

執筆者一覧

第 I 編 半導体材料

第 1 章 元素半導体	15
第 1 節 Si	〈角野 浩二/末澤 正志〉 15
1. はじめに	15
2. 結晶構造	15
3. 格子の弾性的性質	16
3.1 弾性定数	16
3.2 フォノン	16
4. エネルギーバンド	18
4.1 エネルギーバンドの全体像	18
4.2 有効質量	20
5. 不純物	21
5.1 一般論	21
5.2 熱ドナー	23
第 2 節 Ge	〈村岡 久志〉 25
1. はじめに	25
2. 半導体材料としての特長	25
2.1 Ge のバンド構造と禁制帯幅	25
2.2 禁制帯幅が影響する諸特性	26
2.3 移動度	26
2.4 光電効果	27
3. 結晶製造法	28
3.1 原料GeO ₂ の製造	28
3.2 高純度Ge多結晶の製造	28
3.3 Ge単結晶の製造	29
4. 加工法	30
4.1 ウェーハ・ペレット加工	30
4.2 エピタキシャル成長	31
5. 半導体材料としての問題点	31
5.1 酸化膜	31
5.2 単結晶高純度化	32
6. Geの市場と動向	32
7. おわりに	33
第 2 章 化合物半導体	35
第 1 節 III-V 族化合物	〈隈 彰二/倉田 一宏〉 35
1. III-V 族化合物の基礎物性	35
2. III-V 族化合物の光学物性	37
3. III-V 族化合物の電子物性	40
第 2 節 II-VI 族化合物半導体	〈小林 正和/小長井 誠〉 45
1. はじめに	45
2. 結晶構造	46
2.1 格子位置	46
2.2 結晶構造	46
3. 自己補償効果	47
3.1 自己補償効果	47
3.2 残留不純物効果	48
4. 各種 II-VI 族化合物半導体の性質	49
4.1 ZnO	49
4.2 ZnS	49
4.3 ZnSe	52
4.4 ZnTe	53
4.5 CdS	53
4.6 CdSe	53

4.7 CdTe	54	HgCdTe)	54
4.8 水銀化合物 (HgS, HgSe, HgTe,		5. 歪超格子	55
第3節 混晶半導体		〈高橋 清/徳光 永輔〉	58
1. はじめに	58	3.3 GaAs _{1-x} P _x	64
2. 混晶半導体の一般的性質	58	3.4 In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y}	64
3. 混晶半導体各論	62	3.5 III-III-III-V族系4元混晶	65
3.1 Ga _{1-x} Al _x As	62	3.6 その他の混晶半導体	65
3.2 In _x Ga _{1-x} As	63	4. むすび	67

第II編 半導体材料の製造技術

第1章 半導体シリコン結晶の製造技術		〈滝口 蓮一〉	71
1. 総論	71	3.7 単結晶の高品質化技術	83
2. 多結晶シリコンの製造方法	72	4. ウェーハ加工技術	85
3. シリコン単結晶の製造方法	73	4.1 ウェーハ加工概要	85
3.1 はじめに	73	4.2 ウェーハ切断技術	87
3.2 FZ単結晶の製造方法	74	4.3 ラッピング	87
3.3 CZ単結晶の製造方法	76	4.4 ベベリング	88
3.4 ドーピング技術	77	4.5 鏡面研磨	89
3.5 大直径化	80	4.6 ゲッターリング技術	93
3.6 CZ単結晶中の酸素の挙動と酸素濃度コントロール	81	4.7 レーザーマーキング	93
第2章 化合物半導体結晶製造技術			95
総節 バルク単結晶アプローチ		〈赤井 慎一〉	95
第1節 III-V族化合物半導体結晶			98
(1) GaAs結晶(ブリッジマン法特に三温度水平ブリッジマン法)		〈赤井 慎一/藤田慶一郎〉	98
1. HB法の特徴と役割	98	4. 低転位化技術	105
2. 大型HBGaAs結晶成長技術	99	5. 高品質半絶縁性HBGaAs技術	106
3. 高純度化技術	103	6. 将来性について	109
(2) GaAs結晶(引上げ法)		〈福田 承生〉	112
1. LEC法の特徴	112	3. 半導体レーザ, 発光ダイオード用導電性GaAs結晶製造技術	118
2. IC用半絶縁性GaAs結晶製造技術	113	4. Modified LEC法	119
2.1 半絶縁性化	113	4.1 X線透視付As雰囲気LEC法	121
2.2 直径制御化・大口径化	114	4.2 As圧コントロール引上げ法	121
2.3 無転位化	115	4.3 As注入融液組成制御LEC法	122
2.4 ストイキオメトリ制御化	117	4.4 磁場印加LEC法	123

(3) GaP単結晶	〈渡辺 正幸〉	129
1. 大形化, 量産化の現状		129
2. 直径制御技術		131
3. 低転位化技術		133
4. 高純度化技術		134
5. デバイスへの応用		137
5.1 緑色LED		137
5.2 黄色LED		138
(4) インジウムリン単結晶の製造技術	〈荒木 暉〉	141
1. はじめに		141
2. 多結晶原料合成		142
2.1 素材の高純度化		142
2.2 高圧HB法による多結晶合成		143
2.3 原料多結晶の純度		144
2.4 その他の合成法		145
3. 単結晶の作成		146
3.1 要求される単結晶の特性		146
3.2 単結晶の成長法		147
3.3 単結晶作製上の問題点		147
3.4 不純物ドーピング		149
3.5 加工・研磨		150
4. 今後の課題		150
(5) GaSb, InSb等結晶	〈熊川 征司〉	153
1. GaSb やInSb 等の結晶成長法		153
1.1 引上げ法 (Czochralski 法, CZ 法)		153
1.2 液体封止引上げ法 (Liquid Encapsulated Czochralski 法, LEC 法)		155
1.3 ブリッジマン法 (Bridgman 法)		155
2. 不純物偏析とファセット成長		156
3. 不純物濃度稿		159
4. 特殊な条件の下で成長させた結晶		160
4.1 磁場下での成長結晶		160
4.2 無重力下での成長結晶		161
4.3 高加速度下での成長結晶		161
4.4 超音波振動下での成長結晶		163
第2節 II-VI族化合物半導体結晶		166
(1) ZnS, ZnSe系バルク単結晶の成長	〈藤田 茂夫〉	166
1. まえがき		166
2. 融液からの成長		166
3. 溶液からの成長		167
4. 気相からの成長		169
4.1 昇華法		169
4.2 CVD法		170
4.3 ハロゲン輸送法		170
(2) PbSnTe, HgCdTe 等結晶	〈吉河 満男〉	174
1. Pb 化合物結晶		174
1.1 ブリッジマン法, 引き上げ法		175
1.2 気相法		177
1.3 キャリア濃度制御		177
2. Hg _{1-x} Cd _x Te 結晶		178
2.1 ブリッジマン法		179
2.2 ゾーンメルト法		181
2.3 再結晶法		181
2.4 キャリア濃度制御		182
第3章 シリコンエピタキシャル成長技術		185
第1節 CVD法		185
(1) ホモエピタキシャル成長技術	〈小切間正彦〉	185
1. エピタキシャル成長の原理		185
2. ドーピング		189
3. 成長装置		190
4. 成長装置内のガス流解析		191
5. エピタキシャル層の評価		193
6. エピタキシャル成長の諸問題		195
6.1 オートドーピング (Autodoping)		195
6.2 結晶欠陥		197
6.3 パターンのダレ・ズレ		197
7. 結 言		199

(2) ヘテロエピタキシャル成長	〈安田 幸夫〉	201
1. 序 論.....		201
2. ヘテロエピタキシャル成長技術の発展.....		201
3. Si on Sapphire.....		203
3.1 エピタキシャル方位関係.....		203
3.2 成長過程と結晶の性質.....		204
3.3 気相成長技術.....		205
3.4 新しい成長方法の検討.....		206
3.5 結晶の性質と電気的特性の関連.....		208
4. Si on Spinel		211
4.1 エピタキシャル方位関係.....		212
4.2 気相成長技術と電気的特性.....		213
4.3 基板結晶の種類と電気的特性.....		214
4.4 Si / スピネル / Si の多層エピタキシャル技術.....		215
第2節 MBE法	〈白木 靖寛〉	218
1. はじめに.....		218
2. MBE装置.....		218
3. Si基板の清浄化.....		219
4. Siのホモエピタキシー(Si-MBE).....		221
5. Si-MBE膜へのドーピング.....		221
6. 固相エピタキシーと多結晶膜成長.....		222
7. ヘテロエピタキシー.....		223
8. デバイスへの応用.....		225
第3節 再結晶化法	〈津屋 英樹〉	229
1. はじめに.....		229
2. イオン注入層の再結晶化.....		229
2.1 電気炉アニールによる再結晶化.....		229
2.2 レーザアニールによる再結晶化.....		232
2.3 その他の方法による再結晶化.....		235
3. SOI成長技術.....		236
3.1 基本的なSOI形成法.....		237
3.2 レーザアニールによるSOI形成.....		239
3.3 電子ビームアニールによるSOI形成.....		243
3.4 グラファイトヒータによるSOI形成.....		244
4. おわりに.....		245
第4章 化合物半導体エピタキシャル成長技術		250
第1節 GaAs, AlGaAs系結晶		250
(1) 液相エピタキシャル成長技術(LPE)	〈柏田 泰利/中村 道治〉	250
1. はじめに.....		250
2. 原 理.....		250
3. 現状と問題点.....		251
3.1 成長装置.....		251
3.2 成長材料.....		252
3.3 成長層の厚み制御.....		253
3.4 AlGaAsの組成制御.....		253
4. むすび.....		254
(2) 気相エピタキシャル成長技術(VPE)	〈碓井 彰〉	256
1. はじめに.....		256
2. VPE成長方法および装置.....		256
3. VPE GaAsの成長機構.....		258
3.1 熱力学的考察.....		258
3.2 動力学的考察.....		260
4. VPE成長層の特性.....		262
4.1 GaAs VPE成長層の残留不純物.....		262
4.2 VPEにおける高純度化.....		263
5. むすび.....		266
(3) 有機金属気相成長法(MOCVD)	〈中西 隆敏〉	268
1. MOCVDの原理、特徴.....		268
1.1 はじめに.....		268
1.2 MOCVDの原理.....		269
1.3 MOCVDの特徴.....		270
2. GaAs, Ga _{1-x} Al _x Asの結晶成長.....		273
2.1 MOCVD装置.....		273
2.2 結晶成長.....		274
3. 成長層の特性に及ぼす諸要因.....		279
3.1 出発原料.....		279
3.2 基板方位.....		281

3.3 成長条件	281	3.5 Deep Level	283
3.4 ドーピング	282	4. 問題点および今後の課題	285
(4) 分子線エピタキシャル成長技術		〈石井 恂〉	288
1. まえがき	288	3.2 無秩序化	296
2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 成長層の光学的・電気的特性	288	3.3 応用	299
2.1 フォトルミネッセンス特性	289	4. ヘテロエピタキシー	300
2.2 表面構造	291	4.1 Si 基板上への AlGaAs 成長	300
2.3 電気的特性	292	4.2 デバイス特性	301
3. $\text{GaAs}-\text{AlGaAs}$ 超格子構造	294	5. ガスソース分子線エピタキシー	301
3.1 界面急峻性	294	6. あとがき	303
第2節 InGaAsP, InP系結晶			310
(1) 液相エピタキシャル成長技術(LPE)		〈秋田 健三〉	310
1. InGaAsP の成長と InP 基板との格子整合条件	310	3.2 アンドープ結晶キャリアー濃度の面方位による影響	317
1.1 InGaAsP の液相エピタキシャル成長	310	3.3 n 型と p 型の不純物添加	318
1.2 InP 基板との格子整合条件	312	3.4 錫の添加	318
1.3 厚さ方向の組成変動	313	3.5 テルルの添加	319
1.4 過冷却溶液を用いた LPE 成長	313	3.6 硫黄の添加	319
1.5 不純物添加の影響	314	3.7 セレンの添加	319
1.6 DH 構造の成長での InGaAsP 層の溶解	314	3.8 ゲルマニウムの添加	320
1.7 ミスシビリティ・ギャップ	315	3.9 シリコンの添加	320
1.8 1 相溶液と 2 相溶液	315	3.10 酸素の添加	320
2. InGaAsP 組成の精密制御技術	315	3.11 垂鉛の添加	320
2.1 バッチメルトとその製作	315	3.12 カドミウムの添加	321
2.2 バッチメルトの均一性評価	316	3.13 マグネシウムの添加	322
3. キャリヤー濃度の制御	316	3.14 マンガンの添加	322
3.1 アンドープ結晶のキャリアー濃度	317	3.15 ベリリウムの添加	322
		3.16 キャリヤー濃度の制御性向上	322
(2) 気相エピタキシャル成長技術(VPE)		〈野田 行雄/久代 行俊〉	325
1. ハイドライド VPE の原理	325	3.2 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$	334
1.1 はじめに	325	3.3 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	334
1.2 ハイドライド VPE の原理	325	4. 成長速度	336
1.3 熱力学的考察	326	5. 表面構造	336
2. 成長システム	328	6. 結晶純度	338
2.1 成長装置	328	7. 光学的性質	339
2.2 安全対策	332	8. デバイス用多層構造の成長	341
3. 成長方法	333	8.1 ドーピング	341
3.1 InP	333	8.2 多層構造の成長	341

(3) 分子線エピタキシャル成長技術(MBE).....	〈林 秀樹〉.....	346
1. はじめに.....		346
2. InP, InGaAsPのMBE成長.....		346
3. InGaAsのMBE成長.....		351
4. InAlAsのMBE成長.....		352
第3節 GaSb, AlGaSb系結晶	〈助川 徳三〉.....	355
1. 液相エピタキシャル成長技術(LPE).....		355
1.1 成長用基板と格子整合.....		355
1.2 平衡状態図.....		355
1.3 成長装置ならびに成長方法.....		358
2. 気相エピタキシャル成長技術(VPE).....		362
2.1 閉管法.....		362
2.2 ハイドライド法.....		362
2.3 クロライド法.....		363
2.4 OMVPE法.....		363
3. 分子線エピタキシャル成長技術(MBE).....		364
3.1 基板表面の清浄化.....		364
3.2 AlSb-GaSb超格子.....		364
3.3 AlGaSb-GaSbDHおよびMQW レーザ.....		365
第4節 ZnS, ZnSe系結晶		369
(1) 液相エピタキシャル成長技術(LPE).....	〈中村 浩〉.....	369
1. 原理と特徴.....		369
2. 溶解度曲線.....		369
3. ZnおよびGa, In系溶媒.....		370
4. Sn, Bi系溶媒.....		370
5. ハライド系溶媒.....		371
6. Te, Te-Se系溶媒.....		372
7. Sb-Se系溶媒.....		373
(2) 気相エピタキシャル成長技術(VPE).....	〈中村 浩〉.....	375
1. はじめに.....		375
2. 封管輸送法.....		376
3. 近接法.....		376
4. 開管輸送法.....		377
5. 化学気相法.....		378
(3) 有機金属気相成長法(MOCVD).....	〈藤田 茂夫〉.....	382
1. はじめに.....		382
2. ZnS, ZnSeのMOCVDの特徴.....		382
2.1 原料.....		382
2.2 反応機構.....		384
2.3 基板結晶.....		384
2.4 MOCVD装置.....		385
3. 成長層の特性.....		386
3.1 ZnS.....		386
3.2 ZnSeとZn(S, Se).....		388
4. おわりに.....		393
第5節 Hg_{1-x}Cd_xTe結晶	〈吉河 満男〉.....	396
1. 液相エピタキシャル成長.....		396
2. 気相エピタキシャル成長法.....		398
3. その他の成長法.....		400
3.1 MOVPE法.....		400
3.2 MBE法.....		401
3.3 スパッタ法.....		402
第5章 非晶質半導体製造技術		405
第1節 非晶質シリコン		406
(1) 中間状態種を用いた非晶質シリコン成膜法.....	〈松村 英樹〉.....	406
1. 堆積メカニズムと中間状態種.....		406
2. 中間状態種SiH ₂ を用いた成膜法.....		407
3. 中間状態種SiF ₂ を用いた成膜法.....		409
4. 中間状態種SiF ₂ とH ₂ 混合ガスから作られる非晶質シリコン.....		410

3.2 化学的性質	489	4.2 毒性ガス	493
4. 半導体結晶用ガスの取扱い	493	4.3 金属腐食性ガス	493
4.1 可燃性ガス	493	4.4 漏洩対策	493
第2節 半導体結晶用材料ガスの製造方法と精製方法		〈高市 侃〉	495
1. 製造方法	495	2. 精製方法	498

第IV編 半導体材料の評価技術

第1章 基本(共通)技術			503
第1節 結晶評価		〈岸野 正剛〉	503
1. エッチング法	503	3.2 X線ディフラクトメーター法	507
1.1 エッチング法で格子欠陥が見える理由と転位ピット	503	3.3 X線トポグラフィ	508
1.2 エッチング液の各種	503	3.4 X線強度測定法	509
1.3 異方性一均一エッチング	504	4. 電子線回折および電子顕微鏡法	510
2. 光学的方法	505	4.1 電子線回折の特徴	510
3. X線回折法	505	4.2 反射回折	510
3.1 結晶によるX線の回折	505	4.3 透過回折	511
		4.4 電子顕微鏡法	511
第2節 不純物分析		〈原田 博文/榎井 積〉	515
1. はじめに	515	6. XMA	530
2. 抵抗率測定法	517	7. AES, ESCA	533
2.1 広がり抵抗法(Spreading Resistance)	517	8. 放射化分析法	536
2.2 4探針法(Four Point Probe)	518	9. DLTS	543
3. 赤外分光法(IR法)	520	10. ライフタイム測定法	546
4. フォトルミネッセンス法(PL法)	523	11. MOS法	549
5. SIMS	527		
第3節 ゲッターリング		〈岸野 正剛〉	554
1. ゲッターリングは何故必要か?	554	2.3 拡散層中の不純物効果によるゲッターリング	557
1.1 不純物と半導体デバイスの特性	554	3. 各種のゲッターリング手法	558
1.2 最近のLSIとゲッターリング	554	3.1 エクストリンシック・ゲッターリング	558
2. ゲッターリングのメカニズム	556	3.2 イントリンシック・ゲッターリング	560
2.1 メカニズムの概説	556	3.3 その他のゲッターリング	563
2.2 コットレル固着	556		
第2章 シリコン半導体プロセスの評価技術		〈有馬 秀明/松川 隆行〉	565
1. プロセス材料の純度と管理	565	1.4 超純水	568
1.1 クリーンルーム	566	1.5 薬品, レジスト	568
1.2 シリコンウエハ	566	1.6 クリーンルームにおける塵埃の測定法	569
1.3 ガス	567	1.7 ウエハ表面汚染と付着物評価法	571

2. プロセス評価技術	572	3.2 pn 接合ダイオード	581
2.1 膜厚測定	572	3.3 インラインTEG	581
2.2 薄膜の組成評価	574	3.4 TEG評価システム	581
2.3 膜質の評価	576	4. 信頼性評価技術	582
2.4 拡散層の評価	577	4.1 統計処理の概要	582
3. インライン電気特性評価	580	4.2 半導体の信頼性評価	584
3.1 MOSキャパシター	580		
第3章 化合物半導体の評価技術	〈倉田 一宏/隈 彰二〉		589
第1節 結晶欠陥評価	〈隈 彰二/倉田 一宏〉		590
1. エッチピット法	590	5. チャンネリング	595
2. X線トポグラフィ	593	6. 格子常数の超精密測定	597
3. 透過電子顕微鏡	594	7. 光学的方法	598
4. 光散乱法	595		
第2節 バンド構造, 不純物評価	〈隈 彰二/倉田 一宏〉		599
1. 光学的手法による評価	599	2. 電気的手法による評価	605
1.1 反射, 透過	599	2.1 C-V法	605
1.2 レーザ・ラマン分光	600	2.2 Van der Pauw法とホール測定	606
1.3 フォトルミネセンス	603	2.3 ディープレベルの測定	606
1.4 カソードルミネセンス	604	3. 不純物分析	608
第4章 a-Siの評価技術	〈斎藤 志〉		612
1. 構造解析	612	3.2 移動度	615
2. 光学的性質	613	3.3 少数キャリア拡散距離	616
2.1 光吸収	613	3.4 ギャップ内準位密度	617
2.2 ホトルミネセンス	614	4. 構造欠陥および不純物の評価	618
3. 電気的性質	615	4.1 構造欠陥	618
3.1 光導電率	615	4.2 不純物分析	618

第V編 半導体材料とデバイス特性

第1章 化合物半導体デバイス	623
第1節 光デバイスと材料	〈米津 宏雄〉 623
1. 光デバイスと結晶材料の種類	623
2. 発光ダイオードと結晶材料	626
3. レーザダイオードと結晶材料	630
4. 受光素子	632
第2節 超高周波, 超高速デバイスと材料	〈長谷川文夫〉 635
1. GaAs 超高周波ダイオード	635
2. GaAs FETの基本構造と性能指数	638
3. 低雑音 GaAs FET用エピタキシャル層	639
4. 高出力 GaAs FET用エピタキシャル層	641
5. GaAs IC用半絶縁性基板	645

第3節 エネルギー変換デバイスと材料	〈米津 宏雄〉	650
1. エネルギー変換デバイスの種類		650
2. 太陽電池		650
3. 赤外線センサー		651
第2章 非晶質(アモルファス)半導体デバイス		654
第1節 アモルファス材料とデバイスの基本	〈嶋田 寿一/丸山 瑛一〉	654
1. アモルファス半導体の特徴		654
2. アモルファス半導体デバイスの概要		656
第2節 エネルギー変換デバイスと特性	〈嶋田 寿一/丸山 瑛一〉	657
1. 水素化アモルファス太陽電池		657
第3節 各種アモルファスデバイスと特性	〈嶋田 寿一/丸山 瑛一〉	665
1. ノンボラタイルメモリ		665
2. バルク電子効果デバイス		667
3. 光電効果デバイス		668
4. 電界効果デバイス		670
章のむすび	〈嶋田 寿一/丸山 瑛一〉	672

