. 分光測定の基礎と応用

4.1 プラズマ分光の原理	78
---------------------	----

4.1.1	衝突・放射モデル	81
4.1.2	電離平衡プラズマ	84
4.1.3	電離進行プラズマ	89
4.1.4	再結合プラズマ	91
4.2	分光測定の実際	93
4.2.1	分 光 器	93
4.2.2	光学系とアラインメント	95
4.2.3	波長、感度校正	96
4.2.4	スペクトル線の同定	97
4.3	プロセスプラズマの分光測定	99
4.3.1	分子のエネルギー準位構造と発光スペクトル	100
4.3.2	プロセスプラズマの発光状態と発光強度	103
4.3.3	発光強度の解釈	105
4.3.4	アクチノメトリー法	106
4.3.5	多種類の希ガスの発光を利用した電子温度の推定	109
4.3.6	バイアス光プローブ法	111
4.3.7	発光分光法によるガス温度の測定	112
4.4	高温プラズマからの放射と分光測定	116
4.4.1	高温プラズマからの放射	116
4.4.2	高温プラズマの分光測定	119
	引用・参考文献	129

5. レーザ測定の実用

5.1	レーザ吸収法	132
5.1.1	吸収分光法の原理	132
5.1.2	吸収分光法の感度	134
5.1.3	吸 収 の 飽 和	135
5.1.4	近赤外～紫外領域のレーザ吸収分光	136
5.1.5	赤外レーザ吸収分光	137

5.1.6	多原子分子の回転準位と回転分配関数	139
5.1.7	共振器を利用する吸収分光の高感度化	142
5.1.8	線スペクトル光源および連続スペクトル光源による吸収分光	144
5.2	レーザ干渉法	145
5.2.1	干渉法の測定原理	146
5.2.2	レーザ波長の選択	147
5.2.3	レーザ干渉計による位相測定	149
5.2.4	偏光計測法	153
5.3	レーザトムソン散乱法	154
5.3.1	概要と歴史的経緯	154
5.3.2	サルペータパラメータ α による散乱領域の分類	155
5.3.3	非協同トムソン散乱実験	158
5.3.4	協同トムソン散乱実験	163
5.4	レーザ誘起蛍光法	163
5.4.1	概 要	163
5.4.2	粒子密度計測	165
5.4.3	電界計測	169
	引用・参考文献	172

6. 粒子測定の実理と実際

6.1	粒子測定の実理	174
6.1.1	静電型エネルギー分析器	177
6.1.2	磁場と電場を併用するイオン計測法	181
6.2	質量分析法によるイオン、中性粒子測定	183
6.2.1	磁場偏向型質量分析器	183
6.2.2	飛行時間型質量分析器	185
6.2.3	四重極型質量分析器	186
6.3	高速中性粒子の計測	195

6.3.1 高速中性粒子の発生過程	196
6.3.2 高速中性粒子発生量の評価	197
6.3.3 高速中性粒子のプラズマ中での減衰と積分効果	199
6.3.4 質量/エネルギー分析器	201
6.3.5 計測および分析器設計の注意点	204
引用・参考文献	204

7. ビームプローブ法の高温プラズマへの応用

7.1 ビームプローブ法の原理	206
7.1.1 は じ め に	206
7.1.2 相互作用の素過程と測定物理量	207
7.1.3 プラズマ中のビームの輸送	211
7.1.4 信 号 レ ベ ル	212
7.1.5 プローブビーム源	212
7.1.6 検 出 器	215
7.2 重イオンビームプローブ	217
7.2.1 測 定 原 理	217
7.2.2 ハードウェア	220
7.2.3 応 用 例	224
7.3 ビームプローブ分光法	226
7.3.1 電子密度測定	226
7.3.2 電子温度測定	230
7.3.3 磁 場 測 定	231
7.4 ビームプローブ・レーザ分光	233
7.4.1 磁 場 測 定	234
7.4.2 電 場 測 定	236
引用・参考文献	236

8. 各種プロセスプラズマの実測例

8.1 低誘電率薄膜のエッチングにおけるラジカル計測	238
8.1.1 は じ め に	238
8.1.2 実 験	241
8.1.3 有機系低誘電率膜 (FLARE) エッチングとその気相診断	242
8.1.4 ラジカル密度比・基板温度制御による有機膜 (FLARE) の エッチング	246
8.1.5 有機系低誘電率膜 (FLARE) エッチングにおける N および H ラジカル役割	249
8.1.6 ま と め	252
8.2 大面積 DLC 膜, ダイヤモンド膜形成プラズマの測定	252
8.2.1 大面積 DLC 膜成膜用マイクロ波プラズマの測定	254
8.2.2 ダイヤモンド膜作製用マイクロ波プラズマの測定	261
8.3 アモルファスシリコン薄膜堆積用プラズマの診断	267
8.3.1 ラジカル計測	267
8.3.2 微 粒 子 計 測	274
8.4 高気圧マイクロプラズマの診断	282
8.4.1 は じ め に	282
8.4.2 高気圧プラズマの特徴	283
8.4.3 高気圧プラズマの診断における要点	285
8.4.4 高気圧プラズマにおける診断の実例	288
8.4.5 お わ り に	299
引用・参考文献	299

9. 核融合プラズマ測定の実際

9.1 電子温度計測	303
------------------	-----

9.1.1 静電プローブを用いた電子温度計測	304
9.1.2 X線波高分析装置による電子温度計測	305
9.1.3 トムソン散乱計測法を用いた電子温度計測	306
9.1.4 電子サイクロトロン放射計測	310
9.2 電子密度計測	311
9.2.1 静電プローブを用いた電子密度計測	313
9.2.2 トムソン散乱を用いた電子密度計測	314
9.2.3 干渉計測法を用いた電子密度計測	315
9.2.4 偏光計測を用いた電子密度計測	317
9.3 イオン温度計測	319
9.3.1 核融合プラズマにおけるイオン温度計測	319
9.3.2 ヘリウム様イオンとエネルギー準位	321
9.3.3 分光器	323
9.3.4 X線, 真空紫外および可視域のイオン温度計測の実例	324
9.4 プラズマ電位・回転計測	326
9.4.1 プラズマ電位計測・回転計測(荷電交換分光法)	326
9.4.2 荷電交換分光法	327
9.4.3 荷電交換分光で利用する水素様イオンのスペクトル微細構造	328
9.4.4 荷電交換分光法による回転速度計測	332
9.4.5 HIBPで計測された電場と荷電交換分光で計測された電場との比較	334
9.5 プラズマ内部磁場・電流分布計測	336
9.5.1 プラズマ内部磁場の計測	336
9.5.2 モーショナルシュタルク分光	336
9.5.3 分光器と直線偏光子(ポーライザ)を使った モーショナルシュタルク分光	338
9.5.4 干渉フィルタと光弾性変調器を使った モーショナルシュタルク分光	341
9.5.5 モーショナルシュタルク分光による磁場の ピッチ角度分布の測定例	344
9.6 プラズマ揺動計測	345
9.6.1 電磁波の散乱, 屈折による密度揺動測定	345
9.6.2 マイクロ波反射計による密度揺動測定	348

x 目 次

9.6.3	ビーム放射分光法による密度揺動測定	349
9.6.4	相関放射計による電子温度揺動測定	349
9.6.5	磁場揺動の測定	350
9.6.6	軟 X 線, 制動放射測定	351
9.7	核反応プラズマの計測	351
9.7.1	中性子計測	354
9.7.2	アルファ粒子の計測	360
引用・参考文献		362
付	録	365
索	引	373

