レーザの発光理論と装置の現状*

山中 千代衛**

1. はじめに

今世紀における重要な発明の1つと言われるレーザは、1960年にルビーを用い初めて成功し、その後いろいろなガスや半導体によるレーザ発振も相継いで実現し、大きな期待をかけられながら基礎と応用の両面に発展を続けている。

レーザは光の発生機構に光波の共振器を用いているため、従来の光源とくらべ、1) 単色性が秀れている、2) 可干渉性(コヒレンス)が高い、3) 指向性が良い(輝度が高い)という特長をもつ。したがって精度の高い光学測定や光波干渉用の光源として、あるいは極めて簡単に空間に光の線を作るのに利用できる。またレーザビームを集束して作った高いパワー密度の点は、いろいろな材料の加工に応用することができる。このような従来の光学技術への応用以外に、他の分野の技術とうまく結合できれば、さらにその威力を発揮し高度な技術成果が数多く生まれるであろう。

本稿ではレーザを利用される方々を対象として、レーザを理解して頂くことを主眼に現在入手できるレーザ装置の種類と出力の特徴を主に記述する。なおレーザの研究動向の一端を紹介するため最近のレーザの進歩を第7節に記した。またレーザを利用する場合に関連の強い2, 3の周辺技術を第8節に含めた。

2. 光共振器と発振モード

ここでは一般の光源とレーザとの大きな相違点である発振モードについて述べる。内容の多くは固体、液体、ガス、半導体のいずれのレーザにも共通している。

原子、分子あるいはイオンなどは光や放電による電子の衝突などの刺激を受けると、そのエネルギー状態が変化

図1 物質のエネルギー準位とレーザ作用

する。このとき図1のように、物質の特定なエネルギー準位に対応する刺激(a)のときは物質は励起(ポンピング)される。このようにエネルギーの高まった物質は自然にエネルギーを放出して安定な状態に復帰するが、物質のエネルギー準位のなかにこの復帰のゆっくりした準安定準位があると強いポンピングを受けたときは、この準位と下の準位との間にいわゆる逆転分布の状態(負温度状態)が生じる。この状態になった物質は、上下の準位のエネルギー差に相当する波長の光(b)に対して増幅作用を示す。このように光に対して増幅作用を持った物質の両側に1対の反射鏡(共振器)を置いて図2(a)のように構成したの

図2 レーザの動作説明図

* Recent Trends of Laser Beam Theory and Devices.

** C. Yamanaka, 大阪大学工学部 電気工学科教授

がレーザである。初めに生じた自然放出のなかで共振器の軸方向に進む光は、長い距離を進む過程で他のポンピングされた粒子に誘導放出を起こさせ次第に増強される。鏡に達するまでの増幅作用はたかだか10%程度であるが、両端に設置した鏡の反射率が高いと、損失の小さな光は鏡の間を何回も往復し、毎回増幅されて遂に発振が起こる。発振が成長するにつれて利得は飽和し損失に等しくなる強度で定常状態になる。出力は鏡に適正な透過率を持たせることで外部に取り出される。図1(b)のように平行に置いた1対の反射鏡は、その間隔 L が $1/2$ 波長の整数(m)倍になるような光に対してだけ、損失の少ないすなわち Q の高い共振器となる(図2(c))。したがって発振は利得のある周波数帯のなかで $C/2L$ (C = 光速)ごとの周波数で起こり、これらを縦モード(図2(d))と呼んでいる。

ここで最も多く普及しているHe-Neレーザについて若干の数値例を記す。He-Neレーザは波長 $0.63\mu\text{m}$ (周波数 $4.7 \times 10^{14}\text{MHz}$)の赤い光に対して半値で $2 \times 10^{-6}\mu\text{m}$ (周波数帯域で1500MHz)の幅にわたって増幅作用がある。この幅は主にNe原子の熱運動によるドップラ効果で定まる。いま $L = 1\text{m}$ とすれば共振器間にはほぼ160万波長($m = 3.2 \times 10^6$)からなるいくつかの定在波が立ち得て、それらの周波数間隔すなわち縦モード間隔は $C/2L = 150\text{MHz}$ になる(図2(c))。発振は図2(d)に示したように利得>損失となる周波数範囲のいくつかの縦モードで同時に生じる。

一般にはこれら縦モードの周波数、位相、出力は不規則にいくらか変動しているが、何等かの手段によりそれら定在波の位相を同期させ、すべて重なるようにすると安定したスペクトルになる。このとき発振を時間的に見れば時間幅の狭い(ほぼ増幅利得幅の逆数)繰り返し周波数が $C/2L$ のパルス発振となる。このように同期させる技術をモード ロッキングと呼ぶ。

L を十分に小さく(He-Neレーザでは10cm程度)すれば弱いけれどもただ1つの周波数での発振が得られる。また L の大きな場合でもエタロンを特定の周波数の透過フィルタとして共振器内に設置すれば、単一周波数の発振にすることができる。周波数を安定化した単一周波数レーザの出力光は最も干渉性の高い光である。

共振器の面内すなわち発振光の断面にも一般には強度および位相の分布が存在する。このような分布を横モードと呼ぶ。いくつかの横モードの例を図3に示す。TEM₀₀モードは波面が等位面面でビームの広がりか最も小さく実用的価値が高い。このモードだけで発振させるた

図3 レーザ発振の横モード

めには、レーザ波長を λ とし共振器の有効しほり半径を a として $a^2/\lambda L \equiv N$ の値(フレネル数)を1~3の範囲に定めると良い。

3. 固体レーザ

一般に固体レーザは他のレーザに比べ(1)発振効率が高く、(2)高い出力が得られ、(3)短いパルス発振が可能であり、(4)出力の割には装置が小さいなどの特長がある。装置はレーザ ロッド、共振器励起用ランプと、その光をレーザ ロッドに集めるための光学系を収めたヘッド、およびランプ用電源で構成されている。簡単な装置ではレーザ ロッドの両端面を適正な形に研磨し、誘電体反射膜を直接コーティングし共振器としている。発振モードを選択したりQスイッチなどの内部変調を行なう装置では、外部に鏡を置いて共振器としている。

3.1 レーザ材料

一般に固体のレーザ材料としては、(1)スペクトル幅が狭くて強い蛍光を出すこと、(2)広い波長範囲にわたる励起スペクトルを持ち光ポンピングが効率よく行なえること、(3)光学的に均一で低損失の光共振器が作れること、などの性質が要求される。現在多く用いられている材料を表1に示す。

ルビーは最初にレーザ発振に成功した材料である。肉眼に感じる赤い波長($0.69\mu\text{m}$)で発振すること、ポンピングに不利な3準位であるにもかかわらず励起波長帯が広く蛍光の線幅が狭いため連続発振も可能であり、更に蛍光の寿命が長い後述するジャイアント パルス発振にも適するなど、現在でも重要な材料である。

4準位のNdイオンを含む材料として多くの結晶やガラスが作られた。表のYAGは熱伝導が良く丈夫であるため、連続発振や早い繰り返し動作のパルス発振に適する材料として最も多く用いられている。しかし価格が高く大きな結晶を作成することはむずかしいので、大形の装置には任意の形に作れるガラスが用いられている。

3.2 出力の特長

表1 代表的な固体レーザ材料

母 体	活 性 イオン	発振波長 (μm)	蛍 光 幅 ($\text{\AA}$, GHz), 寿命 (ms)	屈折率	熱 伝 導 度 $\text{cal s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
ルビー: Al_2O_3	Cr^{3+}	0.694	6, 370, 3	異	0.077
YAG: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Nd^{3+}	0.95	(冷却・選択)	等	0.03
		1.064	6, 160, 0.25		
		1.32	(選 択)		
ガ ラ ス	Nd	1.06	$\sim 200, \sim 5300, \sim 0.6$	等	~ 0.002

固体レーザの発振動作を時間で分類すると、その多くは連続発振、常パルス（ノーマル）発振、Qスイッチ（ジャイアント パルス）発振に分けられる。

連続発振の出力はワット（W）で表わされるが、パルス発振の中でノーマル発振は1動作中の全出力エネルギーをジュール（J）で記すことが多い。これに対してジャイアント パルスでは出力をエネルギー（J）で表わす場合とピーク パワー（W）で記述する場合とがある。またパルス発振器で比較的早い繰り返し動作の装置では、1sec間に得られる全パルスエネルギーすなわち平均出力（W）が能力を比較するのに用いられている。

一般に固体レーザは利得が高く共振器が太くて短い（フレネル数が大）ため、モード選択器を用いない時は縦横ともにマルチ モードの出力を示す。指向性を良くするためには、横モード選択用のアパーチャを共振器中に挿入する必要がある。単一横モード発振にするとロッドの利用率が低下し、出力は一般にマルチ モードの場合の1/3～1/10に低下するが、ビームの拡がり率は1/5～1/20に改善される。更に単色性や干渉性を要する応用にはエタロンなどの干渉性縦モード選択器を用い、縦モードまで単一にしなければならない。

3.3 連続発振（CW）装置

固体でのCWは初め $\text{CaWO}_4: \text{Nd}^{3+}$ を液体酸素で冷却し成功して以来、ルビー、 $\text{CaF}_2: \text{Dy}^{2+}$ などで行なわれた。いずれの装置も励起効率を高めることと、レーザ ロッドの冷却に工夫がなされている。しかし初期の装置はいずれも小出力のものであった。

Nd^{3+} のレーザ母体結晶として、非常に秀れた性質をもつYAGの大きな良質結晶が作られるようになってから、固体レーザのCW装置も実用期に入った。現在、多く用いられているYAG: Nd^{3+} のCW装置の構成を図4に示す。励起用光源にはハロゲン入り白熱電球やKrアークランプなどが効率よく用いられる。直径3mm長さ50mmの水冷ロッドを用いた小形装置で、1KWのランプ入力のとときマルチで3W、横単一モードにして約1WのCW

図4 連続発振固体レーザの構成

図5 連続発振YAG: Nd^{3+} レーザの入出力特性

出力が得られている。最近では大出力装置の開発も進み、直径6mm長さ75mmの水冷ロッドを10KWのKrランプで励起し、単一のヘッドからマルチで200Wまでの出力が得られるようになった。これらの装置のランプ入力に対する出力の関係例を図5に示す。なお200W級のヘッドを直列に結合することでさらに大出力化がはかられ、5台連結で出力1KWの装置も市販されている。

3.4 ノーマル パルス発生装置

レーザ材料の励起スペクトルと一致した発光スペクトルを持つ強い光源はまだないので、電力のポンプ効率は低い。一方高い出力を得るには強力なポンピングを必要とする。そこで放電電力を管壁耐力以下に制限したXeフラッシュ ランプを励起に用いたノーマル パルス装置が作られた。ランプのフラッシュ時間は短くなると発光効率も低下するので、普通は0.1～10msの範囲で用いられる。Xeフラッシュ ランプの放電エネルギーは管壁耐力で制限され、平均パワーは管壁温度で制限される。ま

たレーザ材料は温度が上昇すると、蛍光のスペクトル幅が増大して実効利得が減少し、さらに蛍光の寿命も短くなって発振効率が低下する。これらの理由から繰り返し動作させる装置では、一般にレーザ ロッドとフラッシュランプを水冷している。

現在多く用いられているノーマルパルスYAG: Nd³⁺装置の構成を図6に示す。実用装置で得られる出力は、

図6 繰り返し固体パルスレーザの構成

水冷した直径1cm長さ10cmのルビーレーザで約3msの発振時間に約20J（マルチモード）で、繰り返しは2sec間隔程度（0.5PPS）である。水冷した直径6mm長さ75mmのYAG: Nd³⁺レーザからは約1msの発振時間に5PPSで10J、50PPSで1Jすなわち平均出力50W（マルチモード）が得られ、その電力効率は1~2%である。YAG: Nd³⁺のノーマル発振レーザの代表的な入出力特性を図7に、出力波形の一例を図8に示す。ノーマル発

図7 YAG: Nd³⁺ ノーマル発振レーザの入出力特性

図8 YAG: Nd³⁺ ノーマル発振レーザの波形

振では一般に出力鏡の透過率が大きいと図8(a)のようなスパイク状の波形となり、小さいときは(b)のように穏やかなパルス状となる。出力は鏡の透過率を適値（最適出力結合）とした時最大となる。図7の特性は最適の出力結合としてとった値で、この時の波形はスパイクの比率が小さくなったパルス状である。

3.5 Qスイッチレーザ装置

普通外部鏡形共振器を用い、その内部に変調器（Qスイッチ）を挿入し共振器のQ値を高速に変化できるようにしてある以外は、前節までの装置と同じで、CWおよびパルス励起装置のいずれに対しても行なわれている。レーザ準位間の分布逆転度が大きくQスイッチ速度の早いほど、得られるパルス（ジャイアントパルス：GP）のピーク値を高め、その時間幅を狭くできる。この方法は初め、パルス励起のルビーに対してニトロベンゼンのKerrセルを用いて行なわれたが、その後多くの方法が考案された。現在Qスイッチには可飽和色素を用いた受動形と、超音波光偏光器、回転鏡、ポッケルスセル等の能動形とがある。

可飽和色素はパルス励起の装置に用いられる。単に共振器中に色素セルを挿入するだけで簡単にQスイッチを行なうことができ、しかも縦モードを単一化しやすい特長をもっている。しかし発振が不安定であったり、局部的に発振し、レーザロッドや反射鏡を破損しやすいなどの欠点もあるので、おもに実験用や小形装置に用いられている。

超音波光偏光器は石英ガラス中に超音波の疎密波を作り、それにより透過光を回折偏向させるものである。これの特長は、 α 値の抑制度は少ないが開放時の光損失が少ないことで、利得の比較的低いCW励起装置の高速繰り返し α スイッチとして用いられる（図4参照）。直径4mm長さ75mmのYAG: Nd³⁺を用いた場合の出力特性例を図9に示す。繰り返し周波数約2KHzまでは、ピークは10KW、幅0.1 μ s程度のパルス出力が得られる。それ以上の繰り返し周波数になるとピーク値は次第に低下するが、平均出力は10KHzまで上昇する。この種の装置は半導体ウエハのスクライバや抵抗膜トリマなどのマ

図9 連続励起、超音波Qスイッチレーザの出力特性

イクロ加工に用いられている。

パルス励起の装置では利得が高いので、変調度の大きな回転鏡やポッケルスセルをQスイッチとして用いている。共振器を構成する一方の鏡を400～800 rpsのモータで回転する機械的Qスイッチの回転鏡には、ルーフプリズムを用いると調整が容易になる。直径10mm長さ75mmのレーザロッドからピークパワー10MW級の出力が得られる。回転鏡をQスイッチとした装置は構造が簡単なので製作が容易であるが、良い単一パルスの得られるフラッシュランプの入力許容範囲が狭く、また出力ビームの方向が僅かに変動し同期が不正確になりやすい欠点がある。

パルス励起の装置で偏光シャッタを形成するポッケルスセルをQスイッチに用いたものは、正確に同期した安定なGP出力の得られる特長がある。この装置の構成例を図10に、出力波形を図11に示す。偏光器にはグラントム

図10 ポッケルスセルをつけたQスイッチレーザの構成

図11 YAG: Nd³⁺ Qスイッチレーザのジャイアントパルス波形

ソシ形のほかに、ブルースタ角で入射するように傾けた石英ガラス板のスタックも用いられている。電気工学結晶には使用電圧の比較的低い（約4KV）KDPを用いたものが多い。これでQスイッチしている直径6mm長さ75mmのYAG: Nd³⁺ ロッドの水冷装置からは、60PPSの繰り返しで10MW級のGP出力が得られ、ライダやアクチブ暗視装置の光源あるいは加工機などに用いられている。なおポッケルスセルには光が共振器内をほぼ往復する時間幅のパルスを作る二重Qスイッチの方法があり、nsのGPパルスを作ることができる。

ルビーで100MW、YAG: Nd³⁺ で10MW以上のGP

出力を得るには、一般に発振器以上のロッドで作ったレーザ増幅器を発振器と同期して用いる。

3.6 干渉用ルビーレーザ

固体レーザは利得の生じるスペクトル幅がガスレーザより約100倍も広く、(約6Å), 通常は多数の縦モードで発振するため単色性すなわち可干渉性（コヒレンス）はガスレーザに劣る。しかし強いパルス発振の得られる固体レーザの利点を失わずに、単一モードにすることができれば特長ある応用が期待できる。このような目的に沿うものとして、単一モードのGPルビーレーザが開発された。

縦モードを制限するため出力鏡に波長依存性の強いエタロン形干渉反射鏡を用い、横モードを単一化するためアパーチャを挿入し、Qスイッチとして可飽和色素（クリプトシアニン）溶液セルを用いている。なお干渉反射鏡は反射極大波長をレーザ線の最大利得波長と一致させるため、そのスペーサを温度制御している。このような実用装置の可干渉長は1～5mであり出力エネルギーはおおよそ50mJ（ピーク1～2MW）までで、それ以上の出力を要する場合には増幅器を併用するのが普通である。これらの装置は視野深度1～2mの瞬間ホログラムの撮影に用いられている。

なおQスイッチとしてポッケルスセルを使用し、1～500μs間隔でコヒレンスの良い2つのGPを発生できる装置も市販されるようになった。高速の変位量を測定するダブルパルスホログラフィの光源として利用されている。

4. ガスレーザ

ガスレーザの特長は連続発振の容易なこと、発振波長の豊富なこと、出力光の可干渉性の高いことである。しかし密度が小さいので大出力は得にくい（例外: CO₂レーザ）。発振波長の豊富なのは原子、分子、イオンのいずれでも発振でき、また電子や分子の振動、分子回転のどの準位間でも発振できるからである。

4.1 He-Neレーザ

これは最も広く用いられているレーザである。図12に

図12 He-Neレーザ

示したようにHeとNeの混合気体を数Torr封入した内径1～3mm長さ0.2～2mの放電管と、これを点灯する数kV、10mA程度の直流電源、および1対の反射鏡で構成されている。放電管に直接反射鏡を接着した形(a)を内部鏡レーザと呼び、これに対して透過光か偏光角で入射するようにブルースタ角に傾けた窓を放電管に接合し、反射鏡を別に設けたもの(b)を外部鏡レーザと称している。He-Neレーザは小形の出力0.1mWクラスから100mWの長い装置まで作られており、波長も0.63 μm の他に1.15 μm および3.39 μm の赤外レーザも市販されている。最近理科実験の教材用や応用装置への組込(OEM:Original Equipment Manufacturingの略)用として、5～30万円の安価な小形装置が各社から相継いで発売されるようになった。OEM用の出力レベルは0.5～5mW、連続点灯寿命は5000～10000hrであり、白熱電球の10倍も寿命のある「コヒレントな電球」として手軽に使用できる。しかし高温多湿な環境での放置寿命は必ずしも長くないので、毎週1回程度は点灯することが望ましい。主な用途は光学実験、光学機器の検査、土木や建設工事の基準線作り、OCR用の光源などである。

レーザ光を光电測定に利用する時は出力の変動が問題になる。簡単な定電流回路で点灯している装置では、出力光に0.1～0.5%rmsの電源リップル、0.1～1%rmsのノイズ(1～100kHz)が含まれると共に、3～10%PPのドリフトも生じる。ドリフトは温度変化に基づく放電管の曲がり、反射鏡のアラインメントずれ、反射鏡間隔の変化(短かいレーザでは影響大)が主な原因である。また(a)のような内部鏡レーザの発振光は不規則に偏光面が変動しているため、たとえ全出力が一定であっても、偏光フィルタを通して直線偏光にすると大きな変動の生じることがある(磁場の影響大)。安定な直線偏光を必要とする時は、ブルースタ窓のついた外部鏡レーザ(図b)を用いれば偏光フィルタなしで目的が達せられる。

4.2 ArおよびKrイオンレーザ

中性原子から1個以上の電子を取り去り、イオン状態とした原子の励起準位を利用するのがイオンレーザで、主に可視から紫外の波長領域で多くの発振線が得られる。多数のイオンレーザにはパルス発振のものが多く、 Ar^+ と Kr^+ は連続的に大きな出力が得られるので実用性が高い。

代表的なArおよびKrのイオンレーザは、可視域にとびとびではあるが連続出力100mW以上の発振線を何本も持っているのも、ホログラフィ、光情報処理、ラマ

ン散乱用の光源として重宝がられている。大電力(～10kW)の直流安定化電源と冷却水を必要とする上に、高価(300万円以上)なことが普及をさまたげている。このレーザはほぼ0.5TorrのArあるいはKrを封入した内径2.5mm程度の細管部に、大電流のアーク放電(～30A)を行なって励起する。したがってレーザ管の細管部はこの大電力放電に耐えられるように、普通ベリリア磁器またはグラファイトで作られている。出力は放電電流と共に急増するが、その上限は放電部の熱破壊によって制限される。安定な出力を得るためには放電電流を安定化しなければならないという欠点をもつが、逆にこれを利用して光出力を一定するように放電電流を制御する出力安定化回路をつけることが容易で、市販品には普通これがついている。また一方の全反射鏡にリトロプリズムを用いることで、多数の発振線の中から特定の波長だけの発振を行なわせる方法がとられている。 Ar^+/Kr^+ レーザの主な構成要素を図13に示す。 Ar^+ の特に強い発振線は

図13 Ar/Krレーザの出力安定化回路出力の一部をビームスプリッターBSで取出し、Si太陽電池SCで検出し、この出力が設定値に等しくなるように直列トランジスタで放電電流を制御する。

0.488 μm (1～2W)、0.5145 μm (1～2W)、 Kr^+ では0.6471 μm (0.5～1W)である。共振器内にエタロンを入れれば容易に単一周波数の発振にすることができ、この時出力は約1/2に減少する。電流を増せば紫外の発振線も得られる。

市販品には空冷式の小出力(～10mW)のものから20W(全色)の大形装置まである。現在の寿命は数千hrである。

4.3 He-Cdレーザ

金属を加熱し適度な蒸気圧にし、そのイオン化準位を利用する金属蒸気レーザがいろいろな金属に対して試みられた。He-Cdレーザは発振線が0.4416 μm (紫)と0.3250 μm (近紫外)にあり、He-Neレーザに近い低電力で連続発振が可能であるため注目されている。Heの放電中にCdの蒸気を一緒に充満させる方法として、図14に示したようなカタホレス現象が利用されている。Cd源およびレーザ管壁を250℃付近の一定温度に保た

図14 カタホレシスを利用したHe-Cdレーザ

ないと出力変動が大きいこと、出力中に雑音が多いこと、装置が比較的高温であること、などが欠点である。寿命にもまだ問題があるようである。

市販品には $0.4416\mu\text{m}$ で出力5~50mWの装置がある。紫外発振用には単一同位元素のCdを用いると出力が大きい。

4.4 N_2 レーザ

分子を直接利用する N_2 レーザは、波長 $0.3371\mu\text{m}$ (近紫外)において時間幅が狭く($\sim 10\text{ns}$)ピーク値の高い($10^8\sim 10^9\text{W}$)パルス発振をする特長がある。このような特長は物質の刺激に有用であり、また色素レーザのポンピング用光源としても利用されている。市販品は1 Torr程度の N_2 を水冷の放電管に流しながら高速のパルス放電で励起するもので、平均出力0.5Wという強力なものである。発振がスーパーラジアントで波長幅が広い($\sim 1\text{\AA}$)ことと、パルス放電用サイクロトンの寿命があまり長くないこと($\sim 10^4$ 回)が欠点である。 N_2 レーザはパルス励起によって過渡的に発振するだけで連続発振はできない。

4.5 CO_2 レーザ

分子の振動と回転に基づくエネルギー準位間の遷移を利用する分子ガスレーザの中で、 CO_2 は大出力の連続発振が可能な特長をもっている。 CO_2 レーザの発振波長は赤外の $10.6\mu\text{m}$ 付近にあり、ガスレーザとしては出力が大きく効率が高い。また CO_2 レーザはガスレーザに珍らしくレーザ上準位の寿命が長い(圧力によるが $\sim 0.3\text{ms}$)ので、Qスイッチングやパルス放電によって高出力のパルス発振を行なうことができる。市販されている CO_2 レーザには低圧・低流速形、中圧・高流速形、および横電界高圧形(T E A形)の3種がある。

最も普及している低圧・低流速形は、外側を水冷した内径数cm、放電長さmのガラス管に、全圧をほぼ10Torrにした $\text{He-N}_2\text{-CO}_2$ の混合ガス(普通80:15:5)をゆっくり流しながらグロー放電で励起する。この方式の装置からは長さ1m当り50~80Wの出力が得られている。効率は放電入力に対し10~20%と高いが、バラスト抵抗、ポンプなどの電力消費を含めると装置全体としては5%ぐらいである。この種の装置では出力50W(長さ

約1m)から500W(実効長14mであるが鏡で折り返し装置としては約1.5mにまとめている)程度までのものが市販されている。これらの装置はデマンタブルなので、手入れさえよければ寿命は極めて長い。

中圧・高流速の装置は数10Torrの $\text{He-N}_2\text{-CO}_2$ 混合ガスを数10m/sの速度で流し、「使用済み」のガスを共振器内から高速に取り除き、有効なガス量を増すことで出力の増大を計ったものである。ガスの流れと発振光の向き、および放電の方向を一致させた軸流形と、それら3者の方向をそれぞれ直交させた横流形とがあり、前者で出力5KW後者で1KWのものが製作されている。さらに圧力を増し大容量の放電を電子ビームで安定化し、出力10KW級の装置も市販されるようになった。この方式ではフレネル数が大きいので、不安定共振器を用いて指向性の改善をはかっている。

T E A形は単位体積当りの出力を増大させるため、大気圧程度の $\text{He-N}_2\text{-CO}_2$ 混合ガスを用いたパルス用 CO_2 レーザである。高い圧力では放電の開始が困難になるため、電極を放電管の横方向に設置し高い電界のパルス放電によって励起する。市販品の出力はピーク1MW、パルス幅 $\sim 100\text{ns}$ で数100PPSまでの繰り返し動作が可能である。

非金属の多くは $10.6\mu\text{m}$ の光を良く吸収するので、500Wまでの CO_2 レーザは布地やプラスチックの切断に、またパルス化したものはセラミックスの加工に用いられている。1KW以上の大出力装置は金属の切断溶接焼入れ等の金属加工用に作られている。

この他 CO_2 レーザは、ドップラ幅が狭く単一周波数での発振が容易な特長を活かし、放電部を封じ切った小形装置は光通信実験用の光源に用いられている。

5. 同調・波長変換レーザ

レーザはとびとびのエネルギー準位間の遷移を利用するので、発振可能な波長は一般に離散的で可変範囲は極めて狭い。しかし物質粒子間の相互作用の強い固体や半導体のレーザでは、温度を変えたり圧力を加えることで発振波長を1%程度可変できるものもある。更にけい光の幅が広い有機色素では、 100nm もの広い範囲にわたって発振波長を同調選択できる。また結晶中の非線形光学現象を利用した光パラメトリック発振器、磁場中におかれた半導体中のラマン散乱を利用したSpin-Flip Raman Laser等も波長を連続的に可変できる。これらのレーザを同調レーザと呼んでいる。

ここでは実用性が高く、市販されるようになった有機

色素と光パラメトリック発振器の同調レーザについて述べる。なお波長を変換するという観点から高調波レーザもここに含めた。これらのレーザで発生できる波長範囲を図15に示す。

図15 同調・波長変換レーザの波長範囲

5.1 有機色素同調レーザ

現在レーザ物質として使用できる有機色素 (Organic dye) は数百種類も存在し、その多くはアルコールなどの溶剤にとかし ($10^{-3} \sim 10^{-6}$ mol/l) で用いられる。広い蛍光の帯域中での発振波長の選択は、共振器中に含めたプリズムや回折格子などの分散系を同調させることで行なわれる。色素レーザの波長範囲はパルス発振で $0.32 \sim 1.17 \mu\text{m}$ 、連続発振では $0.52 \sim 0.70 \mu\text{m}$ におよんでいる。励起は発振光よりも短い波長の光で行なう。パルス励起源にはフラッシュランプ、固体レーザとその高調波光、 N_2 レーザが適し、連続励起には Ar^+ レーザが用いられている。

N_2 レーザを励起に用いた色素レーザは、片方の反射鏡の代わりに回折格子を用いた共振器中に色素溶液セルを挿入し、横方向からポンピングする。10種類の色素セルを交換使用することで $0.36 \sim 0.67 \mu\text{m}$ にわたる同調範囲を持ち、ピーク出力 $1 \sim 10 \text{KW}$ 、パルス幅 $2 \sim 8 \text{ns}$ 、波長幅 $2 \sim 20 \text{\AA}$ のパルス発振光が得られる。分光研究に役立っている。

色素レーザを連続的に発振させるには、寿命が長いことと、損失として作用する三重項準位の影響を除くため色素溶液を流す必要がある。このため Ar^+ レーザを励起光源とした装置では、色素としてフルオレシシン、ローダミン 6 G、ローダミン B の3種をそれぞれ循環しながら用いて、 $0.52 \sim 0.7 \mu\text{m}$ をカバーしている。入力/Wの時の出力は TEM_{00} モードでおおよそ 100mW 、そのスペクトル幅は $0.1 \text{\AA}$ (5GHz) である。この波長幅はエタロンを挿入することで $0.001 \text{\AA}$ 以下 (90MHz) にできる。

色素レーザはスペクトル幅が広いため、これをモード同期させると極めて狭いパルスを発生できる特長がある。

この方法で現在 psec (ピコ秒) 領域の極短パルスが作られている。

5.2 高調波レーザ

このレーザは同調レーザではないが、この非線形光学技術は後述する光パラメトリック発振の基礎になるため、ここに述べることにした。

レーザが実現すると、レーザの可干渉性と物質の非線形な光学効果を利用した倍周波光の発生 (SHG) や、3倍周波数の発生 (THG) が早くから試みられ、この効果の大きな材料もいくつか開発された。SHGには紫外から可視用として ADP や KDP、可視から近赤外用として LiNbO_3 、赤外域では CdSe 等の結晶が主に用いられている。また Rb, Cs, Na 等の金属蒸気と He との混合ガスによる THG は、紫外光の発生に有用である。ここでは実用性の高い SHG について記す。

SHG を効率よく行なうには、入射レーザ光とそれによって発生する倍周波の分極波を結晶内で同じ位相速度で伝搬させること (位相整合) が必要である。これには上記した異方性結晶の常光線と異常光線に対する屈折率の分散を利用し、結晶軸に対して入射角を適当に定める方法とこれら屈折率の温度変化を利用し結晶の温度を制御する方法とがある。また SHG の強度は入射するレーザ光の強度の2乗に比例するため、基本波とするレーザ光をピークの高いパルス光にすると変換効率は一層向上する。

現在 SHG デバイスは YAG: Nd^{3+} レーザの 0.95 、 1.06 、 $1.32 \mu\text{m}$ の赤外発振光を、それぞれ 0.47 (青)、 0.53 (緑)、 $0.66 \mu\text{m}$ (赤) の可視光に変換するのに広く用いられている。このような赤外レーザの可視光への変換は、眼を含めて感度の良い検出器を使用できるので応用に便利である。またルビーレーザの $0.69 \mu\text{m}$ 、YAG: Nd^{3+} レーザの2倍周波光 $0.53 \mu\text{m}$ 、あるいは前節の色素レーザ光を更に ADP 結晶で SHG し、 $0.35 \mu\text{m}$ や $0.27 \mu\text{m}$ の紫外光あるいは紫外同調レーザとすることも実用になっている。

5.3 光パラメトリック発振器

非線形光学結晶を用い光波を電波と同じように扱った同調レーザが光パラメトリック発振器 (OPO) で、その波長範囲は同調レーザの中で最も広く紫外から赤外におよんでいる。

OPO の基本的構成を図16に示す。非線形結晶に入射した周波数 w_p のポンプ光は、結晶中に雑音として存在する w_s の電磁波との差周波混合によって ($w_p - w_s$) の分極を作る。この分極と w_p との混合で w_s の分極が生じ、これと初めの w_s との相乗効果で w_s に対する増幅作用が

図16 光パラメトリック発振器の構成

表われる。したがって w_s の共振周波数をもつ光共振器を組み合わせ、更に $w_p = w_i + w_s$ の3つの光波に対して位相整合条件を満足させると、信号周波数 w_s 、およびアイドラ周波数 w_i の2つの光波をパラメトリックに発生させる事ができる。

市販のOPO装置は、赤外にある数本の線を選択的に発振できるようにした（-40℃に冷却しプリズムを共振器に挿入）YAG : Nd³⁺ のパルスレーザをポンプ源とし、非線形結晶としてLiNbO₃を用い、その温度を制御して位相整合（同調）を行なっている。この装置では0.55 μm から3.5 μm までの波長範囲を連続的にカバーできる。出力レベルはピーク値80~300W、パルス幅70~200nsで、75PPSの繰り返し動作が可能である。この種の装置は従来の分光器で分散が少なく光強度が弱い近赤外域の分光研究に有力な手段を与えるものである。

6. 半導体レーザ

GaAsのpn接合からなるダイオードレーザは固体、ガスに引続いて1962年に発振に成功した。その後色々な材料のpn接合レーザ（赤外用）や、更には光励起（可視~赤外）又は電子線励起（紫外~赤外）等による半導体レーザも作られた。しかし製造技術のむずかしさや、信頼性および取扱いの容易さ等の問題があって、現状で市販されているのはGaAsのパルス動作のレーザダイオードだけである。

6.1 レーザダイオードの構造

不純物濃度の大きな半導体のpn接合に順方向電圧を印加すると、電子と正孔はそれぞれp側およびn側に流れる。このときp側の伝導帯へ流れ込んだ電子は価電子帯の正孔と、またn側の価電子帯へ流れた正孔は伝導帯の電子とそれぞれ接合部付近で再結合し、pn接合のエネルギー、ギャップに相当する光子を放出する。光子の放出が材料中の光損失に打ち勝つまで盛んになると、正味の光利得が生じる。GaAsの屈折率は約3.5で空気との境界では約30%もの反射率をもつため、pn接合の長手方向に対して接合の両端を垂直にへき開すると良い共振器に

することができる。このようにして作られたパルス用GaAsレーザダイオードを図17に示す。素子はpn接合

図17 GaAsレーザダイオード

の結晶を長さ約300 μm 、幅約100 μm に仕上げ、電流による損失ジュール熱を放散するため熱伝導の良い材料の基板に取付けられている。発光はpn接合のp側は2 μm の厚さにわたって生じるので、ほぼ2 μm × 100 μm の発光面を持つことになる。なおp形GaAs上にp形のAl_xGa(1-x)Asをつけ、光子を薄いp形GaAs中にとじこめて発振効率を高めたシングルヘテロ（SH）構造のレーザダイオードも市販されている。

ダイオードレーザは小形であるため1個あたりの出力は小さいので、大きな出力を要する用途のため素子を数10個直列に並べたアレー形も作られている。

6.2 ダイオードレーザの特性

市販のGaAsレーザダイオードの室温における発振のスレッショルド電流は5~10Aである。したがって多くは1素子あたり約5V、ピーク電流10~30A、パルス幅100ns、繰り返し周波数1kHzまでの動作条件で使用される。この場合のパルス光出力は1~10Wの範囲である。動作回路の一例を図18に示す。レーザ出力は前記したように細い微小面積から発散するため、そのビームは回折によって厚み方向に約±30°、幅方向にも数度の拡がりを持っている。このため出力ビームを有効に利用するためには、f値が1~2程度の明るいレンズで集光する必要がある。

図18 レーザダイオードの駆動回路例

アレー形のレーザ ダイオードでは、室温で100Hzの場合は数100Wのパルス出力が得られる。さらに冷却形アレーも作られており、77°Kで用いると10KHzで2 μ sまでパルス幅を広げることができ、この時ピーク出力は数KWに達し10~30Wもの平均出力を得ることができ

7. 最近の進歩

7.1 小形化への努力

通信や情報処理への応用を考える時、レーザは小形化とオール固体化を指向することになる。この努力は現在ダイオードレーザと、それを能動素子とする光ICに集中している観がある。レーザダイオードの室温でのCW発振はGaAsとAlGaAsの2重ヘテロ(DH)構造の開発によって1970年に達成された。その後さらに長寿命と

するため、各種の製作プロセスを駆使して発光面の幅を20 μ m程度に狭くすることで、スレッショルド電流の低下と発振の均質化がはかられている。その結果レーザダイオードの連続発振寿命も1万hrを超えるまで延びるようになり、更に改良が進められている。

ダイオードレーザで励起するYAG:Nd³⁺レーザもオール固体化レーザとして早くから注目されていた。最近ダイオードレーザで600mWのポンプ光強度で60~100mWのレーザ出力が、100~800KHzの繰り返し周波数で得られたと報じられている。

7.2 波長範囲の拡大

赤外領域では2台のCO₂レーザからのビームをGaAs結晶中で差周波混合し、70 μ mから2mmまでとびとびではあるがコヒレント光の発生が実現した。また光パラメトリック発振器の波長可変範囲も長波長に向かって拡大されている。

真空紫外域では、気体の3次の非線形性を利用した和周波光混合の研究が精力的に行なわれ、その技術を用い光パラメトリック発振器や色素レーザをもとにして波長ほぼ100nmまでの同調レーザが実現された。

短波長側の記録は和周波光混合の方法による877Åであるが、現在Heによる第3高調波への変換で401Åの軟X線を発生させる実験が試みられている。更に短いX線や γ 線の領域におけるレーザも理論的な研究が進みつつある。

7.3 出力の増大

レーザによる核融合を目指してパルス出力を巨大化する努力がはらわれている。Ndガラスレーザでは大形のロッドで多段増幅し、更に終段をディスク形レーザとす

ることで約1KJのnsパルスが得られている。また電子ビーム制御TEA形多段増幅レーザのnsパルス出力も250Jに達した。この他H₂とF₂の混合ガスの化学反応を電子ビームで制御するHFレーザから、出力1KJ、幅40nsのパルスが得られた。現在更にnsパルスで出力10KJ級のガラスレーザの建設が行なわれている。

一方、連続出力の増大は4.5で述べた中圧・高流速形CO₂レーザで進められ、高周波放電を併用することで大容積を一樣に励起して27KWの出力が得られるようになった。このような大出力レーザのエネルギー源として貯蔵の容易な化学エネルギーの利用も試みられている。この例にはCOガスを燃料としたガスダイナミックCO₂レーザがあり、現在まで60KWの出力が報告されている。

8. 周辺技術

8.1 レーザ光の検出

光強度の測定には光速の熱効果を直接利用する測定器と、光子数に比例した光電気効果を利用する光電検出器とがある。前者は波長依存性が少なく絶対量を測定できるため、カロリメータとして主にレーザ出力の測定に用いられている。応答速度が早く感度の高い後者は、レーザ光の波形測定や微弱な光信号の測定に便利である。ここでは後者について利用する立場から市販品の種類と使用範囲について記す。

代表的な光電検出器を表2に示す。これを利用する上で注意すべきことは、1種類の検出器でカバーできる波長範囲が狭いこと、光子数検出器であるからパワーやエネルギーに換算する時波長依存性があること、である。GP光やモード同期レーザの波形観測には、高速の光検出器と共に広帯域のオシロスコープが必要である。なお焦電検出器は光子数検出ではないが、応答が早く赤外域まで常温で用いることのできる便利なデバイスである。

8.2 レーザ光の変調

変調技術はレーザ光に信号をのせる基本技術である。方式には時間内(1次元)変調と空間的(2次元)変調とあるが、ここでは前者についてだけ簡単に述べる。

一般にレーザビームは細いので、低速のオン・オフ変調は小形のセクタを回転することで容易に行なえる。羽根に工夫すれば数種の信号をのせることができる。

ガスレーザでは放電電流の直接変調が音声周波数まで行なうことができる。

10KHz以上の変調を行なうには特別な光変調器を必要とする。このため電気光学効果を利用した1,000MHzまでの光変調器が市販されている。利用できる波長域は

表2 代表的な光電検出器

材料または製品	効 果	動作温度	時 定 数	波長範囲 (μm)
Si Pn 接 合 太 陽 電 池	光 起 電	室 温	1 μs	0.5~1.1
Si Pin 接合ホトダイオード	光 導 電	室 温	< 1 μs	0.4~1.1
S-5 光 電 子 増 倍 管	光 電	室 温	< 10ns	0.2~0.6
S-20 光 電 子 増 倍 管	光 電	室 温	< 10ns	0.3~0.8
S-1 光 電 子 増 倍 管	光 電	室 温	< 10ns	0.3~1.1
PbS セ ル	光 導 電	室 温	0.25ms	0.5~2.5
InSb 単 結 晶	光 起 電	77 °K	< 2 μs	~5.4
InSb 磁 石 中 単 結 晶	光 電 磁	室 温	< 0.2 μs	~7
H ₃ CdTe 単 結 晶	光 導 電	77 °K	0.5 μs	~13
焦 電 検 出 器 (P5E)	焦 電	室 温	1 ns	~1000

0.25-1.2 μm で、数mmのアパーチャをもっている。使用電圧はアパーチャ径および波長とともに高くなる。0.63 μm のHe-Neレーザ光に対して500 V程度である。

8.3 レーザ ビームの偏向

いろいろな測定、情報処理、表示および加工等にレーザを応用する時、レーザ ビームの方向を変化させたい場合が多い。この目的でレーザ ビームの方向を機械的、電気的その他の手段で制御する技術を光偏光技術と呼んでいる。

ミラーやプリズムを回転させたり傾ける機械的偏光方式は大きな偏光角を安定に再現できる特徴をもつが、偏向速度は10KHzが上限のようである。

電気光学効果を用いたものは極めて早い偏向速度が得られるが、偏向角が小さいのでマイクロメモリの読み出しなど特殊用である。

超音波による光の回折現象を利用した超音波光偏向器は、1~10 μs の偏光速度とほぼ10°の偏向角を1 000点

もに分割して偏向できる。市販品は光メモリの読み出しやディスプレイ等に用いられている。

9. む す び

レーザに関係する先端的な研究は、いろいろな国際会議の盛況にも見られるようにますます活発に発展している。しかし研究された成果が製造上の技術的問題を解決して、信頼性のある製品として市場に出るためには時間を必要とする。最近になってOEMのHe-Neレーザが低価格で市販され始め、またオンライン用のレーザ加工機が生産されるようになったことは、技術開発が十分なレベルに達するとともに市場拡大の見通しが得られたことを物語る。しかし予測されている広い応用分野から見ればレーザの利用はまだ始まったばかりで、今後具体的な問題をもった各分野の専門技術者と、レーザ技術者の協力によって、レーザはいろいろな産業の中で活用されてゆくことと思われる。