

は し が き

光エレクトロニクスという言葉は、光通信、光情報処理を中心とした技術分野のことであるが、その定義はあまり明確ではない。

一方、量子エレクトロニクスという言葉もあって、これはレーザを中心とした技術分野であるが、量子効果を用いた他の技術分野は入るのか入らないのか、やはり明確ではない。

光・量子エレクトロニクスとなると、ましてその内容は判然としないが、レーザを主たる光源とした光技術の分野、ということであろう。光技術は21世紀に向け、発展を続ける新技術の中心である。

量子エレクトロニクス、あるいは光エレクトロニクスに関する教科書は、世に多く出版されている。ここにまた1冊を加えることは単に屋上屋を重ねることになるのではないかと危惧がもたれるが、本書では、光エレクトロニクス、量子エレクトロニクスの基礎の部分、特にレーザの基礎となる部分を中心にまとめてみた。その点で、他書とは異なった特長が出ていると考えている。

なお、執筆の担当は、以下のとおりである。

- 1, 2章……………藤岡 知夫
- 3, 6章……………齊藤 英明
- 4, 5, 7, 8章……………小原 實

本書の執筆の依頼を、早稲田大学堀内和夫教授を通していただいたのは、私が未だ慶応義塾大学に勤務していたころで、もう10年も前のことであろう。その間、辛抱強く待っていただいたコロナ社の方々に深謝の意を表したい。

1991年7月

藤 岡 知 夫

目 次



レーザと量子エレクトロニクス

1.1 レーザで何ができるか	1
1.1.1 光 通 信	1
1.1.2 レーザ加工	3
1.2 レーザ光と通常の光との違い	4
1.3 量子エレクトロニクスとはどんな学問か	5
1.4 レーザとは何か	6
1.5 コヒーレントな光	10
1.6 レーザによって開かれる新しい技術	11



光の電磁気学的取扱い

2.1 電磁気学とは何か	13
2.2 マクスウェルの方程式	14
2.3 電 磁 波	15
2.4 ファイバ中の電磁波	17
演 習 問 題	23



量子力学とスペクトルの基礎

3.1 はじめに	24
3.2 量子力学の歴史的背景	25
3.3 プランクの黒体放射	28
3.4 ボーアの理論	34
3.5 エネルギー準位	39
3.6 シュレーディンガー波動方程式	42
3.7 分子のエネルギー構造	47
3.8 二原子分子の回転運動と回転スペクトル	50
3.9 二原子分子の振動運動と振動スペクトル	53
3.10 二原子分子の振動-回転運動と振動-回転スペクトル	54
3.11 まとめ	57
演習問題	57



光と物質の相互作用

4.1 古典的振動子モデルによる光の吸収	59
4.2 誘導双極子による光の誘導吸収と誘導放出	63
4.3 半古典的量子論による誘導吸収, 誘導放出過程の記述 (摂動近似解)	65
4.4 ラビ (Rabi) の厳密解	71
演習問題	73



光の増幅作用

5.1	自然放出と誘導放出係数	74
5.2	スペクトルの広がり	77
5.3	吸収と利得係数	80
5.4	二準位系における利得の飽和	81
5.4.1	均一広がりの場合	82
5.5	均一広がりの場合の増幅特性	85
	演習問題	88



共振器とレーザ発振

6.1	はじめに	89
6.2	光線の伝送行列	91
6.3	共振器の安定条件	96
6.4	共振器の構成	99
6.5	波動方程式とガウスビーム	101
6.6	ガウスビームと伝送行列	105
6.7	ガウスビームと共振器；(最低次モード)	106
6.8	共振器の高次モード	109
6.9	共振周波数	113
6.10	レーザ発振	116
6.11	まとめ	124
	演習問題	125



レーザー光の制御

7.1 レーザ光の特徴	126
7.2 レーザスペクトルの狭帯域化	127
7.3 レーザ光の変調	129
7.3.1 直接変調	129
7.3.2 電気光学変調	130
7.3.3 音響光学変調	131
7.4 短パルス化	132
7.4.1 Qスイッチング (Q-switching)	132
7.4.2 キャビティダンプ (cavity dumping)	136
7.4.3 モードロッキング (mode locking: モード同期)	137
7.4.4 レーザパルス圧縮	142
演習問題	143



レーザーの応用

8.1 レーザの応用の種類	144
8.2 波動性の利用	145
8.2.1 レーザ計測	145
8.3 波動性と粒子性の利用	149
8.3.1 レーザ同位体分離	149
演習問題	154

演習問題解答

参考文献

索引



レーザと量子エレクトロニクス

1.1 レーザで何ができるか

光・量子エレクトロニクスとは、光を利用した工学である。

その応用として、どのようなものが得られるのか、どのような産業が開けるのか、2つの実例について考えてみよう。

1.1.1 光通信

言葉や画像などの情報を、電気の信号に変え、その信号を伝送し、受信側で送られた信号を復調、再生して元の言葉や画像に戻すのが、電気通信である。電気通信は20世紀に入って急速に発達し、1世紀足らずの間に、今日の文明の根幹をなすまでになった。

電気通信で、電磁波にのせ電気信号を伝送する代わりに、光に情報をのせて伝送するのが、光通信である。光通信はレーザが発明されて、20世紀も4分の3ほどを経たから急速に発展した技術で、電気通信にとって代わろうとしている。

それでは、光通信はどこが優れているのであろうか。まず、光も電磁波であることを思い出していただきたい。同じ電磁波として、光とマイクロ波とどこが違うかということ、波長、および周波数が違う。

波長が $0.6\ \mu\text{m}$ (ミクロン) の赤い光の周波数を考えてみると、光の速度は赤色光もマイクロ波も同じ光速 ($\approx 3 \times 10^8\ \text{m/s}$) であるので、

$$f = \frac{3 \times 10^8}{0.6 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

である。

普通のマイクロ波通信に使われるマイクロ波の周波数は、1～数十GHz(ギガヘルツ, 10^9 Hz)程度であるから、赤い光のほうがマイクロ波より約1万倍、周波数が高いことになる。

ここで、電磁波で情報を送るとき、伝送し得る情報量は、伝送波の周波数帯域に比例して大きくなることを思い出していただきたい。

帯域の幅は、伝送する電磁波の周波数を越えることはできないので、伝送波の周波数が1万倍高いということは、同じ1本の電磁波でも、光のほうが1万倍の情報量が送れることになる。これが光通信の利点の第1である。

第2には、電磁波の波としての性質として、回折による広がり角は、周波数に反比例して小さくなることが挙げられる。そのためマイクロ波に比べ光は、約1万分の1の細いビームにすることができ、したがって細い導波路を通すことができる。

実際の光通信では、直径が1 mm以下の石英ガラスファイバの中を伝送する。このことによって、大きな利点がいくつも出てくる。

まず、第1に、大きな情報の流れが電線に比べてもきわめて細い、閉じた空間を流れることが挙げられる。さらに、情報のリークがなく、また電線のように外部からの電磁誘導による雑音を受けないことも利点である。さらには、石英ファイバの損失が電線などに比べてもきわめて小さい(0.2 dB/km)ため、中継点を長くとれること、価格が安いこと、石英ガラスの成分が地中に最も多く含まれるシリコンであるため、省資源的であること、などが挙げられる。

ファイバの中を通すレーザ光を発振するレーザとしては、半導体レーザが用いられる。これは大きさも数ミリ角以下の小さな装置で、電気から光への変換効率も高く(数十%)、光に情報を与える変調も容易である。

このように、光通信は、全体の容量が小さく安価な上に特性がよく、従来の

通信システムに比べて、コスト対パフォーマンスが格段に優れているため、産業として急速に立ち上がったのである。

1.1.2 レーザ加工

太陽の光を、虫眼鏡で新聞紙の上に集光すると、その焦点で紙が燃え始める。

同じように、レーザの光をレンズで集光するとその焦点できわめて高い温度が得られる。しかもレーザ光は太陽光と違って、原理的には波長の程度の直径まで絞り込むことが可能である。

いま、かりに、 $10\ \mu\text{m}$ の波長で $1\ \text{kW}$ の出力レーザ光を $10\ \mu\text{m}$ の直径の中に絞り込んだとすると、約 $1.3 \times 10^{13}\ \text{W}/\text{m}^2$ というエネルギー密度となる。実際には、レーザの光も理想的な波ではないため、 $10\ \mu\text{m}$ まで絞るのは困難で、 $100\ \mu\text{m}$ くらいになるが、それでも $1.3 \times 10^{11}\ \text{W}/\text{m}^2$ という大きさで、太陽表面のエネルギー密度と比べても、 10^5 倍も大きいことがわかる。

この大きなエネルギーで、金属などを切断するのがレーザ切断で、大きな新しい産業となっている。

切断には、はさみなどの機械的な切断、プラズマや放電による切断などの競争技術もあるが、レーザ切断は幅が狭く、精度が高く、切断によるひずみが小さく、切断速度も速い。また、数値制御が容易で、ロボットと組み合わせやすい。

レーザのパワー密度を下げ、補助的に吹き付けるガスの種類も変えることによって、切断とは逆の溶接を行うことも可能で、レーザ溶接では、異種金属の接合など、他の方法では不可能な技術も可能になる。

さらにはレーザによって、金属の表面を焼き入れたり、表面だけに特殊な合金にしたり、アモルファス化したり、レーザによって初めて可能となった表面処理技術がある。

切断、溶接、表面処理がレーザ加工の3分野で、ロボット技術と結び付き、大きな産業となっている。

1.2 レーザ光と通常の光との違い

光通信に使う半導体レーザと、レーザ加工に使う CO₂ レーザや YAG レーザは、装置としてたがいに非常に違ったものであるが、レーザ光を発振するという点では同じである。

それでは、レーザ光と太陽光や蛍光灯の光は、どのように違うのであろうか。

まず第1に、レーザ光のスペクトル幅は非常に狭いのに対し、太陽光や蛍光灯の光は広いスペクトル幅を持っているという点で違っている。

しかし自然界には、水銀灯からの光やナトリウムからの発光など、線スペクトルと呼ばれる狭いスペクトル幅の光も存在する。これらの光とレーザ光はどこが違うのだろうか。

レーザ光は、コヒーレントな光で、ナトリウムからの光はインコヒーレントであるということができる。コヒーレントとは足並みが揃っているということである。

水面に小石を落とすと波ができるが、たくさんの小石を同一の場所から落とす場合を考えてみよう。

もし、1つの小石を落とした時できる波の山と谷が、つぎに落とす小石によってできる波の山と谷が重なり合うような時間間隔で、つぎつぎに落としていけば、水面の波は強め合って波と谷が大きくなっていく。これがコヒーレントな状態である。

しかしもしたくさんの小石をバラバラに落とすと、おのおのの小石による波の山と谷は重なり合う時もあれば、逆になることもあり、強め合うことはなく、波の波面はバラバラになる。これがインコヒーレントな状態である。

コヒーレントな光をどうやって作るのか、すなわちレーザの原理を解くことが、本書の主題の1つである。

1.3 量子エレクトロニクスとはどんな学問か

本書には、光・量子エレクトロニクスという書名が付いている。

量子エレクトロニクスとはレーザの原理を説き明かす物理学の一分野であり、電子工学の一分野と、光に関する学問である光学のうち、量子エレクトロニクスに関係深い部分を合わせて1冊の本にまとめたのが本書といえる。それでは、量子エレクトロニクスとはどんな学問なのであろうか。

エレクトロニクスまたは電子工学とは、電子の運動の制御を基本とした、科学、工学の体系である。その歴史は、1906年ド・フォレストの三極管の発明をもって、発祥の時と考えてよいであろう。この発明によって、電子の流れがグリッド電圧により、初めて制御され、電子の流れに情報をのせることが可能となったのである。そして現代におけるエレクトロニクスの発展の様子は、読者諸君がよくご存知のとおりである。ポケット電卓、電子時計などから電話、テレビ、計算機、さらにはあらゆる大形機械の制御機構に至るまで、エレクトロニクスの機器で満ちあふれ、現代文明の中樞を担っている。

量子エレクトロニクスとは、英語では quantum electronics で、量子力学の原理を応用したエレクトロニクスだと理解できる。その意味では、トランジスタやダイオードなどの半導体素子は、量子力学的な現象を利用した素子なので、量子エレクトロニクスの中に含まれるといえそうである。事実、1960年ごろに刊行された書物では、quantum electronics の中に、ダイオードやトランジスタが収められているものもある。

言葉の上から考えれば、トランジスタなどの半導体素子はまさに量子エレクトロニクスに入るべきものであるし、過去には入っていたかもしれないが、現在では、半導体工学という大きな分野が、科学、工学の中に形成されている。そのためか、現在、量子エレクトロニクスという言葉の中には、半導体は含まれず、レーザやメーザと、その関連分野や応用分野を指している。

1.4 レーザとは何か

それでは、レーザーやメーザとは、どんな装置なのであろうか。レーザーは light amplification by stimulated emission of radiation, すなわち誘導放出による光の増幅を意味する英語の頭文字をつづって、レーザー (laser) という言葉ができています。メーザは、light を microwave に変えただけで、レーザーが光の波長領域で動作するのに対し、メーザはマイクロ波の波長領域で動作することを示している。メーザが最初に実現したのは、1951年のアンモニアメーザで、レーザーより約10年早い。その当時は、マイクロ波の研究の最盛期で、マイクロ波を利用した通信網が実現しつつあったという時代的背景も影響があったかもしれないが、光をエレクトロニクスに利用することなど考えられてもいなかった。

メーザは、非常に雑音が少なく、安定性がよいという利点があり、宇宙通信の低雑音増幅器として利用したり、アンモニアや水素のメーザの場合は時間の標準に利用されたりした。

レーザーはメーザより約10年遅れ、メーザの発明者でもある Townes とその甥の Schawlow によって1958年に理論的可能性を論じた論文が発表され、1960年には Maiman によって、最初のレーザー発振がルビーを用いて実現された。

メーザが実用化されてからレーザーが出現したため、レーザーは最初光メーザと呼ばれた。しかし、1960年代には爆発的にレーザーの研究が進み、莫大な種類のレーザーが出現して、レーザーという名は定着し、lase (レーザー発振する) という動詞さえ英語では定着した。さらには、メーザさえ、マイクロ波レーザーと呼ばれることもあり、レーザーとメーザでは立場が逆転してしまった。

どのような名で呼ばれようとも、レーザーもメーザも基本的な原理は同じである。しかし、光とマイクロ波では、波長が約 10^{-3} mm と 10 mm, と 10^4 倍も違うのであるから、使用される共振器や導波路などの回路部品は異なるし、光子1個のエネルギー $h\nu$ も 10^4 倍違うので、変換して利用されるエネルギーの形態

索引

【A】

アインシュタインのA,B係数
74
アンペアの法則 13
安定共振器 97
圧力広がり 78

【B】

バルマー系列 37
ボアの軌道半径 36
ボアの量子化条件 36
ボイト関数 79
ボルツマン分布則 8,75
部分反射鏡 90
分散 62
ブラッグ回折 131
ブラケット系列 37

【C】

CPM 141

【D】

第2量子化 74
電気光学光変調 130
電気双極子遷移 63
電気素量 34
電気通信 1
電子配位 41
電子スペクトル 50
電子の質量 34
伝送行列 93

電磁波 15
電磁気学 13
同位体シフト 149
ドップラー幅 78
ドップラー広がり 78
銅蒸気レーザー 152

【E】

エネルギー等分配則 48
エタロン 129
emission 27
eV (エレクトロンボルト) 39

【F】

ファブリー・ペロー共振器 89
ファイバ中の電磁波 17
ファラデーの法則 13
フェルミの黄金律 69
フィネス 123
フランツ・ノドビックの式 87

【G】

ガウスビーム 103,105
ガウス型 139
——のスペクトル 78
剛体モデル 48
グレーデッドインデックス型 17
グレーティング 129
グレーティング対 143

逆転分布 8,89
g因子 100

【H】

波動方程式 42
波動関数 65
波動性の利用 145
波面曲率 108
ハミルトニアン 43
半導体レーザー 2
半古典的モデル 65
半共心点型共振器 101
半共焦点型共振器 101
反射率フィネス 124
発散角 108
発振のしきい値 117
平行平面型共振器 100
並進運動 47
ヘルムホルツ方程式 102
光ファイバ機能型センサ 148
光カー効果 143
光量子説 32
光通信 1
光のエネルギー集中性 126
光のフィードバック回路 89
光のコヒーレンス 126
方位量子数 39
ホールバーニング 85
放射エネルギー 27
飽和フルエンス 84
飽和強度 83
飽和パラメータ 83
不安定共振器 97
不確定性原理 126

不均一広がり 78
 複素電気感受率 61
 複素伝搬定数 62
 複素誘電率 62
 負温度状態 8
 フーリエ変換限界パルス 139
 フーリエ変換の関係 126
 フリーランニング発振 138
 フリースペクトルレンジ 123
 負 枝 56

[[I]]

インコヒーレント 4
 1次元調和振動子 64

[[K]]

可飽和吸収体 136
 回 折 104
 回転波近似 67
 回転スペクトル 50
 回転運動 48
 可干渉性 89
 カー効果 130
 換算質量 53
 慣性モーメント 51
 干渉計測 145
 干 渉 計 145
 干渉じま 146
 重ね合わせの状態 70
 機械的エネルギー 25
 幾何光学 91
 均 一 幅 85
 均一な広がり 78
 禁制遷移 52
 近軸波動方程式 103
 キルヒホッフの法則 27

コヒーレント 4
 —な光 10
 コヒーレント励起状態 72
 黒 体 27
 —の放射 27
 黒体放射のエネルギー密度 68
 光 線 91
 光 子 32
 古典的振動子モデル 59
 固有関数 45
 固 有 値 30
 キャビティダンピング 136
 共鳴角周波数 60
 強制モード同期 140
 共振器の光子寿命 132
 共振器の Q 値 132
 共振周波数 91, 114
 共心点型共振器 100
 巨視的分極 61
 巨視的誘導双極子モーメント 69
 共焦因子 104
 共焦点型共振器 101
 許容遷移 52
 吸 収 27
 吸収係数 62

[[L]]

L-S 相互作用 41

[[M]]

マイケルソン干渉計 147
 マイクロ波通信 2
 マクスウェル-プロッホ方程式 87
 マクスウェルの方程式 28
 マクスウェルの速度分布則

面積度フィネス 124
 メーザ 6
 モードプリング 137
 モードプッシング 137
 モードロッキング 137
 モードの数 30
 無放射減衰 60
 MOPA 152

[[N]]

内部エネルギー 25
 熱エネルギー 27
 熱 放 射 27
 —のエネルギー分布 28
 二準位系 82, 83
 二準位モデル 82
 ニュートンの冷却の法則 27

[[O]]

音響光学変調 131

[[P]]

パラ水素回転ラマンレーザ 154
 パッシェン系列 37
 ポッケルス効果 130
 プント (Pfund) 系列 37
 プランクの黒体放射の法則 74
 プランクの定数 32
 P 枝 56
 power broadning 78
 photon 32
 π パルス 71

【Q】

Q スイッチング 132

Q 値 123

【R】

ラビ (Rabi) の厳密解 71

ライマン系列 37

レイリー領域 104

励起エネルギー 89

レート方程式 75

レーザ媒質 89

レーザ分子法 150

レーザ同位体分離 149

レーザ動作 89

レーザ原子法 150

レーザ加工 3

レーザ計測 145

レーザ光

—の変調 129

—の干渉 146

—の性質 127

—の特徴 126

レーザ共振器 89

レーザパルス圧縮 142

レーザ 6

六フッ化ウラン 153

ローレンツ型 63

ローレンツ型スペクトル線 77

ローレンツ力 31

量子化条件 35, 39

量子力学的モデル 65

リュードベリ定数 37

R 枝 56

Rigrod の式 85, 119

【S】

最大増幅光強度 86

最大増幅フルエンス 87

最大増幅器長 86

最適カップリング 119

三準位系 8

正常分散 62

正の帰還 90

遷移角周波数 60

選択律 54

摂動解 66

しきい値利得 117

振動スペクトル 50

振動数条件 35

振動運動 48

自然放出 7, 60, 74

自然放出寿命 76, 77

スポットサイズ 107

ステップインデックス型

17

水素原子モデル 36

スペクトルの広がり 77

スピン量子数 39

ステファン-ボルツマンの法則
27

遮断角周波数 21

斜入射グレーティング 129

衝突広がり 78

衝突パルスモード同期法 141

周波数チャープ 140

縮退 45

シュレーディンガー方程式 65

主量子数 39

シュタルク効果 42

【T】

縦モード 115

縦モード間隔 116

取出し効率 86

直接変調 129

調和振動子 32

TEM 波 111

【Y】

横緩和時間 72, 85

横モード 115

横モード間隔 116

誘導放出 7, 70

誘導放出断面積 81

誘導放出係数 74, 75

誘導吸収 70

誘導双極子モーメント 63

【Z】

ゼーマン効果 42

全反射鏡 90

磁気量子数 39

自己位相変調 143

増幅周波数帯域 91

ジャイアントパルス 133

状態方程式 26

受動モード同期 140

— 著者略歴 —

藤岡 知夫
 1960年 慶応義塾大学工学部電気工学科
 卒業
 1965年 慶応義塾大学大学院博士課程修
 了
 1968年 工学博士 (慶応義塾大学)
 慶応義塾大学助手、講師、助教
 授を経て
 1979年 慶応義塾大学教授 (工学部電気
 工学科)
 1984年～ (勸応用光学研究所理事、(勸工
 業開発研究所レーザー研究セン
 ター長、レーザーテック(勸)研究所
 長
 1990年 東海大学教授 (開発技術研究所)
 1994年 東海大学教授 (理学部物理学科)
 現在に至る

小原 實
 1971年 慶応義塾大学工学部電気工学科
 卒業
 1976年 慶応義塾大学大学院博士課程修
 了 工学博士
 1986年 慶応義塾大学助教
 1993年 慶応義塾大学教授 (理工学部電
 気工学科) 現在に至る

齊藤 英明
 1973年 慶応義塾大学工学部電気工学科
 卒業
 1978年 慶応義塾大学大学院博士課程修
 了 工学博士
 1978年 石川島播磨重工業(株)
 1986年 (勸)産業創造研究所
 1989年 防衛庁技術研究本部第二研究所
 光波第二研究室主任研究官
 1994年 同 光波第一研究室長
 現在に至る

光・量子エレクトロニクス

Photo and Quantum Electronics

© Fujioka, Obara, Saito 1991

1991年10月5日 初版第1刷発行

2002年9月10日 初版第4刷発行

検印省略

著者 藤岡 知夫
 東京都文京区西片 2-15-18
 小原 實
 川崎市高津区新作 6-1-10-512
 齊藤 英明
 千葉県印旛郡印西町木刈 4-18-10

発行者 株式会社 コロナ社

代表者 牛来辰巳

印刷所 壮光舎印刷株式会社

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 4-339-00138-4

(製本：愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします