レーザー装置 (I)

——固体レーザーおよび半導体レーザー——

日本電気株式会社 吉 川 省 吾
株式会社日立製作所中央研究所 中 島 尚 男

固 体 レ ー ザ ー

1. ま え が き

固体レーザー用に現在までに開発されたレーザー材料は数多い。しかし、①室温でレーザー発振が得られる、②発振効率が高い、③発振出力が大きい、などの実用的立場から固体レーザーをながめてみると、ごく一部の活性イオン、および母体材料を使用したレーザにかぎられてくる。

また、固体レーザーは光励起によりはじめてレーザー発振が可能になるので、レーザー材料の有効吸収帯付近に強い発光を有する発光効率の大きい励起源が必要である。さらに、励起源から放射した光を効率よくレーザー材料に集める高効率な集光器も必要である。また、レーザー材料を励起中に、ある程度熱的ひずみを発生することは避けられないので、これらを考慮したレーザー共振器が必要となる。

一方、目的に応じてパルス励起、および連続励起のレーザー装置が開発されている。また、Qスイッチ、およびモード同期などの技術を利用したパルス発振が用いられている。

2. レーザー発振器

2.1 レーザー材料

ここでは固体レーザー材料の光物性、および分光学的性質については省略するが、まえがきで述べたような特性を発揮するためには強い励起光に耐え得る物理的にも化学的に安定した材料であること、さらに光学的均一性のすぐれた材料が必要である。また、大出力のレーザー発振を得るためには大きい高品質なレーザー材料であ

ることも大切である。

このような点を考慮すると、現状ではルビー (Cr^{3+} : Al_2O_3)、 Nd^{3+} イオンを活性イオンとして含むガラス、イットリウム・アルミニウム・ガーネット ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, 略称 YAG)、およびイットリウム・アルミニウム・オキサイド (YAlO_3) などがすぐれたレーザー材料である。

表1にこれらのレーザー材料のおもな性質をあげた。このうち、ルビーは典型的な3単位動作で、 Nd^{3+} イオンを含む母体材料は代表的な4単位動作で発振するレーザー材料である。3単位動作の場合には基底準位がレーザー発振の終準位と共通になっているために、レーザー発振に必要なレーザー発振準位間の占有数の反転分布を得るために、少なくとも基底準位に存在する占有数の半数以上を励起する必要があるため、4単位動作の場合と比較して発振の閾値が高く、発振効率も小さい。しかし、ルビーの発振波長は室温で $0.6943 \mu\text{m}$ で可視光領域にあるが、 Nd^{3+} イオンを含むレーザー材料の代表的な発振波長は室温で $1.06 \mu\text{m}$ 付近で近赤外領域である。したがって、ルビーレーザーの場合には発振光が視感度領域内にあるうえにレーザー材料としてきわめて安定で、パルス励起によって簡単に発振するために、現在でも広く使用されているレーザー材料のひとつである。

また、 Nd^{3+} イオンを活性イオンとして含むレーザーにおいては、 Nd^{3+} イオンが母体材料中の周囲のイオンの影響を受けにくい安定したイオンであり、多くの結晶や、ガラス、プラスチックのような非結晶体が母体材料である場合にも容易に発振し、その発振波長も母体材料によってほとんど変化しない。しかし、発振線の線幅は母体材料が結晶である場合には 0.1 nm 程度であるが、ガラスの場合には 2 nm から 10 nm 以上もあり、発振の閾値は結晶を母体材料とするものと比較して、それだけ高くなる。また、発振効率の点でも小さい。

"Laser and its Applications; 5. Laser Apparatus—Solid State Laser and Semiconductor Laser" by Syogo Yoshikawa (Nippon Electric Co., Ltd., Kawasaki) and Hisao Nakashima (Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tokyo)

表 1 代表的なレーザー用母体材料の主な性質

	コ ラ ン ダ ム (ルビー)	ガ ラ ス	YAG	YAlO ₃
組 成	Al ₂ O ₃ (: Cr ³⁺)	—	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	YAlO ₃
結 晶 系	六 方	—	立 方	斜 方
融 点 (°C)	2040	590	1950	1875
硬 度 (Moh)	9		8.5	8.5~9
屈 折 率 (NaD 線)	常 光 1.768 異常光 1.760	1.52	1.836	$n_a=1.97$ $n_b=1.96$ $n_c=1.94$
熱膨張係数 (°C ⁻¹) (室温)	6×10^{-6}	10×10^{-6}	7.7×10^{-6}	2.2×10^{-6}
熱伝導率 ((cal/s·cm·°C) (室温)	0.077	0.002	0.03	0.03
透過波長域 (μm)	0.2~4.5	0.35~2	0.28~5.3	0.29~5.9

しかし、広い発振線幅を必要とするピコ秒パルスレーザー、さらに高品質で大きなレーザー材料を必要とする大出力パルスレーザーを実現するために Nd ガラスは有用である。

また、母体材料が結晶である場合の結晶の種類は現在までに多数開発されているが、YAG は物理および化学的にもすぐれた結晶であるばかりでなく光学的にも均一な大きい結晶が得られており、現在もっとも広く使用されている固体レーザー材料である。さらに、YAlO₃ は直線偏光をもったレーザー光が高効率で得られるという特長をもっているレーザー材料である。

2.2 励起源

固体レーザー用励起源はその励起法によってパルス励起と連続励起に大別される。

励起源としては使用されるレーザー材料の有効吸収帯と一致した強い発光スペクトルをもっていることである。

たとえば、ルビーの有効吸収帯は 380 nm (4A₂→4F₁ 遷移)、および 550 nm (4A₂→4F₂ 遷移) にあり、一方 Nd³⁺ イオンを含むレーザー材料の有効吸収帯は 580nm (⁴I_{9/2}→²G_{7/2} 遷移)、750 nm (⁴I_{9/2}→⁴F_{7/2} 遷移)、810nm (⁴I_{9/2}→⁴F_{5/2} 遷移)、および 870 nm (⁴I_{9/2}→⁴F_{3/2} 遷移) にある。

(a) パルス励起

500~750 mmHg の封入ガス圧のキセノンフラッシュランプが広く使用されている。フラッシュランプの場合には、一般に放電電流密度を大きくするとその発光スペクトルは短波長領域に移行する性質がある。したがって、ルビーレーザーの励起には放電電流密度を大きくした方が効果的であるが、ランプ寿命が短くなることは避けられない。

一方、Nd³⁺ イオンを含むレーザー材料の励起には、封入ガス圧 750 mmHg のクリプトンフラッシュランプも有効である。また、放電電流密度を 2000 A/cm² 以下

で使用することが効果的であり、したがってランプ寿命も長く、数十万回から一千万回ぐらいのフラッシュ数で使用できるものもある。このため、近頃は高速繰返し Nd³⁺: YAG が産業用の生産設備として実用化されている。

(b) 連続励起

主なものに、① ヨウ素サイクルタングステンランプ (I-W ランプ)、② カリウム水銀ランプ (K-Hg ランプ)、③ クリプトンアークランプ、および ④ 発光ダイオード (LED) などがある。

① 色温度 3,200~3,400°K の I-W ランプは 0.8~1.0 μm の波長に発光の最大値をもつ。電気入力に対する光への変換効率は 90% 以上あるが、Nd³⁺: YAG に吸収される量は 3~5% 程度である。ランプの動作は非常に安定であるが、構造上その最大入力に限界があり、実用上 1.5 kW 程度である。したがって、大出力は期待できない。ランプ寿命は色温度 3,000°K のランプで 300 時間程度である。

② アルゴンガスをスタータガスに用いた K-Hg ランプは、カリウム原子の共鳴線 766.5 nm、および 769.9 nm で電気入力の約 40% を放射でき、Nd³⁺: YAG に対する効率は非常に高いが、構造が複雑で電気入力に限界があり、ランプ寿命が短いなどの実用上の問題がある。

③ クリプトンアークランプの発光スペクトルは 750~900 nm の間にいくつかのピークを示し、Nd: YAG とのスペクトルマッチングは I-W ランプよりすぐれている。また、封入ガス圧を増すと電気入力に対する光への変換効率も高まり、4 気圧で約 40%、10 気圧で約 45% に達し、吸収効率も 5% 以上になる。このためクリプトンアークランプは高出力 YAG レーザーの連続励起源として広く使用されている。ランプ寿命は実用上 200~400 時間程度である。

④ たとえば GaAs_xP_(1-x)、GaAl_xAs_(1-x) ダイオー

図1 おもな固体レーザー用集光器形状

ドの発光スペクトルの中心波長は、接合部温度および組成比によって変化し、Nd:YAG 有効吸収帯 810 nm に合わせた発光が得られる。このため、有効にレーザー励起でき、非常に小型の YAG レーザーが実現できる。

2.3 集光器

励起源からの光を効率良くレーザー材料に集光するために、目的に応じていくつかの集光器が開発されている。

図1(a)はパルス励起用を含めて広く利用されているもので、楕円筒反射面を用いてその焦点軸に励起ランプとレーザー材料を配置する。この変形として励起ランプを2本使用する2重楕円形などがある。(b)はプロレイト形回転楕円体の2つの焦点の外側にレーザー材料と励起源を直線上に配置するもので、効率良く集光できるが、レーザー材料と励起源の冷却が複雑であり、レーザー共振器構成上の制約がある。(c)は球の中心部にレーザー材料と励起源を接近して平行配置したものである。(d)は球形集光器を改良したもので、プロレイト形回転楕円体の2つの焦点の間にレーザー材料と励起源を平行配置したものである。

一方、集光器の反射面はルビーレーザーの場合には吸収帯が比較的短波長にあるので高純度アルミニウムなどで作られる。また、 Nd^{3+} イオンを含むレーザー材料の場合には、有効吸収帯が近赤外領域にあるため金メッキまたは金蒸着によって反射面が作られている。

2.4 レーザー共振器

レーザー材料は励起中強い光照射を受け、母体自身の吸収および活性イオンの無放射遷移による発熱を考慮す

る必要がある。この影響は発振出力が大きい、高速繰返しパルス励起、および連続励起の場合に、とくに受けやすい。

この発熱は、レーザー材料の周囲を水冷するので中心部でより高温となる。したがって熱膨張と屈折率の温度変化を考慮すると、YAG の場合には中心部で屈折率が大きく、周辺になるほど小さくなり、等価的に凸レンズになる。この等価凸レンズの焦点距離は、連続励起において出力数 W の場合で 1 m 前後、出力 100 W では数十 cm になる。

したがって、このレンズ効果を考慮したレーザー共振器の構成が必要となる。特に単一基本横モード(TEM_{00})発振の場合には、レーザー材料の両端面をあらかじめ凹面に研摩し、ちょうど必要なレーザー出力レベルで凸レンズ効果を打消す方法や、均一媒質中ではレーザー共振条件を満足しないような凸面反射鏡を用いたレーザー共振器を構成して、レンズ効果を補償する方法が行われている。

3. パルス励起

比較的短時間に大出力のレーザーエネルギー、および尖頭出力の大きいパルスレーザーが必要な場合には、高密度励起が行えるパルス励起が広く利用されている。

このパルス励起法の場合には発振状態により、通常発振とQスイッチングまたはモードロッキング技術を組合せたパルス発振に分けられる。

通常発振においては発振時間 0.25~10 ms 程度のランダムなスパイク状パルス発振で最高出力 100 J のものが、レーザー加工などに実用化されている。

一方、パルス励起によってレーザー材料中の活性イオンの充分な反転分布が得られていても、レーザー共振器中に発振を上まわる損失を挿入しておき、反転分布が最大値に達したとき、瞬時的に損失を去除くと数十 ns のパルス幅の大きい尖頭値をもったレーザー発振が得られる。このパルス発振をQスイッチパルスとよんでいる。この方法として回転鏡、およびポッケルスセルを用いるものが広く利用され、尖頭値は 10~100 MW に達する。

さらに、狭いパルス幅のレーザー光を得る方法としてモードロッキング技術を利用し、具体的には可飽和色素セルをレーザー共振器鏡に近接して挿入することにより数 10~1 ps 以下のパルス幅のレーザー光が得られる。

これ以上に大きい尖頭出力が必要な場合には、レーザー増幅器を数段付加することにより数 GW またはそれ以上の出力のレーザー光を得ることができる。このような方法はプラズマ加熱や、月測距などに利用されている。

写真1 連続励起 Nd: YAG レーザー (日本電気製)

また、Nd: YAG の場合には出力は 10 MW 程度であるが、10~100 pps の高速繰返し Q スイッチパルスレーザーが実用化されており、レーザーレーダーなどに利用されている。

4. 連続励起

固体レーザー材料の中で、とくに Nd: YAG は発振の閾値も低く、発振利得も大きいことから、連続発振が容易に得られる。また、発振出力も多モード発振では 100 W 程度までは比較的簡単に得られ、発振効率も 3 % 近くに達する。写真1は連続発振 Nd: YAG レーザーの外観写真である。しかし、単一基本横モード発振は前述したレーザー材料に誘起される熱ひずみの影響を受け、10 W 前後までは比較的簡単に得られるが、さらに高出力の場合には工夫が必要となる。

連続励起の場合にはパルス励起と同様に、Q スイッチングおよびモードロックの技術を取り入れてパルス発振が可能で、種々な用途に利用されている。

連続励起 Nd: YAG レーザーの Q スイッチングにおいて、もっとも効果的な方法に超音波 Q スイッチがある。超音波 Q スイッチの特長は光損失のきわめて小さい溶融石英を超音波媒質とし、トランスデューサーとして

図2 繰返しQスイッチパルスレーザーの繰返し周波数と平均出力および尖頭出力

合成水晶または LiNbO_3 を数十 MHz に結合するように切出し、石英に接着する。そして、石英中にトランスデューサーから数十 MHz の超音波が発生するとレーザー光は超音波による回折損失を受け散乱するので、レーザー共振器に効率 1~2%/W の割合で動損失を与える。この損失が利得を上まわるとレーザー発振は停止する。

一方、さらに必要な繰返し周波数でこの超音波をスイッチすると、超音波が止まった瞬間にレーザー共振器の Q 値が回復し、Q スイッチ光パルスが発生する。とくに連続励起の Nd: YAG レーザーでは Nd: YAG のレーザー発振単位間の緩和時間は約 250 μs であるから、約 1 kHz 以下の繰返し周波数における Q スイッチでは、尖頭出力は連続発振出力の 10^3 倍程度である。一方、Q スイッチ光パルスの平均出力は、繰返し周波数に比例したものとなる。

さらに繰返し周波数を高くすると、図2に示すように尖頭出力は小さくなるが、平均出力は連続発振出力に近づいてくる。このような方法によって、最高 50 kHz の繰返し Q スイッチレーザーが実用化されており、電子部品の加工に広く利用されている。

さらに、高速な繰返しパルスレーザーが必要な場合には、レーザー共振器内の光密度が最高値に達した瞬間にスイッチングによってレーザー光を取り出す方法をキャビティダンブドと呼び、100 kHz~10 MHz の繰返しパルスレーザー光を発生することができる。

100 MHz~1 GHz の繰返しパルスレーザーが必要な場

表2 連続励起 Nd: YAG レーザーのパルスレーザー特性

動作状態 周波数 (Hz) レーザー特性	Q スイッチング			キャビティダンブド			モードロック	
	10^3	2×10^4	5×10^4	10^3	10^6	10^6	10^8	10^9
尖頭出力	$10^3 P_{cw}$	$1.6 \times 10^2 P_{cw}$	$4 \times 10 P_{cw}$	$10^3 P_{cw}$	$10 P_{cw}$	P_{cw}	$3 \times 10^2 P_{cw}$	$3 \times 10 P_{cw}$
平均出力	$0.25 P_{cw}$	$0.9 P_{cw}$	P_{cw}	P_{cw}	P_{cw}	P_{cw}	P_{cw}	P_{cw}
パルス幅 (μs)	0.15	0.28	0.6	0.1	0.1	0.1	10^{-4}	10^{-4}

[注] P_{cw} : 連続発振出力

合には、モードロッキング技術により超音波変調器をレーザー共振器中に挿入することにより、レーザー共振器長に応じた光パルスを得ることがすでに実用化されている。これらのパルスレーザーの特性を表2にまとめた。

このように、連続励起における固体レーザーの主役はNd: YAGレーザーであるが、目的に応じて連続発振からきわめて高い周波数までの繰返しパルスレーザーが可能であることを利用して、現在でも多方面の応用に使用

されている。

5. む す び

1960年にルビーレーザーが発明されて以来、固体レーザーは他のレーザーでは得られない個性的な発展を遂げ、今日にいたっている。紙面の都合で割愛した部品も多いが、御参考になるところが少しでもあれば幸いである。

(吉川)

半 導 体 レ ー ザ ー

1. ま え が き

1962年、GaAs pn 接合において、低温におけるレーザー発振が観測されて以来¹⁾²⁾、半導体レーザーの研究が盛んになり、注入形に限らず、電子ビーム励起形や光励起形などでもレーザー発振が観測されてきた。また、GaAs系以外でも、ZnS, ZnO, CdS, GaN等で可視レーザー発振、およびInP, GaSb, InAs, PbTe等で赤外、遠赤外レーザー発振が観測されている³⁾。1970年、GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs二重ヘテロ構造レーザーの開発により室温連続発振が実現し⁴⁾⁵⁾、その後の信頼性向上とともに連続発振素子の実用化開発が進んでいる。

半導体レーザーは他の気体レーザー、固体レーザー、色素レーザー、化学レーザー等と比較して以下の特長をもつ。

- (i) 装置が非常に小型で、完全に固体化され、レーザー発振に外部光学系を必要としない。
- (ii) 低電圧(約2V)、低電力(<0.5W)で動作する。
- (iii) 外部変調器を必要とせず、直接電流変調が可能である。
- (iv) レーザー発振の効率が低い。
- (v) 光ファイバーの高効率結合が可能である。
- (vi) 集積化が可能である。

また、欠点としては、

- (i) 現在までのところ、連続発振は赤外に限られる。
 - (ii) 単体で大きな出力を得ることは困難である。
 - (iii) 気体レーザー等と比較してコヒーレンス(干渉性)が劣る。
- などがあげられる。

以下、現在最も開発が進んでおり、実用化段階に入りつつある二重ヘテロ構造レーザーの構造、特性、信頼性等について述べ、さらに新しい構造の半導体レーザーについても若干述べる。

図3 半導体レーザーの基本構造(模型図)

2. 半導体レーザーの構造、形状

2.1 レーザー発振の原理

半導体レーザーは図3に示すように、基本的には相対する一対の平行反射鏡面を備えた pn 接合である。通常の発光ダイオードと異なり、レーザー発振を起させるには非常に高い電流密度を必要とするため、それに適した不純物添加および放熱が要求される。半導体材料としては本質的に発光効率の高い材料、GaAs等の直接遷移形の半導体を用いられる。

図3に半導体レーザー内部における電流担体(電子、正孔)およびレーザー光の進路を模型的に示す。 pn 接合に順方向に電圧を印加すると、図3のように電子、正孔が接合面に向かって流れ、接合面付近で両者が再結合する。このとき余分のエネルギーは熱または光として外部に放出される。電流密度が充分高くなると、接合付近(図3の活性領域)で電子と正孔が高密度状態で共存するようになる。

このような状態において、電子と正孔は光と結合して連鎖反応的に再結合し、光の誘導放出を起す。そして、平行鏡面によって構成される光共振器により位相のそろった特定の波長の電磁波のみが強められ、内部損失に打ち勝って端面から外部にレーザー光として放射される。レーザー発振を起させるに必要な電流密度の下限を閾電流密度と呼ぶ。またレーザー素子内部でレーザー発振を

図4 ストライプ形ダブルヘテロ構造レーザー

起す再結合発光領域を活性領域と呼ぶ。

半導体レーザーは上述したような接合を利用した注入形レーザーが一般であるが、電子ビーム、光などで電子と正孔を高密度に励起する場合もある。

2.2 二重ヘテロ構造レーザー

二重ヘテロ構造 (DH 構造) レーザーは図4に示されるように、活性層である GaAs が n 形 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 層と p 形 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 層でサンドイッチされた構造である⁴⁾⁵⁾。活性層は n 形、 p 形どちらでもよい。図3のⅠ、Ⅱ、Ⅲの領域が同じ半導体から成るホモ接合レーザーの場合は、電子、正孔の拡散による電流損失、光のしみ出しによるⅠ、Ⅲ領域における吸収損失等から、閾電流密度が非常に高い。

一方、DH 構造レーザーの場合は、ヘテロ接合のポテンシャル障壁により、電子と正孔の活性領域からの流出が妨げられるとともに、GaAs 活性層と $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ サンドイッチ層間の屈折率差 (活性層の方が大) により光は活性層内にとじ込められ、光の損失も非常に小さくなる。

このため、GaAs- $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ DH 構造レーザーでは、閾電流密度が GaAs ホモ接合レーザーに比較して1桁以上低くなり、室温における連続動作が可能となった。

2.3 ストライプ形状

図4に示すように、電流を流す領域をなんらかの方法で限定し、レーザー発振の起る領域が活性層内の狭いストライプ状になっているレーザーをストライプ状レーザーという。このような限定された領域がない場合、レーザー発振は活性層内で不均一に、不確定な場所で起るので、再現性のある良質なレーザー光が得難い。ストライプ形レーザーでは、動作電流が小さくなるとともに、分光特性、モード特性が改善され、熱抵抗が小さくなり、細い光ファイバーとの結合効率も向上する。

ストライプ形状には、④ 酸化膜により電極をストライプ状にしたもの⁶⁾、⑤ ストライプ領域以外をプロトン照射により絶縁化したもの⁷⁾、⑥ 化学エッチにより

ストライプ領域以外を除去しメサ形にしたもの⁸⁾⁹⁾、⑦ 不純物の拡散により電流通路を制限したもの¹⁰⁾¹¹⁾がある。

これらのストライプ形レーザーにおいては、(i) ストライプ領域外への電流広がり、(ii) ストライプ領域両側部における非発光性再結合損失、(iii) ストライプ領域両側部における光損失の大きさが問題となる。これらが大きいと、ストライプ幅を狭くしたとき、閾電流密度の上昇を招くので、ストライプの形状は慎重に考慮する必要がある。

3. 二重ヘテロ構造レーザーの特性

3.1 電流-電圧特性

注入形半導体レーザーの電流-電圧特性は、通常の pn 接合ダイオードの電流-電圧特性と同じである。順方向電流は、電流の小さいときを除きほぼ $\exp(V/nkT)$ (V : 印加電圧, n : 無次元数, k : ボルツマン定数, T : 絶対温度) に比例し、逆方向特性は電圧 V_b でブレイクダウンを示す。GaAs- $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ DH 構造レーザーでは、順方向動作電圧は約 2 V、 $|V_b|$ は 10~50 V、発振領域において n は 1 である。

3.2 光出力-電流特性および閾電流密度

半導体レーザーの光出力-電流特性を図5に示す。閾電流 I_{th} より上がレーザー発振領域である。GaAs- $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ DH 構造レーザーの閾電流密度 J_{th} は、活性層の厚さ d (μm) に比例し、一般に $J_{th}/d = 5 \text{ kA/cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ である。普通、 d は $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ であるので J_{th} は $1,000 \sim 2,500 \text{ A/cm}^2$ 程度となる。

I_{th} は素子のストライプ幅、キャビティー長に依存し、幅 $20 \mu\text{m}$ 、長さ $300 \mu\text{m}$ の素子では、 I_{th} は $100 \sim 200 \text{ mA}$ 位である。 $1,000 \text{ A/cm}^2$ 以下の J_{th} のものもしばしば報告されており、30 mA という低い I_{th} も得られている⁹⁾。

光出力は素子の熱抵抗、端面破壊によって制限され、

図5 半導体レーザーの光出力と電流の関係

最高 700 mW 出せるが¹³⁾、この場合は寿命が非常に短い。通常は 20 mW 前後であり、この出力では 1 万時間以上の寿命が記録されている¹⁴⁾。また、100 mW、2,500 時間の報告もある¹⁵⁾。

半導体レーザーの特性上問題となる点は温度依存性が大きいことである。 J_{th} は $\exp(T/T_0)$ (T_0 は 100~150°K) に比例するため¹²⁾、わずかの温度変化で光出力が大幅に変化するので、なんらかの温度補償が必要である。

3.3 効率

半導体レーザーの効率としては各種のものが定義できるが、パワー効率 η_p と微分量子効率 η_d が多く用いられる。光出力を P 、電流を I 、電圧を V 、光子エネルギーを $h\nu$ とすれば、 η_p は P/IV 、 η_d は $(e/h\nu)(\Delta P/\Delta I)$ で表わされる。 η_d は活性領域への注入電子、正孔対に対する放出光子数の割合の微分値で、図 5 の $I > I_{th}$ における傾斜から求められる。GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs DH 構造レーザーでは、 η_p は 3~15%、 η_d は 30~60% 程度である。

3.4 発振波長

半導体レーザーの発振波長は、活性領域を構成する半導体材料の禁制帯幅 E_g で決まる。GaAs では E_g は 1.435 eV であるから、発振波長は約 8,600 Å となる。この発振波長は活性領域中の不純物濃度に依存し、不純物濃度が増加すると長波長になり、9,000 Å 以上にもなる。発振波長を短くするには、活性領域に Al を添加して、 E_g を大きくすればよい¹⁶⁾。最短波長は連続発振で 7,730 Å、パルスで 6,930 Å である¹⁷⁾¹⁸⁾。

また発振波長も、温度によって E_g が変わるため変化し、その温度依存性は 3 Å/degree である。発振波長は半導体材料によって異なり、10 μm 位 (Pb_{1-x}Sn_xTe) から 4,000 Å 位 (GaN) まで得られるが、室温連続発振は現在のところ得られていない³⁾。

3.5 発振モードと発振スペクトル

レーザー発振の原理からわかるように、レーザー光としては光共振器の定在波共振モードに相当するもののみが許される。共振モードは一般に多数あり、スペクトルのうえでそれらは 0.1~2 Å ずつ波長の異なるピークとして観測される。ストライプ形 Ga_{1-x}Al_xAs DH 構造レーザーでは、ストライプの幅、境界条件、電流レベルにより単一の発振が可能である。

3.6 動特性

半導体レーザーに、発振を起こさせるに要する時間は、注入電子・正孔の寿命程度であるから、GaAs 系レーザーにおいては 10⁻⁹ sec 程度である。発振状態になると電子・正孔の寿命は短くなるので、発振状態での振幅変調は、1 GHz 以上も可能とされている。半導体レ

ザーの動特性については、直流発振の折に 1 GHz 前後の周波数の高速パルス列が自然発生することが報告されており、興味ある現象として研究されている。

3.7 寿命

半導体レーザーの劣化には、レーザー光出力が 1~10 MW/cm² 位になったとき、瞬時に起る破壊現象と、連続動作時に時間の経過とともに、閾電流密度が次第に上昇する現象の 2 つがある。光出力による破壊は破壊限界がかなり高いので、通常の使用では問題とならない。連続動作時に起る劣化は数十時間で起る初期急速劣化と、数千時間で起る長期劣化に大別される。

初期急速劣化は活性層内の転位等からの暗黒線欠陥の発生によって生じる¹⁹⁾。この暗黒線欠陥は転位網であり、連続動作時に発生増殖する。活性層への少量の Al の添加、サンドイッチ層への P の添加、ヒートシンクへ接着時の応力の低減など、暗黒線欠陥の発生を防ぐ方策が提案されているが、無転位の結晶を使用することが一番有効である²⁰⁾。長期劣化の原因は現在のところ不明な点が多く、対策もあまりなされておらず、今後の問題であるが、光出力に依存すること、端面が破壊されることなどが知られている²¹⁾。

現在 GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs DH 構造レーザーの連続動作の寿命は最高 1 万時間以上が記録されている¹⁴⁾。

4. 新しい形の半導体レーザー

4.1 埋め込みヘテロ構造半導体レーザー²²⁾

前述したように、ストライプ形ダブルヘテロ構造レーザーでは、ストライプ幅を極端に狭くすると閾電流密度が上昇する。これを改善したのが埋め込みヘテロ構造レーザーであり、図 6 に示される構造を持つ。図 6 からわかるように、活性層が完全に Ga_{1-x}Al_xAs 層にかこまれているため、側面での電流担体および光の損失がなく、ストライプ幅を 1 μm 位狭くしても閾電流密度の上昇はない。閾電流の最小値はパルスで 7 mA、DC で 9.5 mA と小さい。また幅が狭いため、モードが安定で、

図 6 埋め込みヘテロ構造レーザー

図7 分布帰還形半導体レーザー

TE₀₀の基本モード動作が再現性よくできる。

4.2 分布帰還形半導体レーザー

半導体レーザーは通常、劈開面を利用したファブリペロー共振器を有する。このため、縦モードは通常単一ではなく、スペクトル上にいくつかの発振ピークが観測される。この点を改善したのが分布帰還形半導体レーザーであり、その構造を図7に示す。色素レーザーの場合と同様に周期的構造のグレーティングによって発振波長が決まるため、単一縦モード動作ができる利点を有する²³⁾。図7において電流担体とじ込められる層(p-GaAs)と光がとじ込められる層(p-GaAs, p-Ga_{0.83}Al_{0.17}As, p-Ga_{0.93}Al_{0.07}As)が異なっており、グレーティングは光がとじ込められる層上に形成されている。この構造で室温の閾電流密度3 kA/cm²で連続動作が報告されている²⁴⁾。

5. む す び

以上、半導体レーザーについて簡単に概説したが、半導体レーザーが実用化されるには、まだ多くの課題が残されている。課題の第一は信頼性であり、10⁵時間以上の寿命を確保するためには長期劣化現象の機構の究明と

その対策が急がれる。また、モード制御、光ファイバーとの結合、変調等の技術の開発、および可視室温連続発振半導体レーザーの開発も重要な課題である。これらの課題が解決されたなら、光情報伝送、光情報処理等の広い応用分野が半導体レーザーの前に開かれてくるであろう。(中島)

〔参考文献〕

- 1) R.N. Hall, et al: Phys. Rev. Letters, **9** (1962) 366
- 2) M.I. Nathan, et al: Appl. Phys. Letters, **1**(1962)62
- 3) M.I. Nathan: Appl. Optics, **5** (1966) 1514
- 4) I. Hayashi, et al: Appl. Phys. Letters, **17**(1970)109
- 5) Zn.I. Alferov, et al: F.T. Poluprovodnikov, **4** (1970) 1826
- 6) J.C. Dymant, et al: Appl. Phys. Letters, **10**(1967) 84
- 7) J.C. Dymant, et al: Proc. IEEE, **60** (1971) 726
- 8) T. Tsukada, et al: Appl. Phys. Letters, **20** (1972) 344
- 9) T. Tsukada, et al: IEEE J. Quantum Electr. **QE-9** (1973) 356
- 10) H. Yonezu, et al: Jap. J. Appl. Phys., **12** (1973) 1585
- 11) 須崎ほか: 電気学会電子装置研究会 EDD-72-38(昭47)
- 12) I. Hayashi, et al: J. Appl. Phys., **42** (1971) 1929
- 13) 茅根ほか: 第35回応用物理学会, 8p-C-7 (1974.10)
- 14) J.C. Dymant, et al: Appl. Phys. Letters, **24**(1974) 481
- 15) O. Nakada, et al: Japan. J. Appl. Phys., **13**(1974) 1485
- 16) H. C. Casey, Jr. and M.B. Pan'ish: J. Appl. Phys., **40** (1969) 4910
- 17) B.I. Miller, et al: Appl. Phys. Letters, **19**(1972)340
- 18) K. Itoh: Proc. 5th Conf. (1973 Intern.) on Solid State Devices 49
- 19) B.C. Deloach, Jr., et al: Proc. IEEE, **61** (1973) 142
- 20) S. Kishino, et al: Appl. Phys. Letters, **27**(1975)207
- 21) 茅根ほか: 第36回応用物理学会 (1975.11)
- 22) T. Tsukada: J. Appl. Phys., **45** (1974) 4899
- 23) M. Nakamura, et al: Appl. Phys. Letters, **25**(1974) 487
- 24) M. Nakamura, et al: Appl. Phys. Letters, **27**(1975) 403