



# I 編 電子・イオンの発生と制御

菅田 栄 治 (1, 2・1, 2・2・3,  
2・3, 8)  
中村 勝 吾 (2・2・1, 3・5, 3・  
7・1)  
永見 剛 一 (2・2・2, 2・2・3)  
来住 徹 (2・2・2, 8)  
西田 準 (2・3)  
上山 善 司 (2・4)  
浜田 博 (2・4, 7)

高木 俊 宜 (3・1, 3・3, 3・6,  
3・8)  
小浜 太 郎 (3・2, 3・4)  
埴 輝 雄 (3・7・2)  
金谷 光 一 (4・1, 8)  
川勝 久 三 (4・2)  
小楠 千 早 (5)  
裏 克 己 (1・15, 6, 8・4)  
松本 隆 (9)

## 目 次

### 1. 荷電粒子の軌道論 (荷電粒子幾何光学)

1.1 総説.....1	1.9 静電磁界の表現式 .....8
1.2 ビームを形成するための電磁界系.....1	1.10 直角座標系で表わされる電磁界中 の軌道方程式 .....9
1.3 静電磁界中の荷電粒子の運動方程式...2	1.11 回転対称な静電磁界中の荷電粒子 の軌道方程式.....11
1.4 荷電粒子の加速.....3	1.12 線形微分方程式の不変量.....12
1.5 変分原理の式.....4	1.13 近軸軌道方程式によるレンズ作用 の説明.....13
1.6 静電磁界中の荷電粒子に対する ラグランジュ関数.....5	1.14 電子レンズの焦点距離の近似公式...14
1.7 荷電粒子の静電磁界中における軌道 の屈折率.....5	1.15 収差.....16
1.8 荷電粒子の軌道方程式.....7	

### 2. 電 子 銃

2.1 総説 .....21	2.3 強電界電子放出型 .....55
2.2 熱陰極型 .....21	2.3.1 強電界電子放出現象 .....55
2.2.1 熱陰極 .....21	2.3.2 針状陰極とその処理方法 .....56
2.2.2 クロスオーバを作る形式の電子銃 ...27	2.3.3 強電界電子放出型電子銃の設計 .....61
2.2.3 ピアス型電子銃 .....42	2.3.4 薄膜型電界電子放出陰極 .....64

2.4 プラズマ電子銃 .....	64	2.4.3 プラズマ電子銃の電源 .....	71
2.4.1 プラズマ電子銃の原理 .....	64	2.4.4 改善の試み .....	72
2.4.2 プラズマ電子銃の設計 .....	66		

### 3. イオン銃

3.1 総説 .....	73	3.5 電界電離型 .....	99
3.1.1 イオンの発生と引出し .....	73	3.5.1 原理とその特性 .....	99
3.1.2 イオン銃の性能 .....	75	3.5.2 使用上の制限および問題点 .....	100
3.1.3 イオン化しようとする元素の導入 法 .....	77	3.6 ビーム・プラズマ型 .....	101
3.2 RF型 .....	81	3.7 表面電離型 .....	106
3.2.1 イオンビームの引出部 .....	82	3.7.1 表面電離の原理とイオン放出特性 .....	107
3.2.2 RF型イオン銃の特性 .....	84	3.7.2 表面電離型イオン銃の実例 .....	108
3.2.3 プロトン比、重イオンビーム .....	87	3.8 その他のイオン銃 .....	112
3.3 PIG型, 電子衝撃型, 電子振動 型 .....	87	3.8.1 スパッタリング型 .....	112
3.4 デュオプラズマ型 .....	91	3.8.2 マイクロ波放電型 .....	114
3.4.1 イオン銃の特性 .....	93	3.8.3 デュオプラズマ型と他方式との混 合型 .....	115
3.4.2 イオン銃の輝度 .....	96	3.8.4 レーザ照射型 .....	116
3.4.3 負イオンビーム, 重イオンビーム .....	97		

### 4. レンズ

4.1 回転対称型レンズ .....	119	電子光学系 .....	137
4.1.1 磁界型電子レンズ .....	119	4.2 4極子型レンズ .....	140
4.1.2 電界型電子レンズ .....	123	4.2.1 4極子レンズのポテンシャル分布 .....	141
4.1.3 電子レンズの収差 .....	129	4.2.2 4極子レンズの電子光学的特性 .....	143
4.1.4 非点収差補償 .....	133	4.2.3 多段4極子レンズ系 .....	145
4.1.5 マイクロ電子ビームを得るための			

### 5. 偏向

5.1 均一電界による偏向 .....	152	5.4 偏向速度の上限値 .....	156
5.2 均一磁界による偏向 .....	154	5.5 大角度偏向 .....	157
5.3 実際の偏向系 .....	155		

## 6. ビーム径および電流密度に影響をもつ諸因子

6.1 空間電荷効果.....159	6.2.4 正イオンの存在による電子ビーム の不安定 .....166
6.1.1 空間電荷界の発散作用 .....159	6.3 初速度分布の効果.....166
6.1.2 最小ビーム径 .....160	6.3.1 熱初速度分布による電流密度の上 限值 .....166
6.1.3 空間電荷効果の大きいビームの集束 .....161	6.3.2 他の電子源・イオン源における初 速度分布 .....168
6.2 電子ビーム空間電荷の正イオンに よる中和.....162	6.3.3 断面内での電流密度分布（収差の ないとき）.....169
6.2.1 電子の空間電荷による正イオン ラップ .....163	6.4 最小ビーム径および最大電流密度...170
6.2.2 臨界圧力 $P_c$ .....164	6.5 二次電子放出の効果.....173
6.2.3 イオン中和の条件.....165	

## 7. 荷電粒子軌道の数値計算と電極設計

7.1 電磁界の数値計算法.....176	7.2.1 近軸軌道の数値計算.....186
7.1.1 電磁界を支配する方程式の近似差 分式 .....176	7.2.2 収差の数値計算 .....190
7.1.2 電磁界の近似差分式の解法 .....180	7.2.3 一般の荷電粒子の運動方程式の数 値計算 .....190
7.1.3 差分法による電磁界計算の 誤差 .....184	7.3 空間電荷制限荷電粒子ビームの数 値解析.....193
7.1.4 電磁界の数値計算に用いられる種 々な技法 .....184	7.3.1 計算方法の概略 .....193
7.2 荷電粒子軌道の数値計算法.....185	7.3.2 計算方法の詳細 .....194
	7.3.3 応用例 .....197

## 8. ビーム系の測定

8.1 電子ビームスポット径および電流 密度分布の測定.....199	8.2 電子・イオンビームの動径方向速 度成分および位相図の測定.....206
8.1.1 けい光物質および写真乾板の利用...199	8.2.1 動径方向速度成分の測定 .....206
8.1.2 コンタミネーション法 .....200	8.2.2 位相図の測定 .....206
8.1.3 フォトリジスト法.....201	8.3 電子・イオンビームのエネルギー および速度成分の測定.....209
8.1.4 シャープエッジ法.....202	8.3.1 減速電界法 .....209
8.1.5 スリットやピンホールを用いる方 法.....202	8.3.2 電界型レンズを用いた高速電子の エネルギー分布測定.....210
8.1.6 陰影顕微鏡法 .....204	

8.3.3	電界型プリズムを用いる方法	.....210
8.3.4	磁界型プリズムを用いる方法	.....212
8.3.5	ソレノイドを用いたスペクトロメータ	.....213

8.3.6	ウィーンフィルタを用いる方法	...216
8.4	質量分析	.....217
8.4.1	静電磁界偏向による質量分析	.....217
8.4.2	高周波電界による質量分析	.....218

## 9. 真空技術

9.1	差動排気	.....221
9.2	ガスの導入	.....222
9.2.1	ガス導入の一般的方法	.....222
9.2.2	ガス流量の調節	.....224
9.3	真空室内への電気・液体・運動の導入およびのぞき窓	.....226
9.3.1	電気導入端子	.....226
9.3.2	液体導入端子	.....227
9.3.3	回転導入端子	.....227
9.3.4	のぞき窓	.....229
9.4	真空室内での回転運動の伝達・電氣的接触	.....229
9.4.1	回転機構に用いる潤滑剤, ベアリ	

	ング, 歯車	.....229
9.4.2	電氣的接触 (回転摺動面)	.....23 <sup>2</sup>
9.5	真空室内での加熱・冷却	.....233
9.5.1	加熱用発熱体と熱絶縁材	.....233
9.5.2	冷却	.....236
9.6	真空用物質の放出ガス	.....237
9.6.1	材質, 処理法による放出ガス	.....237
9.6.2	電子, イオンの衝撃による放出ガス	.....237
9.7	真空度の測定および漏れさがし	.....240
9.7.1	真空計の種類と信頼度	.....240
9.7.2	漏れさがし	.....241
9.8	真空系の汚染	.....243





## Ⅱ編 電子・イオンビームの物質への 効果とその応用

難波進	(10・1, 10・2, 18, 21・1)
菅田栄治	(10・1)
後藤田正夫	(10・3, 16)
柴田幸男	(10・4)
金谷光一	(10・4, 10・7, 15)
棟方忠輔	(10・5)
犬石嘉雄	(10・6)
白藤純嗣	(10・6)
宮崎俊行	(10・8)
賀集誠一郎	(11)
荒田吉明	(12・1)
黒田秀郎	(12・2)
永田穰	(13)

谷口紀男	(14・1~14・3)
柴田信治	(14・4)
戸村光一	(17・1, 17・3)
木村博一	(17・2)
塙輝雄	(17・4)
川辺光央	(18)
谷井靖夫	(19)
坂入英雄	(20)
谷田和雄	(21・2)
伊藤糾次	(21・3)
升田公三	(21・4, 22・1)
徳山巍	(21・4)
田村一二三	(22・2)
渡辺清	(参考資料)

### 目次

## 10. 電子・イオンビームの物質への効果

10・1 総説	247	10・4・1 二次電子放出	257
10・1・1 電子ビームと固体との相互作用	247	10・4・2 オージェ電子放出	266
10・1・2 イオンビームと固体との相互作用	248	10・4・3 イオン衝撃による二次放出	267
10・2 X線, けい光, りん光	249	10・5 衝撃導電と起電力	269
10・2・1 X線	249	10・5・1 電子・正孔対の発生に要するエネルギー	269
10・2・2 けい光, りん光	250	10・5・2 衝撃導電現象	270
10・3 化学変化	252	10・5・3 起電力	271
10・3・1 電子・イオンビームによる化学変化の初期過程	252	10・6 格子欠陥	273
10・3・2 イオンビームの種類と反応効果	254	10・6・1 格子欠陥の種類	273
10・3・3 線量率効果	256	10・6・2 格子欠陥の効果	275
10・4 二次電子放出とオージェ電子放出	257	10・6・3 格子欠陥の構造	277
		10・6・4 格子欠陥の分布	278
		10・7 熱の発生	279

10.8 熱の伝達 .....	286	10.8.4 半無限体表面にビームを移動させる場合 .....	289
10.8.1 一様に加熱された半無限体の熱伝達 .....	286	10.8.5 パルスビームによる加熱 .....	290
10.8.2 局所的に加熱された半無限体の熱伝達 .....	287	10.8.6 ビームの浸透を考える場合 .....	291
10.8.3 有限円柱試料における熱伝達 .....	289	10.8.7 相変化 .....	293

## 11. 電子ビーム溶解

11.1 電子ビーム溶解の特徴 .....	295	11.3.2 純度の向上 .....	299
11.2 電子ビーム溶解炉の機構 .....	296	11.3.3 合金元素の配合 .....	300
11.2.1 電子銃系 .....	296	11.3.4 新しいステンレス鋼の溶解 .....	300
11.2.2 真空排気系 .....	297	11.4 今後の電子ビーム溶解の発展 .....	302
11.2.3 溶解炉付属機構 .....	297	11.4.1 溶解炉の大型化 .....	302
11.2.4 電源 .....	298	11.4.2 真空鑄造炉用加熱源 .....	302
11.3 電子ビーム溶解例 .....	298	11.4.3 プラズマ電子ビーム加熱源 .....	303
11.3.1 溶解能力 .....	298		

## 12. 電子ビーム溶接

12.1 電子ビーム溶接の基礎 .....	305	12.1.5 溶接用電子銃 .....	319
12.1.1 溶接熱源の一般的性格 .....	305	12.1.6 電子ビーム溶接の基礎的性質 .....	322
12.1.2 熱源用電子ビームの特性 .....	307	12.2 電子ビーム溶接の応用 .....	333
12.1.3 電子ビーム照射時におけるビームパワー変換 .....	312	12.2.1 電子ビーム溶接装置 .....	333
12.1.4 気体中の電子ビーム .....	315	12.2.2 応用例 .....	339

## 13. 電子ビーム蒸着

13.1 電子ビーム蒸着の特徴 .....	349	13.6.1 イオンゲージ型モニタによる蒸発速度制御法 .....	356
13.2 電子ビーム加熱の特徴 .....	349	13.6.2 水晶振動子モニタによる蒸発速度制御法 .....	357
13.3 逆散乱電子の影響 .....	349	13.7 電子ビーム蒸着の実例 .....	357
13.4 電子ビームによる蒸発源の加熱 .....	351	13.7.1 タンタル蒸着 .....	357
13.5 電子ビーム加熱法と装置 .....	351	13.7.2 ニクロム蒸着 .....	357
13.5.1 材料陽極型電子ビーム加熱法 .....	351	13.8 蒸着用電子銃 .....	359
13.5.2 電子銃型電子ビーム加熱法 .....	353		
13.6 蒸発速度制御法 .....	356		

## 14. 電子ビーム加工

14.1 加工装置 .....	361	14.3.1 電子銃の寿命および精度 .....	371
14.2 加工工具としての電子ビームの特 徴 .....	362	14.3.2 高真空中作業 .....	371
14.2.1 微小ビーム径 .....	362	14.3.3 電子ビームの径および位置の決 定 .....	371
14.2.2 局部高温加熱性 .....	363	14.3.4 X線の発生 .....	372
14.2.3 電子飛程と深部貫入性 .....	368	14.3.5 加工パラメータの制御困難性 .....	372
14.2.4 高速制御性, 高精度位置決め .....	370	14.3.6 絶縁材料, ぜい性材料の処理 .....	372
14.3 電子ビーム加工における問題点 .....	370	14.4 電子ビーム加工の実施例 .....	373

## 15. 電子ビーム露光と記録

15.1 電子ビーム露光特性 .....	385	15.4 電子ビーム描画装置 .....	394
15.2 電子ビーム露光 .....	388	15.5 電子ビーム記録 .....	395
15.2.1 最適加速電圧 .....	388	15.6 電子ビーム録画 .....	396
15.2.2 電子ビーム露光装置 .....	389	15.7 電子ビームカラー録画 .....	398
15.3 電子ビーム露光の応用 .....	392		

## 16. 電子ビーム重合硬化

16.1 低圧モノマー蒸気の電子ビーム 重合 .....	401	16.2.1 電子ビーム硬化 の特徴 .....	404
16.1.1 重合の機構 .....	401	16.2.2 電子ビーム硬化性樹脂 .....	405
16.1.2 マイクロ回路への応用 .....	403	16.2.3 電子ビーム硬化の問題点 .....	406
16.2 樹脂膜の電子ビーム硬化 .....	404	16.2.4 電子ビーム硬化の実際 .....	408

## 17. 電子ビームプローブ

17.1 走査電子顕微鏡 .....	411	17.2.2 装置の概要 .....	418
17.1.1 原理 .....	411	17.3 X線マイクロアナライザ .....	419
17.1.2 特徴 .....	412	17.3.1 装置の概要 .....	419
17.1.3 性能 .....	412	17.3.2 使用法 .....	422
17.1.4 応用 .....	415	17.4 オージェ電子分光器 .....	425
17.2 フィールドエミッション型走査電 子顕微鏡 .....	417	17.4.1 装置の概要 .....	425
17.2.1 電子銃 .....	417	17.4.2 使用上の注意 .....	428

## 18. 電子ビーム励起レーザー

18.1 レーザ発振のしきい値 .....	433	18.3.1 紫外線レーザー .....	435
18.2 実験装置 .....	434	18.3.2 III-V化合物レーザー .....	435
18.3 各種の電子ビーム励起レーザー .....	435	18.3.3 II-VI化合物レーザー .....	436

## 19. イオンエッチング

19.1 イオンエッチング用装置 .....	440	19.3 イオンエッチングの応用 .....	445
19.1.1 グロー放電型 .....	440	19.3.1 各種物質の内部組織観察 .....	445
19.1.2 イオンビーム型 .....	441	19.3.2 微細加工 .....	446
19.1.3 特殊型 .....	443	19.4 イオンエッチレジスト .....	447
19.2 イオンエッチ条件とエッチ速度 .....	444		

## 20. イオンスパッタ

20.1 物理的機構 .....	449	20.2.2 ゲッタ・スパッタリング .....	455
20.1.1 照射損傷過程とスパッタリング .....	449	20.2.3 バイアス・スパッタリングおよびACスパッタリング .....	455
20.1.2 スパッタ率 .....	450	20.2.4 RFスパッタリング .....	456
20.1.3 スパッタ原子の角度分布 .....	453	20.2.5 リアクティブ・スパッタリング .....	456
20.2 スパッタリングによる薄膜作製 .....	454	20.2.6 その他 .....	457
20.2.1 2極スパッタリング .....	454		

## 21. イオン注入

21.1 イオン注入の効果 .....	459	入 .....	480
21.1.1 注入イオンの分布 .....	459	21.3.1 イオン注入による不純物制御 .....	481
21.1.2 熱処理と格子欠陥 .....	466	21.3.2 ドーピング効率 .....	483
21.1.3 増速拡散 .....	467	21.3.3 テパイスへの応用 .....	484
21.1.4 注入層の電気特性 .....	469	21.3.4 熱処理によって起る現象 .....	485
21.2 半導体素子の製造 .....	470	21.3.5 ルミネッセンス .....	486
21.2.1 半導体素子製造技術としてのイオン注入法 .....	470	21.4 イオン注入装置 .....	487
21.2.2 イオン注入層, p-n接合 .....	470	21.4.1 注入装置の概要 .....	487
21.2.3 素子への応用 .....	476	21.4.2 注入装置に要求される特性 .....	488
21.3 III-V化合物半導体へのイオン注		21.4.3 注入装置各論 .....	489
		21.4.4 注入装置の実例 .....	492

## 22. イオンプローブ

22.1	バックスキタリング	497	22.2	イオンマイクロアナライザ	502
22.1.1	概要	497	22.2.1	装置の構成	502
22.1.2	装置	497	22.2.2	分析法および分析限界	504
22.1.3	スペクトルの解析	499	22.2.3	固体分析への応用	505