

まるわかり

レーザー原論

黒澤 宏 著



株式
会社

オプトロニクス社

まえがき

レーザーは、非常に純粋な周波数あるいは波長を持つ指向性が高く、高強度の光ビームを作りだし、場合によっては光を増幅するデバイスである。サイズから見れば、髪の毛の直径の十分の一から大きなビルの大きさまで、パワーで見れば、 10^{-9} Wの極小出力から1020Wの大出力まで、波長で見ればマイクロ波（あるいは、テラヘルツ波）から軟X線、周波数で見れば $10^{11} \sim 10^{17}$ Hzの広範囲に及ぶ特殊な光源である。光パルスを提供するパルスレーザーでは、 10^4 Jの高エネルギーパルス、 5×10^{-15} sの超短パルスの発生も可能である。このようなレーザーは、世界中を駆けめぐっている光通信用光源として、厚い鉄板に穴を空け、切断し、溶接したり、人間の目の手術に、そして核融合にも利用されている。しかも、まだまだ発展途上にあり、常に新しいレーザーが開発されているのが現状である。

このように極めて広範囲に利用されているレーザーであるが、わずか50年間の間の出来事である。そこで、光はどこから、どのようにして産まれる（光源）、光はどのように伝わる（伝搬）、光はどうやって操る（制御）、光をどうやって見る（検出）、そして光をどのように使う（応用）について、日頃疑問に思っていることに答えるべく、光の中でも、最も扱いやすいレーザー光を中心にこの本を書いた。予想より大部になったため、光学のみ、レーザーのみ、応用に関する部分だけでも読み進めることができるように、下記の三部に分けた。

- I部 レーザーを理解するための光学入門
- II部 レーザーの原理入門
- III部 レーザー光を操る・測る・使う技術

レーザー光に関する光学の原理、レーザーの仕組み、レーザー光の制御技術とその応用について、この本を一冊読めば、一通りの知識が身につくことを願っている。時には数式がたくさん出てくるので、難しく感じられるかもしれない。数学は、あくまでも道具であって、それに惑わされることなく、

最終結果だけでも理解していただきたい。レーザーを深く理解して、うまく使って、新しい世界を開いていただきたい。

最後に、2009年4月号から24回にわたって月刊オプトロニクスに「原点に戻って学ぶレーザー原論」として連載してきた記事を基にして、この本を刊行することになった。(株)オプトロニクス社編集部三島慈弘氏、杉島孝弘氏には、連載原稿をていねいに見ていただいた。単行本をつくる際には、宮崎尚樹氏に原稿の隅々まで目を通しなおしていただいた。この人たちに加えて、(株)オプトロニクス社の上野直樹社長および川尻多加志編集長の叱咤激励がなければ、刊行はおぼつかなかったと思う。ここに記して深謝したい。

2011年4月 黒澤 宏

目 次

序章 レーザーの科学入門	1
1. レーザーの歴史	1
2. 光（電磁波）と原子	4
3. 世界最初に発振に成功したルビーレーザー	6
4. 世界最初に連続発振したヘリウムネオンレーザー	9
5. レーザービームの性質	10
第 部 レーザーを理解するための光学入門	15
第1章 電磁波としての光	16
1. 電場とは	16
2. 磁場とは	19
3. 電場と磁場	20
4. 電磁波の発生	23
5. 電磁波のエネルギー	28
第2章 波の重ね合わせ	31
1. 平面波の表わし方	31
2. 電磁波は平面波	36
3. 波の重ね合わせ	40
第3章 フーリエ変換	46
1. 周期を持つ波形のフーリエ級数展開	46
2. 周期を持たない波形のフーリエ積分	48
3. 時間的なパルス波形のフーリエ展開	53
4. 波束の表現	55
第4章 物質中の光の伝搬 波としての反射と屈折	58
1. 物質と光	58
2. 光電場と原子内電子の振動運動	59

3. 原子からの二次光の発生	62
4. 原子による光の散乱	64
5. 物質中の光の透過	67
6. 反射と屈折	71
第5章 電磁気学から見た光の反射と屈折	76
1. 偏光	76
2. 電磁気学から見た反射と屈折	81
3. 電磁気学から見た反射と屈折 (電場ベクトルの方向と振幅に関する境界条件から)	83
3.1 p偏光の振幅係数	83
3.2 s偏光の振幅係数	85
3.3 空気とガラスの界面における反射と屈折 (空気からガラスに入射する場合)	87
3.4 空気とガラスの界面における反射 (ガラスから空気に入射する場合)	91
4. エネルギーの流れ(反射率と透過率)	94
第6章 光の干渉	97
1. 干渉縞	97
2. 複スリットによる干渉(波面分割二光束干渉)	100
3. 薄膜の干渉(振幅分割二光束干渉)	102
4. 多光束干渉(ファブリーペローエタロン)	104
5. 多層膜干渉(反射防止膜, 多層膜鏡)	109
第7章 波の回折	113
1. 回折とは	114
2. フラウンホーファー回折	116
2.1 単スリットによるフラウンホーファー回折	116
2.2 円形開口による回折と分解能	122
2.3 複スリットによるフラウンホーファー回折	124
2.4 回折格子	126
3. フレネル回折	129

第 部	レーザーの原理入門	133
第 8 章	原子のエネルギー状態と光の吸収・放出	134
1.	電子について	134
2.	電子のエネルギー準位	136
3.	原子のエネルギー状態と遷移	140
4.	原子と光の関係	146
第 9 章	光の増幅とレーザー発振	148
1.	原子のエネルギー準位と共鳴周波数	148
2.	自然遷移と誘導遷移	150
3.	3準位レーザーと4準位レーザー	155
4.	光の増幅と利得	158
5.	レーザー発振	160
第 10 章	レーザー共振器	164
1.	レーザービームを作る	165
2.	共振器の共鳴(縦モード)	167
3.	レーザービーム内強度分布(横モード)	169
4.	種々の共振器構造	171
5.	コヒーレンス	174
第 11 章	連続発振とパルス発振	179
1.	パルス光の性質	180
2.	パルスの時間幅と周波数スペクトル幅	183
3.	Qスイッチ発振	184
4.	モード同期	186
5.	単一周波数発振	194
第 12 章	ガスレーザー	195
1.	ガスレーザーの基本	199
2.	原子ガスレーザー	203
3.	炭酸ガス(CO ₂)レーザー	205
3.1	振動一回転準位	205
3.2	炭酸ガスレーザー	208

4. エキシマレーザー（フッ素レーザーを含む）	210
5. その他のガスレーザー	211
第13章 固体レーザー	213
1. 固体レーザー材料	213
2. 光ポンピング	216
3. ネオジウムレーザー	220
3.1 ルビーレーザー	221
3.2 ネオジウムレーザーの動作と母材	222
3.3 応用に向けたネオジウムレーザー	223
4. チタンサファイアレーザーに見る波長可変レーザー	225
5. ファイバーレーザー	229
第14章 半導体レーザー	233
1. エネルギーバンド構造	233
2. 半導体からの発光（再結合）	241
3. LEDとレーザー	246
4. レーザーの基本構造	248
5. 半導体レーザーの発光	251
5.1 端面発光レーザーの構造	253
5.2 面発光レーザーの構造	255
5.3 量子井戸レーザーと量子カスケードレーザー	257
6. 結晶成長法	261
7. 各種半導体レーザー	263
第 部 レーザー光を操る・測る・使う技術	269
第15章 レーザー光を操る技術入門	270
1. 光電場の振幅と位相	270
2. 結晶中を伝搬する光波	274
3. 電子の非線形振動による非線形光学効果	277
第16章 二次非線形光学効果	283
1. 非線形光学効果とは	283
2. 二次非線形光学過程	285

2.1	第二高調波発生	285
2.2	和周波発生と差周波発生	287
2.3	光パラメトリック発振	291
2.4	非線形光学結晶	293
3.	位相整合	293
3.1	非線形分極波と波長変換波	293
3.2	位相整合	297
3.3	擬位相整合 (Quasi-Phase Matching: QPM)	300
第17章 三次非線形光学効果		304
1.	三次非線形光学過程	304
2.	非線形屈折率	307
3.	自己集光	308
4.	位相共役	309
5.	非線形光学過程とパルス圧縮	314
5.1	自己位相変調	315
5.2	群速度分布	318
5.3	パルス圧縮	320
第18章 非パラメトリック非線形光学過程		322
1.	過飽和吸収	322
2.	二光子吸収	326
3.	誘導光散乱	327
3.1	光散乱入門	328
3.2	誘導ラマン散乱	330
3.3	誘導ブリルアン散乱	335
第19章 外部信号によるレーザー光の制御技術		338
1.	偏光	338
2.	電気光学効果	341
3.	磁気光学効果	347
3.1	磁性体とは	347
3.2	磁気光学効果	348
4.	音響光学素子	353

第20章 レーザー光を測る	357
1. 何を測るか	357
2. 光電効果	360
3. 光電子倍增管 (PMT) とマイクロチャンネルプレート	361
4. 固体センサー	364
4.1 フォトダイオード	364
4.2 固体イメージセンサー	369
5. 熱型光検出素子	374
5.1 熱電対とサーモパイル	374
5.2 焦電 (パイロ) 素子	375
5.3 ボロメーター	377
第21章 低パワーレーザーを使う	378
1. 低パワーレーザー	378
2. レーザーで情報を読み取る, 書き込む	380
3. レーザーで距離, 速度を測る	386
4. ホログラフィー	389
第22章 高パワーレーザーを使う	394
1. 高パワーレーザー	394
2. 工業におけるレーザー応用	395
3. 医療分野におけるレーザー応用	401
4. 高出力レーザー核融合への応用	404
5. 新しいレーザーへの挑戦	406
5.1 高エネルギーレーザーへの挑戦: ペタワットレーザー	408
5.2 短いパルスへの挑戦: アト秒パルス	409
5.3 短い波長への挑戦: X線レーザー	410
5.4 自由なパラメーターを持つ新しいレーザーへの挑戦: X線自由電子レーザー	412
あとがき	415
索引	418

序章

レーザーの科学入門

1917年にアインシュタインが発表した「誘導放出の可能性」の論文に端を発し、それからおよそ40年以上経った1960年にレーザーが発明された。それまでの光と言えば、太陽からの自然光か、ガス灯、電球、蛍光灯などの人工的な光であった。どちらも、原子の中の電子が持っている余分なエネルギーが光として放出されたものである。では、レーザーとこれらの光とどこが違うのか？ 一般的には、レーザー光は広がらない（指向性）、なめらかな（コヒーレンス）、鮮やかな（単色性）、そして輝く（高輝度）光である。しかしながら、レーザー光の持つ最も大きな特徴は波動としての「光の制御性」である。光波の振幅、パワー、波長、位相、周波数、偏光を人為的に操ることができることである。ラジオやTVの放送あるいは携帯電話などには電波が使われている。音声や画像の信号を電波に乗せて遠くまで運び、家庭などで再現している。この電波と同じことを光でできるようになったのがレーザーの発明に始まる。太陽の光や電球ではこれができない。このように便利な光であるレーザーの基礎と実用を中心に、光の発生、性質、物質との係わり、そしてレーザー光を自在に操る技術の基礎である非線形光学について勉強する。読んで、理解して、興味を持つことに主眼を置いて書いてある。原点に戻ってレーザーの科学、そして光の原理からレーザー光を操る技術までを第一歩から勉強するつもりで読んで欲しい。

1 レーザーの歴史

LASERを英語で書くとLight Amplification by the Stimulated Emission of

Radiationである。この言葉がレーザーそのものを的確に説明している。そこで、この言葉の意味を後ろから順に見ていこう。Radiation（放射）は、電磁波のことであり、光速で伝搬する質量を持たないエネルギーのかたまりのことである。可視光、赤外、紫外、ラジオ（電波）波、マイクロ波、X線を含む多様な形で現れる。光ないしは他の形式の電磁放射は波と粒子（光子と呼ばれる）の両方の性質を持っている。Stimulated Emission（誘導放出）は、レーザー光が特別な方法で作られたものであることを示している。通常、原子（ないしは分子）は電磁放射によって自然にエネルギーを放出する。太陽、炎、蛍光灯などはすべて、光を放射することによって余分なエネルギーを放出している。しかしながら、ある場合には、原子や分子は光として余分なエネルギーを、外から入った電磁波によって強制的に電磁波として放出することがある。この過程が誘導放出と呼ばれている。Amplification（増幅）は、光の量が増えることを意味している。誘導放出においては、入射電磁波が原子や分子を刺激してそれらが持つエネルギーを、入射電磁波と完全に調和（整合）した第二の電磁波として放出する。誘導放出された電磁波は、他の原子を刺激して、最初と全く同じ性質の電磁波を作り、その結果、振幅が大きくなる増幅を受ける。Light（光）は、読んで字のごとくであるが、作り出された電磁放射の形式のことである。実際は、人間の目が感じる可視光だけでなく、波長が短すぎたり（紫外）、長すぎて目で見ることができない（感じるができない）電磁波も含まれる。

アルバート・アインシュタインが誘導放出の可能性について最初に書いた論文が1917年である。誘導放出が最初に観測されたのは1920年代であるが、自然放出の方がはるかに起こりやすく、そのために誘導放出は、はるかに弱いものであると、物理学者は長い間考えていた。誘導放出がより強いものになり得る最初のヒントは、第二次世界大戦直後のラジオ波での実験であるが、鍵となる実験は1950年代になってからである。当時コロンビア大学に在籍していたチャールズ・タウンズは、1951年にマイクロ波周波数において誘導放出を作り上げる方法について想像をめぐらしていた。彼のアイデアは、過剰なエネルギーを持つアンモニア分子を分離し、アンモニア分子から放出されたマイクロ波を反射する共振器中をこのアンモニア分子を通過させたときに、それに刺激されてある特定のマイクロ波周波数で過剰なエネルギーを放出するというものである。彼は、この装置を「メーザー（MASER）」と呼んだ。その言葉は、Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiationの

頭文字をとったものである。タウンズと彼の学生であったジェームズ・ゴードンは1954年までメーザーの実験を続け、この装置が増幅器としても発振器としても働くことを見いだした。あるアンモニア分子は24 GHzの周波数でマイクロ波を自然に放出し、この自然放出マイクロ波が他の励起されたアンモニア分子を刺激して同じ周波数のマイクロ波を放出し、その周波数で振動している信号を増幅する。言い換えれば、24 GHzの信号はアンモニア分子を刺激して24 GHzの周波数でマイクロ波を放出し、信号を増幅する。原理的には、正しい材料が見つかったら、このメーザー過程は他の電磁波にも拡張可能であることは明らかであり、次の目標は、当然光の波長であり、多くの研究者がそれに挑戦した。タウンズは、1957年にその研究を開始した。当時、コロンビア大学の大学院生であったゴードン・グールドは、学位取得の研究の中で、光ポンピングという重要かつ新しいアイデアを持っていた。タウンズはグールドと話し合ったときに、レーザーにおける原子を励起するために光ポンピングを利用しようと考えたが、このレーザーのアイデアはグールドの好奇心をそそった。タウンズは彼の義理の兄弟であるアーサー・シャロウに協力を求めた。当時、シャロウは光の誘導放出をいかにして増幅するかについての仕事をしており、光学について深い造詣があった。しばらくして、グールドもこの問題に挑戦しはじめた。彼らは別々に同じ問題に取り組み、両端にミラーが置かれた円筒形レーザー共振器を提案した。光はこのミラー間を往復し、その間に光が増幅される。グールドはこのアイデアを特許出願し、一方のタウンズとシャロウは科学雑誌であるPhysical Review Lettersに論文を投稿した。タウンズはメーザーとレーザーの原理を実証した研究によって、ソ連のアレキサンダー・プロコロフ、ニコライ・バゾフと共に1964年のノーベル物理学賞を受け、一方でグールドは特許によって大金を手に入れた。しかしながら、最終的なレーザー競争の勝者はテオドール・メイマンであり、彼は1960年5月16日にカリフォルニア州マリブにあったヒューズ社の研究所において手の指サイズの合成ルビー結晶からレーザーパルスを発生させることに成功した。

円筒形のルビーを写真用のフラッシュランプからの高輝度光で照射することによってルビー内のクロムイオンを励起する。いくつかの励起されたクロムイオンから自然放出光が得られ、この光が他の励起クロムイオンを刺激して、同じ光波として励起原子が持っている余分なエネルギーを放出する。ルビーロッドの両端に施された銀膜が鏡として働いて共振器を構成し、光波を

往復させ、クロムイオンからのさらなる光を誘導し、赤色光を増幅する結果、光線を形成する。レーザービームは、一方の銀膜に開けられた小さい穴を通して取り出した。レーザー光は694 nmの単色光であり、コヒーレント光であった。メイマンのルビーレーザーはパルス発振であったが、その直後の1961年2月に、アリ・ジャパンは同僚であるベネット、ヘリオットと共に1152.3 nmで連続発振するヘリウムネオンレーザーを発表した。

2 光（電磁波）と原子

レーザーは原子が直接関与する装置であり、その基本は量子力学である。野球のボールから人工衛星、さらには地球に至るまで、その運動はニュートンの運動方程式にしたがう。日食の予測も人工衛星の軌道予測もこの運動方程式にしたがって計算できる。ところで、光が関与するのは原子であり、その中でも原子の中の電子である。原子の構造を見てみよう。我々が想像できる範囲で原子をイメージすると、**図1**のようになるであろう。このような模型は筆者が勝手に考えたのではなく、多くの学者が想像したものである。中央に中性子と陽子からできている原子核があり、その周りを電子が取り囲んでいる。電子は負電荷を持っており、陽子の持つ正電荷と釣り合って全体と

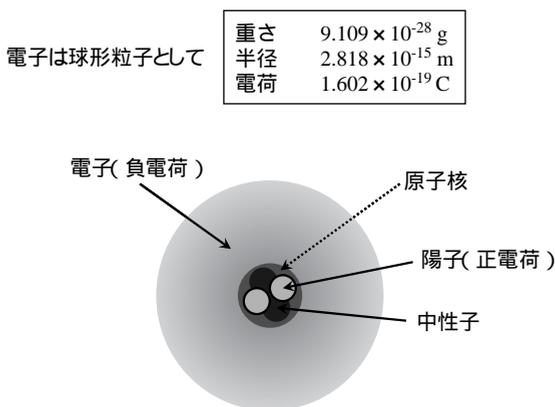


図1 原子の構造（中性子と陽子（正電荷）を中心にして電子（負電荷）が周りを取り囲む）

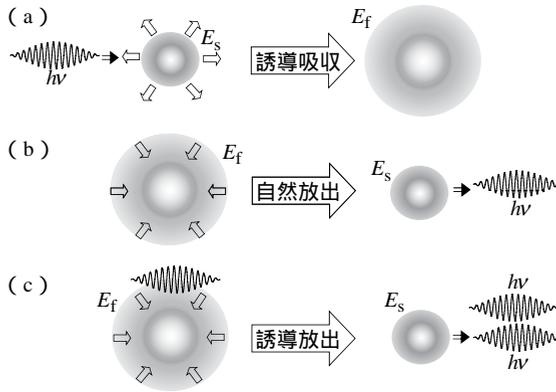


図2 原子と光（原子による光の吸収）

してみれば中性を保っており，なおかつ電荷間に働くクーロン引力によって電子が原子の中に閉じ込められている。このような電子の状態やエネルギーについては次章以降に譲るとして，ここでは，この模型からスタートしよう。なお，このように小さい原子や電子はニュートンの運動方程式にしたがうはずもなく，かつ直接見たことがある人もいないので，想像するしかないのであるが，原理的にはニュートン力学ではなく量子力学にしたがって運動する。その存在は統計的に確率としてしか明らかにできない。

このような原子に光が当たると，原子の中の電子が光からエネルギーをもらってエネルギーを蓄えた状態になるであろう。その状態を図2 (a)のように描いてみる。電子がエネルギーをもらって幾分ふくらんだ形に見える。次に，このエネルギーの高い状態にある原子は，図2 (b)のようにその余分のエネルギーを放出して元のエネルギーの低い状態に戻る。このエネルギーを光の形で放出すると，その原子が光って見える。原子と光の関係は，もう一つある。高いエネルギー状態にある原子に光が当たると，その光に刺激されて原子が余分のエネルギーを光として放出する。この過程を図2 (c)に描いてあり，「誘導放出」と呼んでいるが，(a)の吸収も外からの光によって発生するので，あえて「誘導吸収」と呼ぶこともある。レーザーはこの誘導放出過程を利用したものであり，この原理については次章以降に勉強するとして，ここでは大まかな話をしよう。ただ，誘導放出の特徴は，入射した光と同じ周波数（波長），同じ「位相」，同じ「偏光」，同じ方向に進む波を出すことで

ある。このような性質を持つ誘導放出が光の増幅を生じるが、光と原子が共存すれば当然（誘導）吸収も存在する。エネルギーが高い状態にある原子数は低い状態にある原子数より多くなることは決してない。それ故、原子と光があると、誘導放出が誘導吸収より多くなることはない。この状況であれば決して光の増幅はありえない。されば、光の増幅を実現するためには、エネルギーの高い原子を低い原子より多い状態を作らなければならない。このような状態を「反転分布」とか「負温度状態」とか呼んでいる。反転分布状態を作る方法には、電氣的、化学的、光学的な外部エネルギーを入れなければならない。これをエネルギーの高い状態の原子を作る意味で「ポンピング」と呼んでいる。適当なポンピングによって反転分布状態が維持されている「活性媒質」中を光が通過すると、その光の振幅が大きくなる「増幅」が実現できる。

3 世界最初に発振に成功したルビーレーザー

メイマンがルビーレーザーの発振に成功したのは、彼がルビーの光学的性質を詳細に調べ、レーザー用光学系の最適設計をしたからである。レーザーを設計する際には、材料の性質が最も重要であり、レーザーの波長（周波数）や取り出すことができる最大のエネルギーなどの量が材料によって決まってしまう。

ルビーレーザーには、無色透明なサファイア（ Al_2O_3 ）結晶に0.05%の Cr_2O_3 が入っている。このクロムが結晶中では3価のイオンとなっており、この Cr^{3+} イオンがサファイア結晶中にばらばらに存在する。 Cr^{3+} イオンを含むルビー結晶は、3の下に描いてあるように緑色と青色の光を吸収するので、ピンク色の透明な結晶に見える。3上のように棒状の結晶の両端を平滑に研磨し、その両端面に反射材料である銀がコーティングされており、これらが「光共振器」を構成している。棒状のルビーロッドの周りにらせん形状のフラッシュランプを配置して、広帯域な光ポンピングによって Cr^{3+} イオンを励起状態に上げる。一瞬の間だけ光を放つフラッシュランプの閃光は数ミリ秒続き、その大部分のエネルギーは温度を上げるだけで終わるが、一部が Cr^{3+} イオンに吸収されてイオンを励起する。 Cr^{3+} イオンのエネルギー状態を4に示す。励起されたイオンは100 ns以内の短時間の内に、結晶格子と衝突

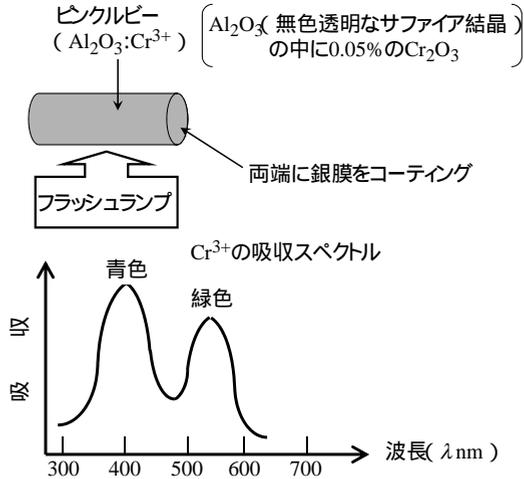
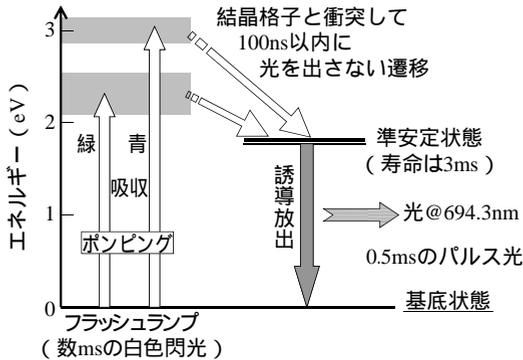


図3 ルビーレーザーの配置と吸収スペクトル

図4 Cr^{3+} イオンのエネルギー状態

突してエネルギーを失い、すぐ下に位置する「準安定状態」に落ち着く。この準安定状態に居続けることができる時間（「寿命」）は3 ms程度であるので、その時間内に光を自然放出して、最も低い状態である「基底状態」に落ちる。このときに放出される光は、準安定状態と基底状態のエネルギー差に相当する694.3 nmの赤色光である。このときの赤色光は、図5上に描いてあるように、あらゆる方向に出て行き、お互いにほとんど干渉することのない「イン

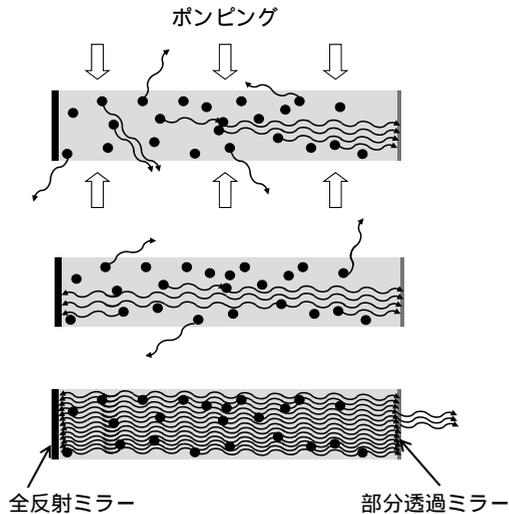


図5 ルビー活性媒質中を往復する光波と増幅される様子

コヒーレント光」である。

ポンピングが強くなり、反転分布が形成されるようになると、図5中のように最初の自然放光が反転分布中を伝搬することによって、増幅を受けることになる。光が光共振器を往復する間に増幅を繰り返して、益々強くなる。一方、自然放光は弱いので自然淘汰されていき、共振器の軸と平行に進む増幅光だけが目立つようになる。共振域内を往復伝搬する光が十分に増幅されると、図5下のように周波数、位相、方向の揃ったレーザービームが一端の反射鏡に開けた小さな穴から外に出てくる。このときに得られるレーザー光は0.5 ms程度の持続時間を持つパルス光である。このルビーレーザーがレーザー媒質として有効に働いたのは、比較的広い波長範囲にわたる吸収バンドの存在、準安定状態の存在、基底状態の関与、のせいである。この意味で、ルビーレーザーは3準位レーザーである。

ルビーレーザーは、高出力のパルス光源として今日でも使われており、穴を開けた反射鏡の代わりに100%より低い反射率を持つ部分透過鏡と100%の反射率を持つ全反射鏡を組み合わせると共振器が作られており、50～100 Jの出力の赤色レーザーとして活躍している。レーザービームの直径は1～25 mm、後で述べるビーム発散角は0.25～7 mradである。しかしながら、全体の効率

は1%以下とあまり高くない。

4 世界最初に連続発振したヘリウムネオンレーザー

レーザー動作のエネルギーの低い状態である「下準位」として基底状態を使っているため、反転分布をつくるためのポンピングをかなり強力にしなければならない。この欠点を補うには下準位に基底状態以外の準位を使う4準位レーザーがある。現在、赤色光源として最もポピュラーなガスレーザーであるヘリウムネオンレーザーは図6のような構成になっている。直径1 mm程度の細いガラス管の中に0.8 TorrのHeと0.1 TorrのNeの混合ガスを詰め、直流電源に接続した電極間に高電圧が印加されている。電気放電によって産み出された自由電子やイオンが電場によって加速され、その電子等が原子と衝突してHe原子をエネルギーの高い状態に押し上げる。図7に描いてあるように、高いエネルギーに上がった原子は、徐々にエネルギーを失いながら、比較的長寿命の $2s$ 状態にとどまる。He原子の $2s$ 状態とNe原子の $5s$ ないしは $4s$ 状態のエネルギーがほとんど同じであることから、両原子同士の衝突によって基底状態にあるHe原子からNe原子にエネルギーが移り、Ne原子が $5s$ ないしは $4s$ 状態に上がる。これらがレーザー動作の「上準位」として働く。より低い $4p$ ないしは $3p$ 状態が「下準位」となり、光の放出が起こる。 $3p$ 状態にある原子は自然放出過程によって $3s$ 準安定状態に下がり、この状態の原子はガラス管との衝突などによってエネルギーを失い、基底状態に戻る。ルビレーザーと異なり、レーザー動作の下準位が基底状態ではなく、上準位間でレーザー動作が起こることから、反転分布を作るのが比較的容易であり、そのために連続発振が可能となった。

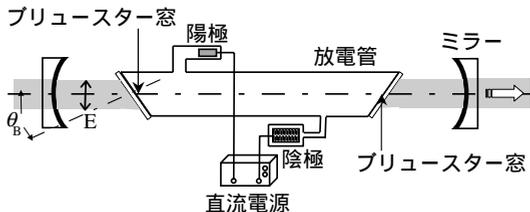


図6 He-Ne レーザーの構成

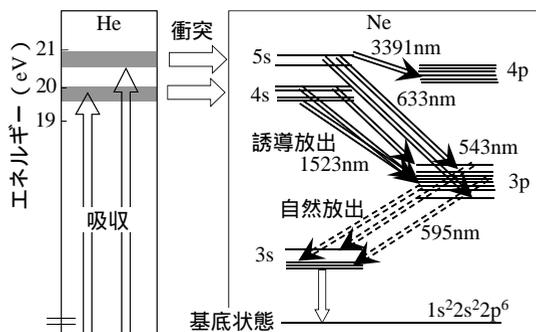


図7 ヘリウムネオンレーザーのポンピングと発振波長

ヘリウムネオンレーザーでは、図6のようにガスを封じ込めたガラス管の外に共振器鏡を置くために、ガラス管の窓を光軸に対して垂直ではなく、プリースター角で取り付けられている。このため、紙面に垂直なs偏光成分はこの窓を一回通過する毎に（両表面で）8%の反射損失（透過率は92%）があるが、電場が紙面内にあるp偏光に対しては反射率がゼロであり、反射損失がゼロになり、透過率は100%となる。そのため、光が共振器内を何回も往復し、そのたびに窓を通過することで、s偏光とp偏光の強度比が極端に異なっていく、最終的には損失のないp偏光成分だけとなる。このような配置を外部共振器配置と呼んでおり、レーザー媒質をプリースター角で取り付けることによって、紙面に平行な直線偏光のレーザービームを取り出すことができる。

5 レーザービームの性質

ルビーレーザーやヘリウムネオンレーザーの例で分かるように、レーザーは反転分布を持つレーザー媒質、その間を光が往復伝搬する光共振器、反転分布を作り、維持するためのポンピング用励起源、から構成されている。この様子を図8に描いてある。レーザー媒質が発振波長と最大出力を決めており、波長に関しては表1に代表的な材料に対してまとめている。光共振器もレーザー動作にとって重要な役割を果たしており、レーザービームが

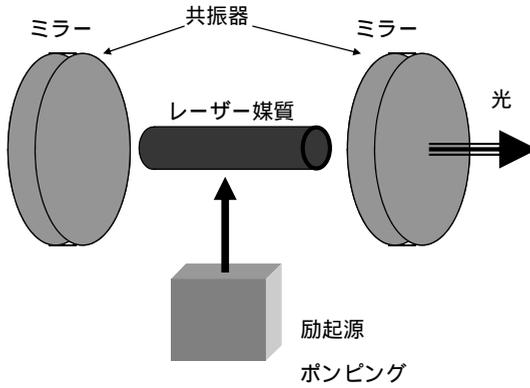


図8 レーザーの基本構成：レーザー媒質，光共振器，ポンピング用励起源

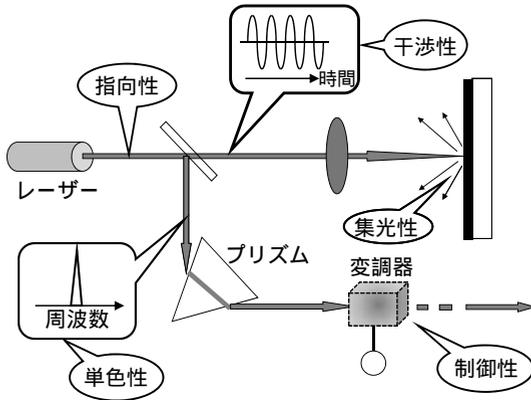


図9 レーザー光の持つ特徴

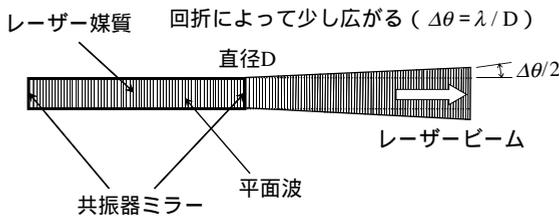


図10 指向性：共振器内の平面波が回折を受けて広がる様子

表1 レーザーの種類と発振波長

	レーザーの種類	発振波長 (nm)	備考	
赤外	二酸化炭素(CO ₂)	9000-11000		
	一酸化炭素(CO)	5000-6000		
	フッ化重水素(DF)化学	3500-4500		
	半導体量子カスケード	3000-50 μm		
	フッ化水素(HF)化学	2600-3000		
	エルビウム(Er)ドープガラス(又はファイバー)	1530-1570		
	ネオジウム(Nd)ドープ固体	1320		
	化学酸素ヨウ素	1315		
	InGaAsP属ダイオード	1100-1650		
	Nd:YAG , Nd:YVO ₄	1064		
	Nd:YLF	1057		
	イッテルビウム(Yb)ドープファイバー	1030-1100		
	InGaAs属ダイオード	915-1050		
	GaAlAs属ダイオード	750-905		
アレキサンドライト	701-826	波長可変		
チタンサファイア	675-1100	波長可変		
可視	ルビー(Cr:Al ₂ O ₃)	694		
	クリプトン(Kr)イオン	647		
	Ga _{0.5} In _{0.5} P/GaAs属ダイオード	670-680		
	AlGaInP/GaAs属ダイオード	620-680		
	ヘリウムネオン(He-Ne)	632.8		
	ヘリウムネオン(He-Ne)	612		
	ヘリウムネオン(He-Ne)	594		
	ヘリウムネオン(He-Ne)	543.5		
	ネオジウムドープ固体(2倍波)	532		
	クリプトンイオン(Kr)	472-800		
	アルゴンイオン(Ar)	454-515		
	ヘリウムネオン	442		
	有機色素溶液	320-1000	波長可変	
	GaN/InGaN属ダイオード	375-440		
紫外	ネオジウムドープ固体(3倍波)	355		
	キセノンフッ素エキシマ(XeF)	351		
	窒素(N ₂)	337		
	アルゴンイオン(Ar)	330-360		
	ヘリウムカドミウム(He-Cd)	325		
	キセノン塩素エキシマ(XeCl)	308		
	アルゴンイオン(Ar)	275-303		
	ネオジウムドープ固体(4倍波)	266		
	クリプトンフッ素エキシマ(KrF)	248		
	アルゴンイオン(Ar)	229-264		
	ネオジウムドープ固体(5倍波)	213		
	真空紫外	アルゴンフッ素エキシマ(ArF)	193	
		フッ素(F ₂)	157	
		クリプトンエキシマ(Kr ₂)	146	
アルゴンエキシマ(Ar ₂)		126		

注：100nm以下の軟X線レーザーに関しては、実験段階にあり入手できないものが多いのでここでは省略した。

「コヒーレント（可干渉性）」を持つ平面波であることは、もっぱら共振器から得られる特徴である。共振器は、さらに発振周波数の高度な選択性やビーム内強度分布を制御することもある。

レーザー光の持つ特徴を一覧すると図9のようになる。可干渉性（コヒーレンス）、単色性、制御性は誘導放出の結果であり、レーザー光波の周波数（波長）、位相と波面が揃っているためである。さらに、共振器内の波面を描くと図10のように平面波で揃っており、そのために取り出したレーザービームも回折によってわずかに広がるものの、まさにビーム（光線）のごとくに光が伝搬していき、そのためにレンズで集光した場合でも理想的な大きさにまで絞ることができる。

〔著者紹介〕

黒澤 宏（くろさわこう）

大阪府立大学博士課程満期退学後、同大学助手、講師、助教授を経て平成3年より宮崎大学工学部教授。その間、分子科学研究所教授、カリフォルニア大学客員研究員、トロント大学客員教授などを歴任。平成17年10月宮崎大学退職、（独）科学技術振興機構JSTイノベーションサテライト宮崎・前館長、現在、産学官連携ネットワーク部 シニアアドバイザーとして活躍中！

大学にいたときは「光でできること、光でないとできないこと」をメインテーマに掲げ、「真空紫外光源の開発とその応用」について研究していた。平成17年10月大学における研究生活をきっぱりと断ち切り、（独）科学技術振興機構（JST）の重点地域拠点の一つであるサテライト宮崎の設立とともに館長に就任。研究現場のプレイヤーからマネージャーに華麗なる転身。

大学をうまく使って地域を元気にすることに活躍中。科学技術立国には教育こそが重要と、大学においても光学やレーザーに関する教育に力を入れ、各種セミナーでも講師を務める。そのレクチャーは初心者にも分かりやすく、様々な工夫で聴講者を飽きさせないと、高い評価を得ている。

OPTRONICS eBOOK

まるわかり レーザー原論

著者	黒澤 宏
初版発行日	2011年4月25日
デジタル版	2013年8月9日
発行	株式会社オプトロニクス社
URL	http://www.optronics.co.jp
E-mail	booksale@optronics.co.jp

本作品の一部または全部を無断で改ざん、複製、転載、配信することを
強く禁止します。

また、OPTRONICS eBOOKの利用規約により、有償・無償にかかわらず
本作品を第三者に譲渡することはできません。