ま　え　が　き

太陽光の恵みによって地球上の生命が維持されているように，私たちの世界は光に満ちあふれている。光物性とは，「光と物質の相互作用の諸現象」を総称する言葉であり，身近に見ている光の反射，吸収，発光，散乱という現象がその代表的なものである。「半導体の光物性」は，物理学の学問領域として，光エレクトロニクスの基盤として，さらには，半導体材料，デバイスの光学的評価の物理学基礎として，長年にわたって研究が行われてきた。光物性は，きわめて魅力的なものであるが膨大な学問体系から成り立っており，それを前にすると，初めて学ぶ者は茫然とするのではないだろうか。事実，筆者は，研究を通して独学で光物性という学問を学び，幾度となくその広さと深さに立ち尽くすことを経験している。学問は，知識という点から始まり，線となり，そして，あくなき探求と研鑽によって面という体系を自己の中に確立できる。昨今の半導体の光物性に関する研究とそれを応用したデバイス開発において，高度な知識と考察が要求されながらも，研究・開発に要求されるスピードのために，光物性という学問を熟成するだけの時間的なゆとりを持つことが困難となり，表層的なものに留まる傾向が見られるように思える。また，大学という教育の場において，その専門教育の主体となっている学部 4 年生と前期博士課程（修士課程）の大学院生に対して，何らかのテーマを与えて研究をさせながら，限られた時間で，歴史的広がりと深みがあり，かつ，日進月歩で発展している半導体の光物性を十分に理解させることに，現場の教員として難しさを痛感している。

本書は，上で述べた思いに駆られて，浅学非才を顧みず，筆者の「半導体の光物性」の研究者として，そして，大学教員としての 30 年の年月を通して，点から線，そして面へと熟成した学問体系をまとめたものである。本書の執筆において最も意識したことは，学問の体系をイメージとして理解してもらうために，思考を展開するための道具としての理論を詳細に述べ，かつ，それに対応した概念や計算と実験結果を図によって説明することである。そのために，本書では総数 216 枚の図と豊富な物理パラメータの表を示している。また，で

きる限り，著者のオリジナルなデータを用いている。これは，熟知したデータを基に，読者に生き生きと語りかけるためである。さらに，各項目の歴史と最新の展開までを対応する引用・参考文献を示して系統的に説明することを意図して，総数539編の引用・参考文献を示している。したがって，本書を背景として，さらに詳細を学びたい読者は参考文献から比較的容易に体系的独学が可能である。

本書は，半導体の基礎物性（1章），光物性の基礎理論（2章），励起子の光学応答（3章），電子・正孔プラズマの光学応答（4章），ラマン散乱（5章），および，量子井戸構造・超格子の光物性（6章）から構成されている。各章の内容は，目次を参照していただきたい。点から線，そして面としての体系を構築することを意識した構成になっていることを理解していただけるはずである。本書は，学部レベルの電磁気学，量子力学，統計力学，固体物理学の知識を前提としており，理工系，特に，物理系，電気・電子工学系，材料系の大学院生，および，企業や研究所で半導体の光物性や光機能性に関連した研究・開発に携わっている方を主対象としている。また，教員が本書を適宜要約することによって，学部3年生と4年生の光物性物理学のテキストとしても用いることができる。

筆者は，本書が従来の光物性関連の専門図書と一線を画す斬新なものであると確信しているが，また，斬新であるがゆえに，筆者の浅学非才さが現れる箇所があることを認識している。これについては，ご批判とご意見をいただき，本書の改訂版を出版する機会が得られれば望外の喜びである。

最後に，本書は，大阪市立大学工学部応用物理学科（現 電子・物理工学科）と大学院工学研究科電子情報系専攻の光物性工学研究室で共に研究の時を過ごした学生たちとの議論と研究の中から生まれてきた。「真理の女神が微笑むのは一瞬である」という筆者の言葉と厳しい指導の下で，全力を尽くして真理を追い求めてくれた学生たちに心から感謝の意を表する。そして，筆者のこれまでの研究者人生を支えてくれた家族に本書を捧げる。

2013年7月

中山　正昭

目　　次

1. 半導体の基礎物性

1.1　結　晶　構　造 …… 1

1.1.1　基本結晶格子 …… 1

1.1.2　ブリルアンゾーン …… 4

1.2　フ　ォ　ノ　ン …… 5

1.2.1　フォノンの基礎 …… 6

1.2.2　閃亜鉛鉱型半導体のフォノン …… 8

1.2.3　ウルツ鉱型半導体のフォノン …… 9

1.2.4　混晶半導体のフォノン …… 13

1.3　バ ン ド 構 造 …… 14

1.3.1　バンド構造の基礎 …… 14

1.3.2　閃亜鉛鉱型半導体のバンド構造 …… 19

1.3.3　ウルツ鉱型半導体のバンド構造 …… 22

1.3.4　混晶半導体のバンドギャップエネルギーと格子定数 …… 24

1.4　励　　起　　子 …… 25

1.4.1　励起子状態の基礎理論 …… 25

1.4.2　励起子の微細構造 …… 29

1.5　量子井戸構造と超格子 …… 32

1.5.1　ヘテロ接合とバンド不連続性 …… 32

1.5.2　量子井戸構造のサブバンド状態 …… 34

1.5.3　超格子のミニバンド構造 …… 37

1.5.4　超格子のフォノン …… 39

2. 光物性の基礎理論

2.1 光物性の電磁波論 …… 42
2.1.1 マクスウェル方程式からポラリトン方程式へ …… 42
2.1.2 誘 電 関 数 …… 46
2.1.3 ポ ラ リ ト ン …… 55
2.2 バンド間遷移の量子論 …… 62
2.2.1 直接遷移確率 …… 62
2.2.2 結合状態密度と直接遷移の吸収係数 …… 68
2.2.3 間接遷移確率と吸収係数 …… 72
2.3 励起子遷移の量子論 …… 77
2.4 不純物が関与する光学遷移の量子論 …… 81
2.4.1 バンド-不純物間遷移 …… 82
2.4.2 ドナー-アクセプター対発光 …… 83
2.4.3 等電子トラップによる発光過程 …… 86
2.5 再結合発光速度と吸収係数の関係 …… 87
2.6 オージェ再結合 …… 89

3. 励起子の光学応答

3.1 励起子による吸収と反射 …… 94
3.2 励 起 子 発 光 …… 102
3.2.1 発 光 効 率 …… 103
3.2.2 自由励起子発光と束縛励起子発光 …… 104
3.2.3 励起子発光ダイナミクス …… 111
3.2.4 弱局在励起子発光 …… 115
3.2.5 励起子ポラリトン発光 …… 118
3.3 励起子分子光学応答 …… 121
3.3.1 励起子分子の基礎理論 …… 121
3.3.2 励起子分子発光 …… 126
3.3.3 2 光子共鳴励起光学応答 …… 131
3.3.4 励起子分子量子ビート …… 137

3.4　励起子非弾性散乱過程による発光 …… 141
3.4.1　励起子非弾性散乱過程による発光の基礎理論 …… 142
3.4.2　励起子–励起子散乱による発光と光学利得 …… 146
3.4.3　励起子–電子散乱過程による発光と光学利得 …… 151
3.5　薄膜における励起子重心運動の量子化と光学応答 …… 153
3.6　励起子状態に対する格子ひずみ効果 …… 156
3.6.1　閃亜鉛鉱型半導体における格子ひずみ効果の理論 …… 156
3.6.2　光変調反射分光法 …… 161
3.6.3　閃亜鉛鉱型ひずみエピタキシャル構造の励起子状態 …… 163
3.6.4　ウルツ鉱型半導体における格子ひずみ効果の理論と
励起子エネルギーシフト …… 166

4. 電子・正孔プラズマの光学応答

4.1　多体効果の基礎理論 …… 172
4.1.1　モット転移密度 …… 172
4.1.2　バンドギャップ再構成 …… 175
4.2　電子・正孔プラズマによる光学利得の理論 …… 181
4.3　電子・正孔プラズマの発光スペクトルと光学利得スペクトル …… 185
4.4　電子・正孔液体（液滴）の発光スペクトル …… 191

5. ラ マ ン 散 乱

5.1　ラマン散乱の基礎理論 …… 197
5.1.1　ラマン散乱の電磁気学的側面 …… 198
5.1.2　ラマン散乱の量子論的側面 …… 200
5.2　ラマンテンソルとラマン散乱選択則 …… 202
5.3　ラマン散乱の動的構造因子と空間の有限サイズ効果 …… 205
5.4　LO フォノン–プラズモン結合モード …… 211
5.5　格子ひずみ効果 …… 216
5.5.1　閃亜鉛鉱型半導体の光学フォノン振動数に対する格子ひずみ効果 …… 217
5.5.2　ウルツ鉱型半導体の光学フォノン振動数に対する格子ひずみ効果 …… 219

6. 量子井戸構造・超格子の光物性

6.1 量子井戸構造におけるサブバンド構造の理論 …… 222
6.1.1 単一量子井戸構造におけるサブバンドエネルギー …… 223
6.1.2 伝 達 行 列 法 …… 224
6.1.3 バンド非放物線性 …… 228
6.1.4 正孔サブバンド構造の厳密な解析 …… 230
6.1.5 電場効果：量子閉じ込めシュタルク効果 …… 233
6.2 量子井戸構造における励起子状態の理論 …… 237
6.2.1 完全２次元系における励起子状態 …… 238
6.2.2 有限ポテンシャルにおけるタイプⅠ励起子状態 …… 240
6.2.3 有限ポテンシャルにおけるタイプⅡ励起子状態 …… 243
6.3 量子井戸構造における光学遷移の量子論 …… 246
6.3.1 バ ン ド 間 遷 移 …… 247
6.3.2 サブバンド間遷移 …… 248
6.3.3 励 起 子 遷 移 …… 250
6.4 量子井戸構造における励起子光学応答 …… 251
6.4.1 励起子による吸収と反射 …… 251
6.4.2 励 起 子 発 光 …… 255
6.4.3 励起子分子発光 …… 262
6.4.4 荷電励起子発光 …… 265
6.4.5 量子閉じ込めシュタルク効果と自己電気光学効果素子 …… 268
6.4.6 励起子–励起子散乱 …… 272
6.4.7 励起子量子ビートと励起子分子量子ビート …… 273
6.5 量子井戸構造におけるサブバンド間遷移とそのデバイス応用 …… 278
6.5.1 サブバンド間吸収と量子井戸赤外光検出器 …… 278
6.5.2 量子カスケードレーザー …… 279
6.6 超格子のミニバンド構造と有効質量 …… 282
6.6.1 ミニバンド幅の分光学的評価 …… 282
6.6.2 ミニバンド有効質量の分光学的評価 …… 285
6.7 超格子におけるワニエ・シュタルク局在とブロッホ振動 …… 287

6.7.1　ワニエ・シュタルク局在の理論的概略 …… 288
6.7.2　ワニエ・シュタルク局在状態の形成 …… 290
6.7.3　ワニエ・シュタルク局在状態における波動関数共鳴 …… 294
6.7.4　ブロッホ振動の理論的概略 …… 296
6.7.5　ブロッホ振動 …… 298

6.8　GaAs/AlAs タイプⅡ超格子における励起子光学応答 …… 301

6.8.1　Γ-X サブバンド交差 …… 302
6.8.2　タイプⅡ準直接遷移型励起子 …… 304
6.8.3　タイプⅡ準直接遷移型励起子分子 …… 307
6.8.4　タイプⅡ励起子-励起子分子系におけるボース統計性の発現 …… 309

6.9　超格子におけるフォノンとラマン散乱 …… 312

6.9.1　フォノンラマン散乱選択則 …… 313
6.9.2　音響フォノンの折り返しモードと分散関係 …… 314
6.9.3　音響フォノンの折り返しモードに対する界面の乱れの影響 …… 318
6.9.4　光学フォノンの閉じ込めモードと分散関係 …… 319
6.9.5　界面モード …… 322

引用・参考文献 …… 325

索　引 …… 348

1 半導体の基礎物性

本章では，半導体の光物性を理解するために必要な基礎物性について述べる。具体的には，結晶構造（crystal structure）と群論（group theory）に基づく空間的対称性，結晶を構成する原子の集団振動である格子振動（その量子化描像がフォノン：phonon），電子と正孔の波数ベクトル（wave vector）に対するエネルギー分散関係（energy dispersion relation）であるバンド構造（band structure），および，電子と正孔がクーロン束縛した準粒子である励起子（exciton）について，代表的な光機能性半導体であるⅢ-Ⅴ族化合物半導体とⅡ-Ⅵ族化合物半導体を主対象に解説する。さらに，すでに多様なデバイスに応用されている半導体低次元構造の量子井戸構造（quantum well structure）と超格子（superlattice）のバンド構造とフォノンの概略についても述べる。

1.1 結　晶　構　造

1.1.1 基本結晶格子

光物性において重要なバンド構造, 励起子, フォノンの固有状態（eigenstate）は，結晶構造の空間的対称性によって決定される。Ⅲ-Ⅴ族化合物半導体のGaAs，GaP，GaSb，AlAs，InAsやⅡ-Ⅵ族化合物半導体のZnS，ZnSeなどの半導体の結晶構造は，立方晶（cubic crystal）系の閃亜鉛鉱構造（zincblende structure）に属する。**図 1.1**（a）は，閃亜鉛鉱構造の基本結晶格子（basic crystal lattice）を示している。閃亜鉛鉱構造は，格子ベクトル（lattice vector）が（1/4，1/4，1/4）ずれた原子が異なる2種類の面心立方格子（face-centered cubic lattice）で構成される。原子が同じ種類の場合，SiやGeの結晶構造であるダイヤモンド構造（diamond structure）となる。格子定数（lattice constant）は，立方晶の1辺の長さ（a）に相当する。閃亜鉛鉱構造では，sp^3

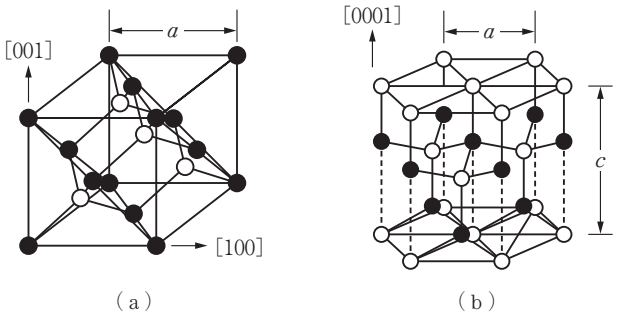


図 1.1　（a）閃亜鉛鉱構造と（b）ウルツ鉱構造の基本結晶格子

混成軌道（hybridization orbital）によって正四面体的な共有結合（covalent bond）が形成されている。閃亜鉛鉱構造を群論で表記すると，点群（point group）T_d（Schönflies 記号），もしくは，$\bar{4}3$ m（国際表記もしくは Hermann-Mauguin 記号）となる。結晶の点群（基本結晶格子を不変に保つ対称操作の集合）は，すべてで 32 種類あり，点群に結晶特有の並進操作（基本結晶格子が規則正しく配列すること）を加えたものを空間群（space group）と呼ぶ。閃亜鉛鉱構造の空間群は，T_d^2（F$\bar{4}3$ m）である。群論の表記は，結晶構造の空間的対称性を表現するものであり，フォノン，バンド構造，励起子などの固有状態を分類し理解するための基礎知識として重要である[1),2)†]。本書では，使う立場からの「物性の言葉，もしくは，記号としての群論」について概略を述べることにする。半導体の光物性では，次項で述べる Γ 点での波動関数（wave function）の特性が主体であり，Γ 点に関しては点群のみで説明できる。点群表記 T_d の T は，tetragonal の略称で正四面体と同様の対称性を持つことを意味し，付加記号の d は，diagonal の略称で正四面体の対角方向（閃亜鉛鉱型構造の場合は［111］方向）に鏡映面（鏡に映すような面対称）を持つことを示している。$\bar{4}3$ m の $\bar{4}$ は，主軸方向（［100］方向）に $\bar{4}$ 回転軸（回反軸：$2\pi/4=90°$ の回転の後に 180° 反転すると元に戻る対称性）があること，3 m は 3 回軸（［111］方向）とそれに平行な鏡映面があることを意味している。

† 肩付きの数字は，巻末の引用・参考文献番号を表す。

Ⅲ族窒化物半導体の GaN，AlN，InN やⅡ－Ⅵ族化合物半導体の ZnO，CdS などの半導体の結晶構造は，六方晶（hexagonal crystal）系のウルツ鉱構造（wurtzite structure）に属する。図 1.1（b）は，ウルツ鉱構造の基本結晶格子を示している。ウルツ鉱構造を構成する共有結合の基本ユニットは，閃亜鉛鉱構造と同様に正四面体的 sp^3 混成軌道である。したがって，共有結合の観点からは閃亜鉛鉱構造とウルツ鉱構造は類縁であり，例えば，GaN を立方晶系の基板上にエピタキシャル成長（epitaxial growth）すると，閃亜鉛鉱構造となる場合があることが知られており[3),4)]，このことはデバイス応用の観点において注目されている。ウルツ鉱構造の場合，構造の異方性のために 2 組みの格子定数（a と c）で基本結晶格子が表現され，sp^3 混成軌道が交互に逆転して結合している結晶方向を c 軸[0001] と定義する。ウルツ鉱構造の点群は C_{6v}（6 mm），空間群は C_{6v}^4（$P6_3mc$）である。点群 C_{6v} の C_6 は，6 回軸（$2\pi/6=60°$ の回転で元に戻る対称性）があることを意味し（六方晶系の特徴：回転軸は c 軸），付加記号の v は vertical（垂直）の略称で，主軸を含む垂直面に鏡映面があることを示している。6 mm の 6 は，上記の 6 回軸があること，mm は 2 種類の鏡映面があることを意味している。鏡映面に関しては，主軸に平行な 2 組みの等価な三つの鏡映面が存在する。

ここで，結晶構造の極性面（polar face）について述べる。これは，特にウルツ鉱構造の GaN 系の発光デバイスにおいて重要な事項である。ウルツ鉱構造の場合，c 面(0001）が極性面であり，その法線方向（c 軸[0001]）に格子がひずむとピエゾ電場（piezoelectric field：格子ひずみに起因する圧電分極によって発生する電場）が生じる（ピエゾ電場に関する詳細は 6.1.5 項を参照）。なお，閃亜鉛鉱構造の極性面は，(111)面である。GaN 系デバイスを作製する場合，極性面である c 面(0001）を成長面として $In_xGa_{1-x}N$ 層などをエピタキシャル成長することが多く［一般的な市販の発光ダイオード（light emitting diode：LED）がこれに相当する］，ピエゾ電場が原因となって，発光層に注入される電子と正孔の再結合発光確率（recombination luminescence probability）が低下する。そこで，**図 1.2** に示しているように，c 面に垂直な a 面$(11\bar{2}0)$

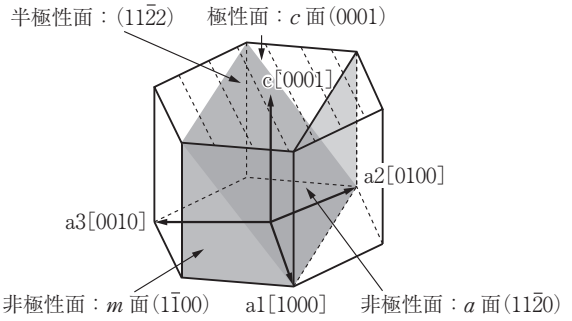


図 1.2　ウルツ鉱構造の極性面，非極性面，および，半極性面

や m 面(1$\bar{1}$00) と呼ばれる非極性面（non-polar face），あるいは c 面に対して傾いた半極性面（semi-polar face），例えば(11$\bar{2}$2)[5]や(20$\bar{2}$1)[6]を成長面とし，ピエゾ電場の効果を大きく低減することが高効率発光ダイオード[5]や半導体レーザー[6]を作製する指針の一つとなっている。

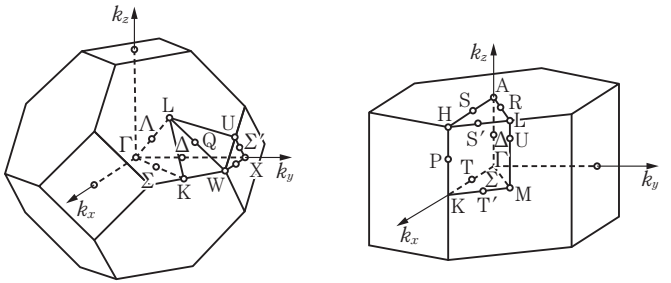
1.1.2　ブリルアンゾーン

物性物理学において，電子，フォノン，励起子のエネルギー分散関係，すなわち，エネルギーの波数ベクトル（波動ベクトルとも呼ぶ）依存性は，きわめて重要なものである。結晶の電子バンド構造やフォノンのエネルギー分散関係は，ブリルアンゾーン（Brillouin zone）と呼ばれる逆格子空間（reciprocal lattice space：波数空間（wave vector space）とも呼ぶ）において記述される。波数空間を考慮する必然性は，結晶中の電子やフォノンを量子力学的波動として扱う場合（物性論の大前提），その波動の状態（厳密には空間を波動が伝播する位相）が波数ベクトル（$|\boldsymbol{k}|=2\pi/\lambda$：$\lambda$ は波長）で定義されるためである。具体的には，結晶中の任意の波動関数は，実空間格子ベクトル $\boldsymbol{R}$ の移動に対して不変なブロッホ関数（Bloch function）$u_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{R})=u_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r})$ を前提とすると（結晶の並進対称性によって保証される），一般に次式の特性を持つ。

$$\begin{aligned}\Psi_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{R})&=\exp[i\boldsymbol{k}(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{R})]u_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{R})=\exp(i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{R})\exp(i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r})u_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r})\\&=\exp(i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{R})\Psi_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r})\end{aligned}\tag{1.1}$$

式 (1.1) は，実空間格子ベクトル $\boldsymbol{R}$ の移動が，波動関数の位相変化 $\exp(i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{R})$ に相当することを意味しており，これをブロッホの定理（Bloch's theorem）と呼ぶ。

図 1.3 に，（a）閃亜鉛鉱構造と（b）ウルツ鉱構造のブリルアンゾーンを示している。対称性の良い点にはΓ，X，L などの記号が付けられている。また，Γ 点から X 点方向の波数空間を Δ 線，Γ 点から L 点方向の波数空間を Λ 線などと表記する。光物性において特に重要なものが，$\boldsymbol{k}=(0, 0, 0)$ の Γ 点である。式 (1.1) のブロッホの定理から，Γ 点の波動関数は実空間格子ベクトル $\boldsymbol{R}$ の移動に対して不変であることがわかる。これは，全結晶空間で同じ固有状態，波動でいえば定在波であることを意味している。



（a） （b）

図 1.3 （a）閃亜鉛鉱構造と（b）ウルツ鉱構造のブリルアンゾーン

1.2 フ ォ ノ ン

結晶を構成している原子の集団振動である格子振動は，その量子化描像がフォノンと呼ばれ，原子の規則的配列状態と対称性，原子間結合力，格子ひずみなどの結晶構造の諸要素によって状態が決定される。フォノンには，電子，正孔，励起子を散乱する，もしくは，それらとの結合状態［ポーラロン (polaron)］を形成するという物性的な効果とともに，ラマン散乱分光法 (Raman scattering spectroscopy) や赤外分光法 (infrared spectroscopy) によってフォノンをプローブすることにより，結晶性を光学的に評価できるという側面がある。

1.2.1　フォノンの基礎

ここでは，フォノンの基礎として，2 原子直線格子モデル（**図 1.4** 参照）に基づいてフォノンについて解説する。質量 M と m の異種の原子が，ばね定数 β を持って交互に周期的に並んだ直線格子（格子定数：a）を考える。l 番目のセルの質量 M の原子の変位を u_l，質量 m の原子の変位を v_l とする。l 番目のセルの 1 対の原子の運動方程式は，次式で表される。

$$\left.\begin{aligned} M\frac{d^2u_l}{dt^2} &= -\beta\left(u_l-v_l\right)-\beta\left(u_l-v_{l-1}\right)= -\beta\left[2u_l-\left(v_l+v_{l-1}\right)\right] \\ m\frac{d^2v_l}{dt^2} &= -\beta\left(v_l-u_{l+1}\right)-\beta\left(v_l-u_l\right)= -\beta\left[2v_l-\left(u_{l+1}+u_l\right)\right] \end{aligned}\right\} \tag{1.2}$$

u_l と v_l を波数ベクトル k，振動数 ω の平面波として次式で定義すると

$$u_l = A\exp[i(kx_l-\omega t)],\quad v_l = B\exp[i(k(x_l+a/2)-\omega t)] \tag{1.3}$$

式 (1.2) は，下記の行列関係となる。

$$\begin{pmatrix} 2\beta-M\omega^2 & -2\beta\cos(ka/2) \\ -2\beta\cos(ka/2) & 2\beta-m\omega^2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{1.4}$$

式 (1.4) が意味を持つためには，行列式がゼロであればよいので，以下の分散関係が得られる。

$$\omega_{\pm}{}^2=\beta\left(\frac{1}{M}+\frac{1}{m}\right)\pm\beta\left[\left(\frac{1}{M}+\frac{1}{m}\right)^2-\frac{4\sin^2(ka/2)}{Mm}\right]^{1/2} \tag{1.5}$$

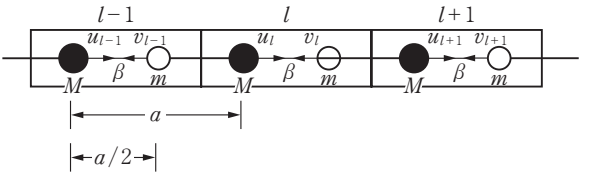


図 1.4　2 原子直線格子モデル

図 1.5 は，式 (1.5) に基づいて計算したフォノン分散関係の概略図を示している。二つの分枝があり，振動数がゼロから始まる下分枝（ω_-）が音響フォノン（acoustic phonon）に，有限の振動数から始まる上分枝（ω_+）が光学フォ

ノン（optical phonon）に相当する。光学フォノンが，一般的に光と相互作用する。$k=0$ 近傍の波数領域の音響フォノン分散関係は，式（1.5）から近似的に以下のようになる。

$$\omega_{-}=\left(\frac{\beta a^2}{2(M+m)}\right)^{1/2}k \qquad (1.6)$$

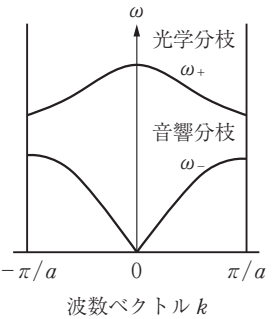


図 1.5　式（1.5）に基づいて計算したフォノン分散関係の概略図

式（1.6）は，ω_{-}が波数ベクトル k との線形関係にあることを意味しており，その係数が物質中の音速に対応する。すなわち，音波の分散を示している。これが，音響フォノンの語源である。また，$k=0$ における振幅関係は，音響フォノンの場合，$A=B$（同一位相の振動），光学フォノンの場合，$A=-(m/M)B$（逆位相の振動）となる。

フォノンは，量子力学的にはボース粒子（ボソン：boson）である。振動モードを単純な調和振動子（harmonic oscillator）と仮定すると，温度 T で熱平衡にある振動数 ω のフォノン密度の期待値と平均エネルギーは，次式で与えられる。

$$\langle n_{\mathrm{ph}}\rangle=\frac{1}{\exp\left(\dfrac{\hbar\omega}{k_{\mathrm{B}}T}\right)-1} \qquad (1.7\,\mathrm{a})$$

$$\langle E\rangle=\hbar\omega\left(\langle n_{\mathrm{ph}}\rangle+\frac{1}{2}\right) \qquad (1.7\,\mathrm{b})$$

ここで，式（1.7 a）の右辺は，ボース分布関数（Bose distribution function）に相当する。フォノンの生成と消滅に関しては，生成演算子（creation operator：a^{+}）と消滅演算子（annihilation operator：a）を用いて，以下のように取り扱うことができる。

$$a^{+}\left|n_{\mathrm{ph}}\right\rangle=\sqrt{n_{\mathrm{ph}}+1}\left|n_{\mathrm{ph}}+1\right\rangle,\quad a\left|n_{\mathrm{ph}}\right\rangle=\sqrt{n_{\mathrm{ph}}}\left|n_{\mathrm{ph}}-1\right\rangle \qquad (1.8)$$

式（1.8）は，2 章に述べるが，フォノンの生成･消滅を伴う間接遷移型（indirect transition type）半導体の光学遷移確率（optical transition probability）におい

て重要な役割をする。

1.2.2　閃亜鉛鉱型半導体のフォノン

図 1.6 は，閃亜鉛鉱構造 GaAs のフォノン分散関係の計算結果と中性子散乱法（neutron scattering method）によって測定された実験結果を示している[7]。図の上軸の Γ，X，L，Δ，Λ，Σ などの記号は，図 1.3（a）に示したブリルアンゾーンの位置や方向を表している。図 1.6 から明らかなように，閃亜鉛鉱構造のフォノンには基本的に 4 種類のモードがある。各フォノンには，フォノンの伝播方向と同じ方向に格子振動する縦モード［縦型音響（longitudinal acoustic：LA）フォノンと縦型光学（longitudinal optical：LO）フォノン］と，直交方向に格子振動する横モード［横型音響（transverse acoustic：TA）フォノンと横型光学（transverse optical：TO）フォノン］があるために，すべてで 4 種類のモードとなる。縦モードの自由度は 1，横モードの自由度は 2 である。なお，［0ζζ］方向（Σ 方向）では，縦モードと横モードの混成が生じ，TA と TO フォノンの縮退が解ける。

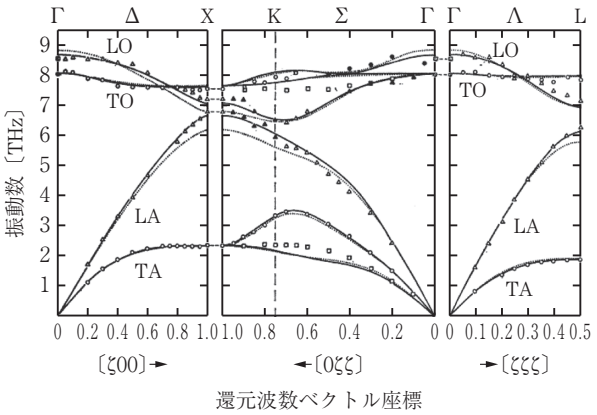


図 1.6　閃亜鉛鉱構造 GaAs のフォノン分散関係の計算結果と中性子散乱法によって測定された実験結果[7]（Reprinted with permission. Copyright（1963）by the American Physical Society.）

索　　引

【あ】

アインシュタイン係数　181
アクセプター　17, 82, 84
アーバックテイル　72, 80
安定化エネルギー　191, 192, 194, 195
鞍部点　71

【い】

イオン化アクセプター　106
イオン化エネルギー　19
イオン化ドナー　106
イオン化不純物束縛励起子　106
位相緩和時間　139, 274, 298
位相緩和速度　139
位相整合条件　139
1 重項励起子　29, 102, 109
1 階微分形状解析　163
因子群解析　9, 10, 313

【う】

ウルツ鉱型半導体　9, 22, 96, 137, 166, 219, 273
ウルツ鉱構造　3, 5, 9, 23, 166, 168, 203, 236
運動量演算子　62, 233
運動量保存則　65

【え】

エネルギー緩和過程　110, 253
エネルギー緩和時間　112
エネルギー緩和速度　261
エネルギー分散関係　1, 122, 229, 233
エネルギー保存則　64, 142, 144, 184, 187, 191, 207
エピタキシャル成長　3
円偏光選択則　137, 138, 277

【お】

応力–ひずみ関係　156, 166
オージェ再結合　42, 89, 93
オージェ再結合係数　90
重い正孔　21, 66, 161, 231, 267
重い正孔サブバンド　231, 233, 273
重い正孔–電子間光学遷移　68
重い正孔励起子　30, 143, 165, 166, 241, 250, 251
折り返し LA フォノンモード　40, 315, 316, 317
折り返し効果　40, 314
折り返しモード　312, 314, 317
音響フォノン　6, 11, 312
音響フォノン散乱　101, 114, 259

【か】

界面フォノン　312
界面フォノンポラリトン　323, 324
界面フォノンラマン散乱　323
界面モード　322
界面ラフネス　255, 257, 261
化学ポテンシャル　183, 188, 192, 195, 310, 311
拡張型指数関数　118
仮想遷移　74
加速定理　296
価電子帯　14, 32, 64, 65, 69, 73, 88, 96, 137, 161, 165, 167, 169, 171, 176, 183, 247
価電子帯有効状態密度　16, 92, 188
荷電励起子　251, 266, 267, 268
荷電励起子束縛エネルギー　267, 268
軽い正孔　21, 66, 160, 231, 267
軽い正孔サブバンド　231, 233, 273
軽い正孔–電子間光学遷移　68
軽い正孔励起子　30, 143, 165, 166, 241, 250, 251
換算有効質量　26, 268, 286
間接遷移　72, 73, 74, 76
間接遷移確率　62, 72
間接遷移型半導体　7, 21, 84, 86, 191, 192, 193

【き】

基底関数　22, 24, 30, 32, 64, 65, 66, 78, 82, 96, 158, 247
軌道角運動量　157
擬フェルミ準位　88, 171, 174, 176, 182, 185, 186, 190
基本結晶格子　1
逆格子空間　4
既約表現　10, 22, 23, 24, 30, 32, 96
逆ボルツマン分布形状　123, 263
キャビティポラリトン　135, 136
吸　収　25, 43, 94
吸収係数　42, 46, 68, 72, 76, 79, 100, 182
吸収スペクトル　76, 79, 94, 116, 250, 252
凝縮状態　171

共鳴トンネル効果　38, 287
共鳴ラマン散乱効果　201
局所電場　48
極性面　3
巨大 2 光子吸収　131, 133
許容遷移　30, 32
擬立方晶近似　167
禁制遷移　29, 30, 32
禁制帯幅　15

【く】

空間群　2
空間相関モデル　209
空間分散　47, 53, 57
屈　折　43
屈折率　45, 51, 100
クラマース-クローニッヒ関係　49
クローニッヒ・ペニイ型方程式　38
クーロン遮蔽効果　171, 172
群速度　149
群　論　1, 31

【け】

欠陥発光　110
結合状態密度　62, 69, 71, 183, 186, 283
結晶構造　1
結晶場分裂　22
結晶場分裂エネルギー　96, 168
減衰全反射（ATR）法　97

【こ】

光学遷移確率　7, 21, 63, 66
光学遷移選択則　137, 154
光学的誘電率　51
光学フォノン　6, 11, 42, 53, 199, 202, 203, 312
光学フォノン振動数　12, 217, 218, 219, 319
光学フォノンポラリトン　42, 55, 56
光学フォノンモード　13
光学利得　141, 145, 146, 150, 151, 153, 181, 182, 184, 189, 190
光学利得スペクトル　189, 190
交換相関相互作用　175
交換相互作用　29, 175, 178
交換相互作用エネルギー　176
交換相互作用分裂エネルギー　29
格子欠陥　105
格子定数　1, 25, 164
格子ひずみ　169, 218, 236, 237, 318
格子ひずみ効果　94, 156, 161, 165, 167, 217, 219, 322
格子不整合　156, 164
格子不整合ひずみ　164
格子ベクトル　1
後方散乱配置　202, 313
国際表記　2
コヒーレント LO フォノン　274, 275, 276
コヒーレント状態　139
コヒーレント領域　113
混晶半導体　13, 24, 115, 148, 210, 227, 228
コンボリューション法　112, 148

【さ】

最近接強結合近似　288, 289
再結合発光確率　3, 42
再構成バンドギャップエネルギー　176, 185, 190
最終状態ダンピング　189
サブバンド　36
サブバンドエネルギー　36, 223, 224, 226, 227, 235, 236
サブバンド間吸収　278, 279
サブバンド間遷移　246, 248, 278, 279, 281
サブバンド間遷移確率　249
サブバンド間発光　278
サブバンド構造　222, 223
3 階微分形状解析　163, 164
3 次の非線形感受率　140, 155
3 重項励起子　29, 102, 109

【し】

時間・空間相関　206
時間分解反射型ポンプ・プローブ分光法　299
試行関数　240, 244
自己束縛励起子　81
自己電気光学効果素子　236, 270, 294, 296
自己補償効果　18
自己無撞着平均場近似　177
自然放出　181, 182
弱局在　255
弱局在励起子　94, 117, 257, 260
弱局在励起子発光　102, 115, 117
斜方晶変形ポテンシャル　158
重心有効質量　26
自由励起子　105, 107, 108, 116, 258, 260
自由励起子発光　102, 105, 107, 111, 112
自由励起子発光寿命　113, 259
縮退 4 光波混合　139, 140, 155, 298
シュタルク階段状態　288, 295
シュタルク階段遷移　292, 293, 294, 295, 297, 299
シュタルク階段励起子　301
準周期性超格子　314
準直接型遷移　87, 304
準熱平衡状態　109, 123, 124, 265
消衰係数　45, 51, 100
状態飽和　105, 131
状態密度　15, 36
状態密度有効質量　178, 179
状態密度臨界点　70
消滅演算子　7
真空ラビ分裂エネルギー　136
振動子強度　30, 48, 50, 66, 68, 96, 97, 102, 109, 112, 154, 165, 212, 250, 269

【す】

ストークス散乱 199, 200
ストークスシフト 116, 117, 255, 256, 259, 260
ストークスラマン散乱強度 318
スピン緩和時間 267
スピン–軌道相互作用 21, 23, 157
スピン–軌道相互作用エネルギー 21, 96, 158, 168
スペクトル形状 123, 127
スペクトル形状解析 162, 186, 263
スペクトル幅 113, 114

【せ】

正孔サブバンド間混成 232, 242
正孔サブバンド構造 230
静水圧変形エネルギーシフト 158
静水圧変形ポテンシャル 157, 159, 168
生成演算子 7
成長中断法 258
静的誘電率 28, 51
正方晶変形エネルギーシフト 158
正方晶変形ポテンシャル 158
赤外活性 9, 11
ゼーマン分裂 109
閃亜鉛鉱型半導体 8, 19, 156, 159, 217, 227, 250, 273
閃亜鉛鉱構造 1, 5, 8, 22, 66, 202, 236, 313
遷移確率 68, 73, 79, 85, 108, 145, 154, 248, 304, 306, 307
遷移行列要素 64, 74, 82, 85, 131, 248

【そ】

双安定性動作 236, 296
相関相互作用 175, 178
相関相互作用エネルギー 176
双極子遷移 30, 63
相互作用ハミルトニアン 63, 73, 78, 201
速度方程式 103, 112, 124, 145
束縛エネルギー 19, 106, 238, 245
束縛励起子 105, 112, 130
束縛励起子発光 102, 105, 107, 110, 111, 112, 134
束縛励起子分子 129, 131
束縛励起子分子発光 134
ゾンマーフェルト因子 79, 251

【た】

タイプⅠヘテロ接合系 33
タイプⅠ量子井戸構造 240
タイプⅠ励起子 240, 243, 245
タイプⅠ励起子分子 262
タイプⅡ準直接遷移型励起子 302, 304
タイプⅡ準直接遷移型励起子分子 302, 307
タイプⅡ超格子 222, 304, 306, 307, 309, 311
タイプⅡヘテロ接合系 33
タイプⅡ励起子 243, 245, 246, 302
タイプⅡ励起子分子 262, 307, 308
ダイヤモンド構造 1
多重量子井戸構造 34, 234, 252, 253, 255, 256, 259, 263, 265, 269, 270, 272, 276, 277, 278
多体効果 171, 175
縦型音響（LA）フォノン 8, 40, 314, 317, 318
縦型光学（LO）フォノン 8, 28, 40, 46, 101, 107, 203, 208, 211, 212, 215, 219, 319, 320
縦型モード振動数 50
縦型励起子 30, 46, 58, 94, 97, 98, 127, 134
縦波モード 46
縦横分裂エネルギー 30, 31, 57, 97, 135, 242, 254
縦横分裂振動数 50
単一量子井戸構造 35, 223, 233, 241, 245, 259
単位胞 9

【ち】

中間状態 73
中間ポラリトン分枝 56
中性アクセプター 82, 83, 105, 129
中性ドナー 83, 105
中性不純物束縛励起子 106
超格子 1, 32, 37, 39, 68, 222, 282, 284, 287, 290, 291, 294, 299, 302, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 322
超微粒子 205, 209
直接遷移 68
直接遷移確率 62
直接遷移型半導体 20, 72, 84, 183, 186

【て】

テラス構造 258, 261
テラヘルツ電磁波 39, 275, 276, 298
テラヘルツ量子カスケードレーザー 282
電気感受率 44, 198, 206
電気双極子近似 63
点 群 2, 22, 156, 166, 202, 203, 313
電子親和力 86
電子・正孔 BCS 状態 180
電子・正孔液体 171, 191, 192, 193
電子・正孔液滴 171, 191, 192, 193, 194, 195
電子・正孔液滴発光 193
電子・正孔プラズマ 171, 172, 176, 177, 180, 181, 182, 183, 185, 186, 187, 188, 190, 191, 194
電子・正孔プラズマ発光 186
電子–フォノン散乱過程 73
電子–フォノン相互作用 20, 99
電束密度 43, 44, 48

伝達行列法 222, 224, 227, 235, 290, 295
伝導帯 14, 33, 64, 65, 69, 73, 88, 96, 161, 167, 171, 176, 183, 194, 247
伝導帯有効状態密度 16, 92, 188
電場変調反射信号 163
電場変調反射スペクトル 291, 292, 295, 299
電場変調反射分光法 161, 162, 283, 292

【と】

透　過 43
統計分布因子 145
動的構造因子 197, 205, 206, 207
等電子トラップ 42, 86, 87
閉じ込め LO フォノンモード 41, 320, 321
閉じ込めモード 312
ドナー 17, 82, 84
ドナー –アクセプター間距離 84, 85
ドナー –アクセプター対発光 42, 83, 84, 85
トリオン 266

【な】

内部量子効率 104

【に】

2 光子共鳴吸収バンド 132, 133
2 光子共鳴励起 121, 131, 132, 133, 137, 138, 276
2 次元状態密度 36
2 次元励起子 239, 240
2 励起子状態 138

【ね】

熱的消光 104
熱分布 108

【は】

背景誘電率 28, 49, 51
パウリの排他律 138, 267
波数空間 4
波数ベクトル選択則 207, 208, 209, 210, 313, 315, 317
波数ベクトル保存則 62, 65, 66, 72, 142, 144, 187, 189, 191, 199
発　光 25, 94, 102, 109, 142, 143, 266
発光減衰プロファイル 111, 112, 117, 128, 148, 259, 260, 265, 306
発光効率 103, 104, 120
発光寿命 103, 125, 126, 149, 195, 259, 260, 265, 306, 308, 311
発光スペクトル 104, 105, 106, 110, 116, 119, 126, 130, 146, 147, 151, 185, 188, 189, 191, 192, 193, 194, 195, 256, 263, 272, 304, 307
発光スペクトル形状 108
発光励起スペクトル 109, 110, 253, 256, 272, 304
発光励起分光法 109
波動関数共鳴 294
波動方程式 43
バレー間交差 25
半極性面 4
反　射 25, 43, 94
反射型時間分解ポンプ・プローブ分光法 273
反射スペクトル 94, 95, 97, 98, 101, 119, 126, 253, 254
反射率 52, 57
反ストークス散乱 199, 200
反転分布 182, 184, 280
半導体マイクロキャビティ 136
バンド間光学遷移 20
バンド間遷移 62, 247
バンド間遷移確率 64, 247, 248
バンドギャップエネルギー 15, 20, 24, 31, 72, 159, 165, 228
バンドギャップ再構成 172, 175, 180
バンドギャップ収縮 175, 177, 185
バンド構造 1, 14, 19, 156
バンド構造増強 87
バンドテイル状態 115, 116
バンド反交差モデル 165
バンド非放物線性 222, 228, 230, 242, 283
バンド–不純物間遷移 42, 82
バンド不連続性 32

【ひ】

ピエゾ電気定数 236
ピエゾ電場 3, 236, 237
ピエゾ分極 236
光カーゲート法 149
光双安定性デバイス 271
光弾性係数 318
光弾性モデル 318, 319
光電流スペクトル 269, 291, 294
光変調反射スペクトル 163, 165, 166, 255, 283, 284
光変調反射分光法 117, 161, 162, 255, 283, 284
非極性面 4
ヒステリシス現象 195
ひずみエピタキシャル構造 163, 237
ひずみハミルトニアン 157, 167, 168
ひずみ量子井戸構造 236, 243
非発光寿命 103
微分散乱断面積 205
非放物線性パラメータ 228, 229
比誘電率 19, 27
表面空乏層 215
表面フォノンポラリトン 61
表面不活性層 58, 97
表面ポラリトン 42, 60
表面励起子ポラリトン 62, 97, 98

【ふ】

ファインマンダイアグラム 200
ファブリー・ペロー干渉 52, 100, 254, 255
ファン・ホーブ特異性 70
フェルミ準位 16, 215

フェルミの黄金律 63, 73, 77, 88, 91, 247
フェルミ反転因子 184
フェルミ分布関数 15, 88, 92, 183, 186
フェルミ粒子 15, 138
フォトルミネッセンス 102
フォノン 1, 39, 50, 197, 198
フォノン吸収 73, 74, 76
フォノン強度 213, 214
フォノン散乱 87, 113, 258
フォノン相関距離 207, 208, 209, 210
フォノン波数ベクトルの量子化 321
フォノン分散関係 6, 8, 10, 39, 206, 209, 321
フォノン変形ポテンシャル 220
フォノン放出 73, 74, 76, 77
フォノン・ラマン散乱 198, 200
不確定性原理 73
付加的境界条件 58, 59, 97
複素屈折率 45, 51
不純物準位 17
不純物ドーピング 17
負性微分抵抗 271
プラズマ振動数 54, 211
プラズモン 42, 53, 54, 197, 211, 215
プラズモンダンピング 215, 216
ブリルアン散乱 199
ブリルアンゾーン 4, 5, 20
フレンケル型励起子 25
ブロッホ関数 4
ブロッホ振動 39, 288, 296, 297, 298, 300
ブロッホの定理 4
ブロードニング因子 50, 52, 95, 257
——の温度依存性 101
分　極 139
分極相互作用 9, 29
分極密度 43, 44, 48, 198
分極率 48
分散関係 55, 56, 61
分配関数 124

【へ】

平衡キャリア密度 192, 193, 195
平衡定数 124
ベクトルポテンシャル 62, 69
ヘテロ接合構造 32, 156
変形ポテンシャル 158, 167, 168
変形ポテンシャル相互作用 202, 204
偏光選択則 66, 96, 276
偏光特性 68, 249
偏光ベクトル 63, 66, 198, 202
変調ドーピング 266, 278
変調分光法 161
変分法 240, 244, 268

【ほ】

ポインティングベクトル 69
包絡関数 19, 34, 82, 85, 223, 224, 225, 227, 235, 236, 241, 243, 246, 247, 248, 249, 269, 288, 289, 290, 291, 295, 297, 307
包絡関数近似 34
ボース因子 200
ボース統計性の発現 309, 310, 311
ボース分布関数 7, 76, 77, 101, 309
ボース粒子 7, 145, 309
ポテンシャル障壁上ミニバンド構造 284
ボトルネック領域 56, 118
ポラリトン 42, 55
ポラリトン群速度 120
ポラリトン効果 56
ポラリトン方程式 42, 45
ポーラロン 5, 28
ポーラロン効果 28, 177, 178
ボルツマン分布 123, 144
ボルツマン分布関数 16

【ま】

マクスウェル方程式 42, 43

【み】

ミニバンド 38, 292, 293, 300
ミニバンド換算有効質量 286, 287
ミニバンド構造 39, 282, 287
ミニバンド幅 283, 284, 293
ミニバンド分散関係 38, 282, 284, 287, 288, 296
ミニバンド有効質量 284, 286
ミニバンド励起子 300
ミニブリルアンゾーン 38, 282, 296, 312, 314, 315, 316

【も】

モット転移 171, 185
モット転移密度 172, 173, 174, 175, 186, 266

【ゆ】

有限サイズ効果 197, 207, 317
有効温度 123, 128, 129, 187, 193, 195, 311
有効次元 242
有効質量 15, 17, 28, 152, 227, 228, 229, 231
——の逆転 231, 232
有効質量近似 18, 34, 38, 82, 222, 230
有効質量近似クローニッヒ・ペニイ型方程式 283, 284, 291, 303
有効質量近似シュレーディンガー方程式 19, 26, 35, 223, 233, 234, 238
有効質量近似ハミルトニアン 240, 244
有効ボーア半径 19, 27, 31, 37, 83, 85, 121, 238, 239, 242, 243, 250
誘電関数 42, 44, 46, 48, 49, 50, 53, 54, 100, 163, 211
誘電関数応答 42
誘電率 19
誘導吸収 145
誘導放出 66, 141, 145, 146, 150, 181, 182, 183

【よ】

横型音響（TA）フォノン　8
横型光学（TO）フォノン　8, 203, 212
横型モード振動数　50
横型励起子　29, 59, 94, 97, 98, 127, 134
横波モード　46

【ら】

ラマン活性　9, 11, 202, 203
ラマン散乱　197, 201, 207, 209, 210, 314, 315, 316, 317, 318, 324
ラマン散乱スペクトル　203, 204, 208, 210, 212, 214, 220, 314, 317, 318, 320, 323
ラマン散乱選択則　197, 202, 203, 204, 205, 313, 314, 320
ラマン散乱断面積　205
ラマン散乱分光法　5, 56
ラマンシフト　199
ラマンテンソル　197, 200, 202, 203, 205, 313
ランダム位相近似　177, 178
ランダムポテンシャル　115, 117, 255, 257

【り】

量子井戸　68, 113
量子井戸構造　1, 32, 36, 222, 228, 236, 242, 243, 247, 248, 249, 250, 251, 254, 255, 258, 262, 263, 268, 273, 275, 321
量子井戸赤外光検出器　278, 279
量子化エネルギー　34, 35, 37
量子カスケードレーザー　278, 280, 281
量子サイズ効果　32
量子数選択則　248, 249
量子閉じ込め効果　32, 68, 222, 238, 241, 250, 252, 257, 273
量子閉じ込めシュタルク効果　223, 234, 236, 237, 248, 268, 269, 271, 307
量子ビート　138, 139, 140, 141, 276, 298, 300, 301
量子密度　310
量子もつれ光子対　134, 136
量子モンテカルロ法　246, 262, 268, 309
臨界温度　192, 193, 194
臨界遮蔽長　173
臨界点　70
臨界電場強度　293
臨界ブロードニング因子　57
臨界膜厚　164
臨界密度　194, 195

【れ】

励起子　1, 25, 37, 42, 50, 53, 57, 78, 79, 96, 97, 100, 101, 102, 103, 106, 108, 112, 113, 114, 116, 122, 124, 125, 126, 128, 136, 145, 156, 163, 172, 191, 238, 242, 243, 244, 251, 252, 253, 255, 262, 265, 269, 271, 310, 311
——吸収スペクトル　79, 95, 116, 250, 252
——発光減衰プロファイル　111, 117, 128, 148, 260, 265, 306
——発光寿命　113, 114, 126, 258, 260
——発光スペクトル　105, 106, 107, 110, 116, 256, 263, 265, 267
——発光励起スペクトル　110, 253, 256, 272, 304
——反射スペクトル　58, 95, 97, 98, 101, 105, 119, 127, 253, 254
励起子エネルギーの温度依存性　98
励起子エネルギー分散　26
励起子-キャリア散乱　141
励起子形成時間　112
励起子効果　72, 293
励起子重心運動の量子化　94, 153, 154, 155
励起子振動子強度　79, 113, 114, 163, 195, 242, 252
励起子生成率　103
励起子遷移　77, 96, 161, 234, 250, 254, 269
励起子束縛エネルギー　27, 31, 37, 79, 98, 121, 146, 151, 156, 173, 239, 241, 242, 272, 293, 309
励起子-電子散乱　94, 143, 153
励起子-電子散乱発光　144, 145, 152
励起子非弾性散乱過程　94, 141, 145
励起子-フォノン相互作用　72, 81, 102, 107
励起子分子　94, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 133, 137, 138, 139, 140, 141, 191, 193, 238, 264, 273, 276, 308, 310, 311
励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱（BRHPS）　133, 134, 135
励起子分子束縛エネルギー　121, 122, 123, 124, 126, 130, 133, 138, 139, 193, 262, 263, 264, 277, 309
励起子分子発光　123, 125, 126, 127, 128, 132, 134, 135, 146, 185, 262, 263, 272, 307
励起子分子量子ビート　137, 276, 277
励起子包絡関数　26, 78
励起子ホッピング移動　261
励起子ポラリトン　28, 42, 55, 56, 57, 58, 60, 94, 95, 118, 120, 133, 134, 149
励起子ポラリトン発光　102, 118, 120
励起子ポラリトン分散関係　55, 57, 119
励起子有効振動子強度　114, 258
励起子有効ボーア半径　172, 173, 174
励起子量子ビート　273, 274, 275, 276
励起子-励起子散乱　94, 141, 142, 145, 146, 151, 180, 272

励起子-励起子散乱発光 143, 148, 152, 185, 272
励起子-励起子衝突 127
励起子-励起子分子系 123, 124, 128, 309, 311, 312
レイリー散乱 197
レーザー発振 141, 151, 190, 191, 280, 282
連続状態 27, 79
連続弾性体モデル 314, 317

【わ】

ワニエ型励起子 25
ワニエ・シュタルク局在 222, 287, 292, 293, 297
ワニエ・シュタルク局在状態 288, 290, 291, 293, 294, 297, 298, 299, 300, 301
湾曲因子 24

【A】

Airy の微分方程式 235
Anderson 局在 115, 255
A 励起子 30, 94, 97, 98, 99, 104, 105, 110, 137, 138, 141, 146, 147, 151, 169

【B】

Beni-Rice 理論 178, 180
Bernard-Duraffourg の条件 184
B 励起子 30, 94, 97, 98, 99, 105, 110, 137, 138, 141, 169

【C】

Clausius-Mossotti の式 48
C 励起子 30, 97, 169

【D】

DALA（disorder activated LA）モード 211
DATA（disorder activated TA）モード 211
Debye-Hükel 近似 173, 175
Debye-Hükel 遮蔽長 173
Drude モデル 54

【E】

Elliott ステップ 79

【F】

Fermi-Dirac 積分 188
Franz-Keldysh 振動 284, 286, 287, 293
Fröhlich 結合定数 28
Fröhlich 相互作用 202, 204, 205, 320, 323

【H】

Haynes 則 106, 262, 309
Hermann-Mauguin 記号 2

【K】

Koster 記号 22
k*·*p 摂動論 66, 157, 167, 228

【L】

Landsberg ブロードニング 189
LO フォノンサイドバンド 107, 108, 109, 194, 304
LO フォノン散乱 101, 118, 252, 280, 298
LO フォノン-プラズモン結合（LOPC）モード 197, 211, 212, 213, 214, 215, 216
LO フォノンレプリカ 107
Luttinger-Kohn ハミルトニアン 223, 230, 232, 233
Luttinger パラメータ 231
Lyddane-Sachs-Teller 関係式 51, 211

【M】

Mulliken 記号 10, 22

【P】

pseudomorphic 成長 164, 243

【R】

Roosbroeck-Shockley 関係 42, 87, 89

【S】

Schönflies 記号 2
sp^3 混成軌道 1

【T】

Thomas-Fermi 遮蔽長 173

【U】

Urbach-Martienssen 則 80

【V】

van Hove 特異点 283
Varshni 則 20, 99
Vashishta-Kalia 理論 176, 177
Vegard の法則 25, 164
VSL（variable stripe length）法 150, 153

【Γ】

Γ-X 混成 304, 305
Γ-X 混成因子 305, 306
Γ-X サブバンド交差 301, 303
Γ-X バレイ交差 194

―― 著 者 略 歴 ――

1978 年　関西学院大学理学部物理学科卒業
1980 年　関西学院大学大学院前期博士課程修了（物理学専攻）
1980 年　日東電工株式会社勤務
1983 年　関西学院大学理学部実験助手
1987 年　理学博士（関西学院大学）
1988 年　大阪市立大学工学部助手
1991 年　大阪市立大学工学部講師
1995 年　大阪市立大学工学部助教授
1999 年　大阪市立大学工学部教授
　　現在に至る

半導体の光物性
Optical Properties of Semiconductors
© Masaaki Nakayama 2013

2013 年 8 月 30 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　　者　中山正昭（なかやま まさあき）
発 行 者　株式会社　コロナ社
　　代 表 者　牛来真也
印 刷 所　新日本印刷株式会社

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発行所　株式会社　**コ　ロ　ナ　社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo　Japan
振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-00852-4　（横尾）　（製本：愛千製本所）
Printed in Japan

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めておりません。
落丁・乱丁本はお取替えいたします