

目 次

1章 序 章

1.1 光エレクトロニクス	1
1.1.1 光エレクトロニクスの生い立ち ...	1
1.1.2 光デバイスと光コンポーネント ...	2
1.1.3 光通信	5
1.1.4 情報記録・再生	6
1.1.5 像情報の入出力	7
1.1.6 その他の応用	7
1.1.7 今後の展望	9
1.2 半導体レーザー	9
1.3 半導体光集積回路	11
参考文献	12

2章 半導体における発光および非発光再結合

2.1 ヘテロ接合と注入	27
2.1.1 ヘテロ接合	27
2.1.2 注入および漏れ過程	29
2.2 発光再結合過程	30
2.2.1 自然放出と誘導放出	30
2.2.2 半導体中の発光遷移過程—直接遷移と間接遷移	32
2.2.3 バンド間直接遷移確率の $k \cdot p$ 摂動理論	33
2.2.4 バンド—不純物準位間遷移の行列要素	34
2.2.5 バンドテールを考慮した(改良された)遷移確率の理論 (Stern の理論)	34
2.2.6 キャリア密度によって変化する状態密度と利得の数値計算	35
2.3 非発光再結合過程	36
2.3.1 単一準位捕獲中心による再結合の確率	36
2.3.2 オージェ非発光再結合過程	37
2.3.3 キャリア寿命と量子効率の測定 ...	37
2.3.4 再結合過程間の競合	40
2.4 電気的および熱的特性	41
2.4.1 移動度	41
2.4.2 キャリア統計	42
2.4.3 熱抵抗と熱時定数	42
2.4.4 ホットエレクトロン	43
2.5 光吸収と分散	44

2	目	次
2.5.1	伝導帯・価電子帯間光吸収と分散 44	分散..... 44
2.5.2	バンド内光吸収(プラズマ吸収)と 参考文献.....45	2.5.3 価電子帯間光吸収44
付録——2 A 遷移確率の理論.....48		
2 A.1	時間に依存する摂動理論のまとめ48	2 A.3 バンド・不純物準位間遷移行列要素の導出.....49
2 A.2	$k \cdot p$ 摂動法による半導体のバンド構造と遷移確率の表現.....48	2 A.4 オージェ再結合過程の遷移確率の表現.....49
3章 半導体光導波路		
3.1	光導波路の重要性51	
3.2	光導波路の基礎52	
3.2.1	TEモード54	3.2.7 閉じ込め係数63
3.2.2	TMモード56	3.2.8 分布屈折率平板導波路65
3.2.3	モードの直交性57	3.2.9 実効屈折率と管内波長65
3.2.4	近視野像58	3.2.10 誘電体光導波路材料と導波路形成法66
3.2.5	遠視野像と出射角59	
3.2.6	開口数(NA)と全反射角60	
3.3	三次元光導波路と単一モード条件67	
3.3.1	等価屈折率法67	3.3.3 閉じ込め係数69
3.3.2	単一モード条件68	
3.4	III-V 族半導体の諸定数69	
3.4.1	GaAs/Al _x Ga _{1-x} As ヘテロ構造69	3.4.4 キャリア濃度変化に伴う屈折率変化74
3.4.2	Ga _x In _{1-x} As _y P _{1-y} /InP ヘテロ構造.....70	
3.4.3	吸収損失73	
3.5	半導体光導波路76	
3.6	光導波路の諸性質79	
3.6.1	反射率の偏波依存性80	3.6.3 光導波路の結合83
3.6.2	散乱損失80	3.6.4 光学異方性84
参考文献.....86		
付録——3 A.....88		
3A.1	遠視野像88	3A.2 単一モード条件90

4章 基本的な光デバイス

<p>4.1 半導体発光材料91</p> <p> 4.1.1 短波長帯光源用半導体材料93</p> <p> 4.1.2 長波長帯光源用半導体材料94</p> <p>4.2 発光ダイオード(LED)95</p> <p> 4.2.1 GaAlAs系発光ダイオード96</p> <p> 4.2.2 GaInAsP/InP発光ダイオード.....97</p> <p>4.3 半導体レーザー98</p> <p> 4.3.1 レーザの発振原理98</p> <p> 4.3.2 レーザの発振条件.....100</p> <p> 4.3.3 二重ヘテロ構造による光とキャリア アの閉じ込め.....101</p> <p> 4.3.4 二重ヘテロ構造半導体レーザーの動 作.....102</p> <p>4.4 光検出器.....109</p> <p> 4.4.1 光検出器の原理.....109</p> <p> 4.4.2 PINホトダイオードの原理.....110</p> <p> 4.4.3 アバランシェホトダイオード (APD)111</p> <p>参考文献114</p>	<p> 4.1.3 波長 $2\mu\text{m}$ 以上の光源用材料.....95</p> <p> 4.2.3 発光ダイオード98</p> <p> 4.3.5 等価回路と電源回路.....104</p> <p> 4.3.6 信頼性向上のためのアプローチ.....105</p> <p> 4.3.7 半導体レーザーのモード制御 ——その基礎——.....106</p> <p> 4.4.4 ホトダイオードとその特性.....112</p> <p> 4.4.5 雑音と最小受信電力.....113</p>
--	--

5章 誘導放出と発振モード

<p>5.1 電磁界の量子化と光放出.....117</p> <p> 5.1.1 電磁界の量子化.....117</p> <p> 5.1.2 相互作用ハミルトニアン.....118</p> <p>5.2 複素分極率と光増幅.....122</p> <p> 5.2.1 電子分極.....122</p> <p> 5.2.2 進行波による表現.....122</p> <p> 5.2.3 定在波による表現.....124</p> <p>5.3 自然放出の古典的扱い.....126</p> <p> 5.3.1 自然放出による共振モードの励振 126</p> <p>5.4 レーザ発振条件の表し方.....130</p> <p> 5.4.1 単一共振器.....130</p>	<p> 5.1.3 遷移確率.....119</p> <p> 5.1.4 電子と光子のエネルギー分布.....121</p> <p> 5.2.4 振幅変化と位相変化.....125</p> <p> 5.2.5 光子数の変化.....126</p> <p> 5.3.2 自然放出光係数.....128</p> <p> 5.4.2 外側領域への電磁界しみ出し効果 と発振しきい値.....131</p>
---	---

5.4.3 外部共振器	131		
5.5 非線形分極			132
参考文献			133

6章 半導体レーザーの密度行列解析

6.1 テール準位を用いた解析			136
6.2 密度行列			137
6.3 電子緩和効果			140
6.3.1 電子散乱と擬熱平衡分布	140		6.3.3 電子の空間分布
6.3.2 緩和時間	142		6.3.4 半導体での密度行列の方程式
6.4 線形利得			146
6.4.1 不純物濃度が小さい場合の線形利得	146		6.4.2 不純物が存在する半導体での線形利得
6.5 しきい値電流の表現			154
6.5.1 自然放出による電子寿命時間	154		6.5.2 しきい値電流の温度変化
6.6 飽和効果			158
6.6.1 摂動展開の方法	158		6.6.5 注入電子密度と有効電子密度
6.6.2 密度行列の摂動展開	160		6.6.6 モード競合を含めたレート方程式
6.6.3 高次利得定数	161		165
6.6.4 注入電流と利得定数の関係	163		
6.7 レーザの発振特性			167
6.7.1 利得分布と光スペクトラム	167		6.7.4 注入電流を基準にした利得定数表現
6.7.2 キャリアの空間分布	169		172
6.7.3 横モード制御と縦モード特性	170		
6.8 飽和とヒステリシス			173
6.8.1 モード競合	173		6.8.2 発振モードのヒステリシス現象
6.9 量子井戸構造			175
参考文献			179
付録—6 A 密度行列の各摂動次数項の導出			181
付録—2 B 線形利得定数計算例			182

7章 半導体レーザーのレート方程式による解析

7.1 レート方程式			183
7.1.1 レート方程式の導出	184		7.1.2 レート方程式の適用限界
7.2 発振条件と定常状態			191

7・2・1 発振条件と定常状態.....191	7・2・2 自然放出光の効果.....193
7・3 効率と出力.....195	
7・3・1 内部量子効率.....195	7・3・2 外部微分量子効率と出力.....196
7・4 拡散の効果.....197	
7・4・1 キャリア分布とレート方程式.....197	7・4・2 拡散の効果.....199
7・5 横モード特性.....200	
7・5・1 レーザの導波機構.....200	7・5・2 横モードの安定化.....202
7・6 非線形現象.....203	
7・7 温度特性.....205	
7・7・1 しきい値電流の温度特性.....205	7・7・2 しきい値電流の構成.....206
参考文献.....210	
付録——7 バンド内緩和を考慮した四準位レート方程式.....215	

8章 半導体レーザーの変調特性

8・1 直接変調.....217	
8・2 半導体レーザーの強度変調の基本特性.....218	
8・2・1 レート方程式による解析.....218	8・2・4 緩和振動の抑制.....224
8・2・2 共振状現象.....221	8・2・5 狭ストライプ化と緩和振動の抑制227
8・2・3 過渡応答と緩和振動.....223	
8・3 発振スペクトルとその動的広がり.....229	
8・3・1 動的スペクトル広がりとの動的波長 シフト.....229	8・3・2 キャリア変動の解析と動的波長シ フト.....231
	8・3・3 動的スペクトル広がり.....234
8・4 変調ひずみ.....237	
参考文献.....242	

9章 半導体レーザーの光制御と雑音

9・1 ファンデルポールの方程式.....247	
9・2 光増幅と注入同期.....248	
9・2・1 注入同期形増幅器.....248	9・2・2 共振形増幅器.....252
9・3 反射波雑音.....254	
9・3・1 $L_2 < L_c/2$ の場合.....254	9・3・2 $L_2 \geq L_c/2$ の場合.....255
9・4 自然放出による雑音とスペクトル幅.....257	
9・5 モードホッピングとモード競合雑音.....262	
9・6 超短光パルス発生とモード同期.....265	

参考文献	268
------------	-----

10章 通常の半導体レーザー

10.1 通常の半導体レーザーの種類と構造	271	
10.1.1 半導体レーザーの基本構造	271	10.1.4 半導体レーザーにおける電流の流れ
10.1.2 長波長帯半導体レーザーの種類と構造	274	279
10.1.3 短波長帯半導体レーザーの種類と構造	277	10.1.5 熱抵抗
		283
10.2 半導体レーザーの横モード制御	285	
10.2.1 屈折率形導波と利得形導波	285	10.2.2 接合面に垂直方向および平行方向の横モード制御
		285
10.3 半導体レーザーの動作	286	
10.3.1 注入電流-光出力特性 ($I-L$ 特性)	286	10.3.3 温度特性
		291
10.3.2 発振スペクトル	289	10.3.4 出射光パターン
		294
10.3.5 半導体レーザーの雑音		298
10.4 信頼性	299	
10.4.1 寿命	299	10.4.3 結晶成長技術と信頼性
10.4.2 半導体レーザーの劣化	301	305
参考文献		306

11章 集積レーザー

11.1 レーザ反射器のモノリシック形成	313	
11.2 出力導波路付集積レーザー	315	
11.3 各種の集積レーザー	317	
11.4 導波路間の結合	318	
11.4.1 ITG 構造の結合特性	319	11.4.3 LOC 構造の結合特性
11.4.2 BJB 構造の結合特性	324	325
11.5 分布反射器(DBR)の解析	325	
11.6 グレーティング結合器	328	
11.7 集積レーザーの発振条件	329	
11.7.1 分布反射器(DBR)レーザー	329	11.7.3 複合共振器レーザー
11.7.2 分布帰還形(DFB)レーザー	332	334
参考文献		335

12章 動的単一モードレーザ

12.1	動的単一モード(DSM)レーザ	341
12.2	動的単一モード(DSM)動作条件	345
12.3	DSMレーザの構造と波長選択性	347
12.3.1	分布反射形(DBR)レーザ	347
12.3.2	分布帰還形(DFB)レーザ	351
12.3.3	複合共振器レーザ	352
12.4	DSMレーザの動作特性	348
12.4.1	DSMレーザの作製工程	354
12.4.2	DSMレーザの発振静特性	356
12.4.3	DSMレーザの直接変調特性	361
	参考文献	365

13章 光集積回路

13.1	半導体光集積回路	369
13.2	半導体光集積回路における相互接続	370
13.3	光導波路の散乱損失	371
13.4	集積化に伴う光デバイス間の相互作用	372
13.5	集積化光デバイス	375
13.6	光デバイスの集積化	377
13.7	光デバイスと電子デバイスの集積	379
13.8	アレイおよび積層形光集積回路	381
13.9	光集積回路の適用分野	382
	参考文献	385

14章 混晶のエピタキシー

14.1	結晶構造	391
14.2	混晶の禁制帯幅と組成	392
14.3	液相エピタキシャル法	394
14.3.1	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ の格子整合 および禁制帯幅	396
14.3.2	融液の制御と格子整合	397
14.4	結晶成長の方法および膜厚と組成の制御	399
14.5	AlGaAs/GaAs および GaInAsP/InP における相平衡	402
14.6	気相エピタキシャル法	409
14.6.1	ハロゲン輸送法	409
14.6.2	有機金属熱分解法	413
14.7	分子線エピタキシャル法	419
	参考文献	421

15章 半導体レーザー・光集積回路プロセス

15.1	リソグラフィ	425		
15.1.1	ホトリソグラフィ	425	15.1.3	電子およびイオンビーム露光
15.1.2	X線露光法	426		
15.2	エッチング	429		
15.2.1	ウェットエッチング	429	15.2.3	加工損傷
15.2.2	ドライエッチング	436		
15.3	グレーティングの製作	442		
15.4	埋込み成長	446		
15.5	膜形成	449		
15.6	電極形成	450		
15.7	ヒートシンク	450		
	参考文献	452		

16章 半導体レーザーの応用

16.1	半導体レーザーの応用上の特徴	455		
16.2	半導体レーザーと外部光学系との結合	457		
16.2.1	半導体レーザーと単一モードファイバとの結合	458	16.2.3	発光ダイオードと多モードファイバとの結合
16.2.2	半導体レーザーと多モードファイバとの結合	458		
16.3	光通信への応用	459		
16.4	光ディスクメモリへの応用	462		
16.5	レーザープリンタへの応用	463		
16.6	センサへの応用	464		
	参考文献	466		

索引	469
----	-----