

# 目 次

## 第 I 編 III-V 族の結晶成長

<b>1. バルク結晶成長</b>	<b>3</b>
1.1 ボート法成長	4
1.2 LEC 法成長	7
1.3 低転位化技術	9
1.4 IC 用結晶の高品質化	14
1.5 今後の技術課題	18
<b>2. L P E</b>	<b>23</b>
2.1 III-V 族化合物半導体の LPE 成長	23
2.2 GaAs, AlGaAs の LPE 成長	31
2.3 GaInAs, GaInPAs の LPE 成長	34
2.4 今後の LPE 成長	37
<b>3. 気相エピタキシャル成長</b>	<b>43</b>
3.1 はじめに	43
3.2 クロライド VPE 法	44
3.2.1 成長方法と二元化合物の成長	44
3.2.2 三元および四元混晶の成長	50
3.3 ハイドライド VPE 法	51
3.3.1 成長方法と二元化合物の成長	51
3.3.2 三元および四元混晶の成長	56
3.4 おわりに	63

<b>4. MOVPE</b>	<b>65</b>
4.1 はじめに	65
4.2 MOVPE の基礎的取扱い	66
4.3 反応装置	68
4.4 原料	73
4.5 MOVPE AlGaAs の結晶の純度	77
4.6 ドーピング特性	79
4.7 MOVPE による種々なヘテロ接合多層膜の形成	84
<b>5. 分子線エピタキシャル成長法</b>	<b>93</b>
5.1 はじめに	93
5.2 MBE に用いられる装置	94
5.3 MBE 成長機構	98
5.4 MBE 成長結晶の特性	105
5.5 GaAs への不純物ドーピング	111
5.6 おわりに	118
<b>6. ALE</b>	<b>121</b>
6.1 はじめに	121
6.2 化合物 ALE の原理	121
6.3 GaAs ALE の装置および手法	124
6.4 III-V 族化合物半導体の ALE	128
6.4.1 GaAs の ALE	128
6.4.2 GaP, InP, InAs, AlAs の ALE	129
6.4.3 多元系 III-V 族化合物半導体結晶の ALE	130
6.5 ALE 結晶の電気的性質	133
6.6 ALE の特徴	135
6.6.1 成長膜厚の均一性	135
6.6.2 選択成長	136
6.6.3 立体構造成長への応用	138
6.6.4 分子層エッチング	140
6.7 まとめ	141

## 第 II 編 III-V 族化合物の物性

<b>7. バルク物性</b>	<b>147</b>
7.1 III-V 族化合物の特徴	147
7.2 結晶構造の原子結合	153
7.2.1 結晶構造	153
7.2.2 価電子分布	157
7.2.3 格子振動	158
7.3 エネルギー帯構造	160
7.4 光学的特性	166
7.4.1 反射特性	166
7.4.2 吸収特性	168
7.4.3 発光特性	171
7.5 電気的特性	172
7.5.1 キャリア密度と伝導性制御	172
7.5.2 結晶欠陥と深い準位	174
7.5.3 移動度	176
7.5.4 高電界特性	182
7.6 混晶半導体	183
7.6.1 混晶半導体の意義	183
7.6.2 混晶半導体の物性	184
<b>8. 表面・界面の物性</b>	<b>195</b>
8.1 清浄表面	195
8.1.1 GaAs(001)面	195
8.1.2 GaAs(011)面(1×1)構造	198
8.1.3 GaAs(111)面	198
8.1.4 エレクトロン・カウンティングモデル	200
8.2 半導体-半導体接合	200
8.2.1 ヘテロ接合	201
8.2.2 バンド不連続の測定法	203
8.2.3 ヘテロ構造の物性	207
8.3 金属-半導体接合	212
8.3.1 ショットキ接合	212
8.3.2 オーミック接合	213
8.4 絶縁-半導体接合	214

### 第 III 編 材料・デバイス(各論)

<b>9. GaAs, AlGaAs</b>	<b>221</b>
9.1 GaAs/Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As ヘテロ構造	221
9.2 GaAs/AlGaAs 半導体レーザー	223
9.2.1 ダブルヘテロ接合レーザー	223
9.2.2 量子井戸レーザー	227
9.2.3 量子細線レーザー	229
9.2.4 面発光レーザー	231
9.3 超高速トランジスタ	232
9.3.1 GaAs 電界効果トランジスタ(FET)	232
9.3.2 高電子移動度トランジスタ(HEMT)	234
9.3.3 ヘテロバイポーラトランジスタ(HBT)	239
<b>10. GaP, GaAsP</b>	<b>245</b>
10.1 バルク結晶の成長	245
10.1.1 融液成長法	245
10.1.2 回転引き上げ法(Czochralski 法)	246
10.2 薄膜結晶の成長	247
10.3 発光機構	249
10.3.1 緑色発光	249
10.3.2 赤色発光	250
10.4 GaP 赤色 LED	251
10.4.1 液相エピタキシャル成長	251
10.4.2 LED の特性	253
10.5 GaP:N 緑色 LED	253
10.5.1 液相エピタキシャル成長	253
10.5.2 GaP:緑色 LED の特性	256
10.6 GaP 純緑色 LED	257
10.6.1 液相エピタキシャル成長	257
10.6.2 発光のメカニズム	258
10.6.3 結晶欠陥と発光出力	260
10.7 GaAsP 混晶	261
10.7.1 バンドギャップ	261
10.7.2 GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> の気相成長	262
10.7.3 格子定数	263

10.8 GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> LED	264
10.8.1 Zn 拡散	264
10.8.2 GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> 赤色 LED	265
10.8.3 GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> オレンジ色, アンバー色 LED	267
10.8.4 GaAsP LED の今後の展望	269
<b>11. InGaAsP/InP</b>	<b>273</b>
11.1 はじめに	273
11.2 結晶成長技術	276
11.2.1 MOVPE 法の発展	276
11.2.2 光照射エピタキシ	278
11.3 素子特性	279
11.3.1 量子井戸応用による LD 特性の進展	279
11.3.2 発振波長としきい値	281
11.3.3 LD の光出力	283
11.3.4 その他の LD 特性	286
11.3.5 Si 基板上の 1.5 $\mu$ mLD	288
11.4 光伝送以外への応用	290
11.5 おわりに	292
<b>12. AlGaInP</b>	<b>295</b>
12.1 はじめに	295
12.2 可視光レーザー用結晶の研究の流れ	296
12.3 液相からの成長の試み	297
12.4 MOVPE による AlInP, AlGaInP の成長	299
12.4.1 MOVPE 成長	299
12.5 バンドギャップ異常と自然超格子	301
12.5.1 (Al)GaInP のバンドギャップ( $E_g$ )異常	302
12.5.2 III族副格子上的原子配列の秩序化—CuPt 型自然超格子	303
12.5.3 超格子バリエーション形成の非対称性とその基板結晶面方位依存性	305
12.5.4 自然超格子形成のメカニズム	307
12.6 不純物: 浅い準位と深い準位	310
12.6.1 ドーピング効率の基板面方位依存性	311
12.6.2 水素パッシベーションによるアクセプタの不活性化	312

12.6.3	酸素の結晶への影響	314
12.7	バンド構造, 物性	315
12.8	可視光レーザー	317
12.8.1	可視光レーザーの要素技術	318
12.8.2	短波長, 高出力, 高信頼レーザー	320
12.9	結 び	323
<b>13.</b>	<b>GaN</b>	<b>329</b>
13.1	はじめに—GaN 研究小史—	329
13.2	GaN の結晶成長	332
13.2.1	融液法	332
13.2.2	窒化法	332
13.2.3	エピタキシャル成長法	333
13.3	GaN の光電物性	341
13.3.1	屈折率	341
13.3.2	ルミネッセンス	341
13.3.3	電気的性質	343
13.4	デバイス	344
13.4.1	GaN min 構造 LED	344
13.4.2	GaN pn 接合型 LED	345
13.4.3	その他のデバイス	346
13.5	おわりに	347
	<b>索 引</b>	<b>351</b>