

半導体レーザー励起マイクロチップ固体レーザー

Microtip solid state laser pumped by a laser diode

佐々木孝友、小栗修、中井貞雄*

大阪大学工学部、レーザー核融合研究センター*

Faculty of Eng. and Institute of Laser Eng., Osaka University

1. まえがき

半導体励起固体レーザーの特徴は小型という点にあり従来からレーザー材料にはNd:YAGの直径数mm,長さ3~10mm寸法の物が使われ、これにマイクロレンズやファイバ系を用いて半導体レーザーで励起するという構成がとられてきたが最近さらにマイクロ化が進み固体レーザー材料は1mm角かそれ以下のレーザー媒質長が極めて短いものが出現してきた。ここではこのようなレーザーをマイクロチップレーザーとは言うことにする^{1,2)}。

これらマイクロチップレーザーの特徴は、①超小型、②横、縦両モード共単一発振が容易、③長寿命、④低費用、である。その原型はすでに10年以上も前に日本のNTTグループが報告している³⁾。当時は光通信光源として開発されたものであるが、最近になって高出力の励起用半導体レーザーが開発されるようになったため、再び注目されるようになってきた。このようなマイクロチップ固体レーザーでは励起光を十分に吸収できるような吸収係数の高いレーザー媒質が必要で、また吸収係数が高いことを利用することにより共振器長を大きくとったままで容易に単一縦モードを得ることができる。従って共振器内に非線形光学結晶を導入することができ、超小型のグリーン・ブルー光発生装置を作ることができる。これらは超小型故に大量生産により低価格が実現でき、センサー、光計測、高密度光メモリー、カラーディスプレイ等多くの分野でその応用を考えることができる。ここでは特に計測用として重要な単一モード発振を中心に筆者等が今までに得たNd:YVO₄マイクロチップレーザー特性について1.06μm光発振と二倍高調波発生につき報告する。

2. 吸収係数の大きなレーザー媒質を用いることによる単一縦モード発振

従来、単一縦モードを得るには共振器に工夫を加えることにより単一モード化が計られている。1)リング型共振器を用いる方法、2)定在波共振器で①λ/4板や②エタロン板を用いる方法、③共振器間隔を狭くする方法等が報告されている。これらに対し、④吸収長が極めて短いレーザー材料を用いることにより単一縦モード化を計ることができる⁴⁾。共振器内に一様なゲインがある状態を考える。第一のモードが発振しており、これにより逆転密度分布に空間的ホールバーニングが生じるものとする。第二モードに対するゲインは、共振器ミラー端では零になり、ミラーから共振器の中心に向かって徐々に増加してゆく。このため吸収長の短い材料を用いて共振器端からごくわずかのレーザー媒質のみを励起してやれば第二モードのゲインを極めて低く押さえることができ単一モード発振が可能となる。この方法で単一モードを得るのに重要なのはレーザー媒質の吸収長であり、共振器長ではない。したがって共振器長を多少長くしても差し支えなく、高調波発生用素子などを共振器内部にいれても単一モード動作をさせることができる。

空間的ホールバーニングの生じにくい材料を選ぶのも単一縦モードを発振させる上で重要な要因である。励起状態の空間的緩和に関してはYAG, NPP等に関して調べられている。励起状態の空間的な拡散効果は、通常励起イオンと隣接の励起されていないイオン間との双極子相互作用によるといわれているが、励起イオンのエネルギーが隣の励起されたイオンをさらに高いエネルギー状態に励起するオージェ効果によるものなどもLNPなどで報告されている⁵⁾。いずれが主にきくにしても要は添加するレーザーイオン濃度を大きくし、隣接イオン間距離を短くしてやればよい。ただしイオン濃度を大きくすれば一般的に蛍光寿命が短くなり発光強度が落ちる濃度消光の問題が生じる。

3. Nd:YVO₄マイクロチップレーザー実験

3.1 高効率1.06μm発振

実験装置の概略をFig. 1に示す。半導体レーザーは1W級(SONY:SLD304V、またはMITSUBISHI:M4049E2)を用い、集光には3枚のレンズを用いた。集光径は弱励起時で100μm、150μm、強励起時で100μm、230μmの楕円形であった。レーザー材料にはa軸カットNd:YVO₄と比較のためNd:YAGを用いた。これらのNd濃度、吸収係数及び吸収長をTable 1に示す。結晶は厚み1mmの平行平板で、片面には共振器のミラーとして99.9%高反射コート、他面には無反射コートを施した。出力ミラーに反射率95%、曲率50mmのものを用いた時の基本波の出力パワーをFig. 2に示す。共振器長は10mm、Nd濃度1.1at%の時励起760mWに対し出力325mW、変換効率54.6%が得られた。濃度を1.78%から2.02%と濃くすると出力の低下が見られたが、これはFig. 3に示すようにNdが濃過ぎると濃度消光が見られるためであろう⁶⁾。共振器内における発振径はNd濃度に関係なく約70μmで共振器構成で決定される計算上の径とほぼ一致していた。

3.2 1.06μm単一縦モード発振特性

同様の実験を出力側に平面ミラーを用いて行った結果をFig. 4に示す。実線は単一モードを、破線はマルチモード出力を示す。単一モードは圧電素子を出力ミラーに付け共振器長を微調することで得た。2.02at%Nd:YVO₄では、吸収パワー690mWに対し最高出力221mWまで単一縦モードが得られた。この値はKintzら⁷⁾が励起状態に空間的拡散がないと考えた場合に計算上得られる値より約1.6倍大きく、実際にはエネルギーの空間的拡散が結構あることを意味している。一方1.1at%Nd:YVO₄では最高120mWの単一縦モード発振(吸収パワー530mW)しか得られなかった。またYAGでは吸収係数が低いため、出力も小さく縦モードも単一にはならなかった。

平面ミラーの場合の発振径を測定した結果をFig. 5に、またこの時の発振径に対して得られた基本波出力をFig. 6に示す。ただしこの場合二倍高調波発生実験を行うために出力側ミラーには反射率99.8%のものを用いた。球面ミラーの場合と異なり発振径はレーザー媒質の吸収係数により決定されることがFig. 5より分かる。さらにFig. 6から分かるようにレーザー媒質の濃度が濃く発振径が小さい程、出力が大きくなっている。平面ミラーの場合はレーザー媒質の吸収が大きいくほど空間的なパワーの集中が起こり、このため誘導放出が強くなり出力が増加するものと思われる。発振径が小さくなることと、基本波出力が増加する二つの要因を考慮すると2.02%Nd:YVO₄は1%Nd:YAGに比べSHG Enhancement Factorで約170倍となる。

3.3 単一縦モードによるグリーン光発生

グリーン光発生には2.02at%のNd:YVO₄を用い、厚さ7.0mmのKTP結晶を共振器内に入れてタイプII型により行った。吸収パワー620mWのとき、16mWのSHG出力が得られた。このときの基本波も単一縦モードであった。吸収パワーとSHG出力の関係をFig. 7に示す。

KTP結晶を内部共振器型でType II型のSHGに用いるときにはKTP結晶が複屈折の働きをするため、出力一定の安定したSHG光を得るためには温度の管理が必要となる。Fig. 8は結晶長4.3mmのKTPの温度を変化させた時に得られる基本波 $P\omega(\text{total})$ 、 $P\omega(C)$ と二倍高調波 $P_2\omega$ の出力特性を示す。 $P\omega(C)$ はNd:YVO₄のc軸方向の偏光成分を、 $P\omega(\text{total})$ は偏光に無関係な全出力を示す。 $P\omega(\text{total})$ はKTPの温度に無関係に一定であるが、 $P\omega(C)$ は29℃の周期で変動しており、これはKTP結晶長の温度変化から計算される常光線と異常光線の位相差により生じる偏光成分の変化と一致する。KTPを入れない場合はNd:YVO₄はC軸方向の偏光成分の利得が高いためこの成分のみが発振するがKTPのような複屈折板を挿入した時にはc軸に垂直な成分も発振できることを示している。SHGは基本波の発振光の偏光成分がC軸に平行な時か、またはそれに垂直な時に最も強くなり、その中間の時に最も弱くなりその変動周期は基本波の二倍になる。

最大のSHGを得る方法にはKTPが丁度 $\lambda/4$ 板の長さになればよい。このためには①結晶の温度を変

える、②結晶の傾きを変える、の二つがある。①の方法では最大 $29/4^{\circ}=7.2^{\circ}$ 変動させれば必ず最大出力が得られる。KTPの温度許容幅は $25.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}$ なので 4.3mm 長では 60° となるから、 7.2° は十分許容幅内である。②の方法では必要最大傾き角は $\Delta\phi=0.712^{\circ}$ となるが、角度許容幅は $16.7\text{mrad}\cdot\text{cm}$ なので、これは 4.3mm 長に対して 2.23° となり、これも許容幅内に入る。このように①または②の方法でKTPを $\lambda/4$ 波長板としてから、次に光軸まわりにKTPを回転させることで発振光の偏光方向を最適化することでSHGを最大とすることができる。

4. あとがき

半導体レーザー励起Nd:YVO₄マイクロチップレーザーの単一縦モード発振特性とグリーン光発生について述べた。これらは超小型、長寿命でしかも単一縦モードであるため、今後計測、光情報処理やその他の分野での応用が極めて有望と思われる。

(参考文献)

- 1)小島哲夫他：レーザー研究 18 (1990)646., 2)佐々木孝友：オプトロニクス (1990) No12 p55,
- 3)K.Kubodera et al: Appl. Opt.18 (1979) 884., 4)A.E.Siegman: Lasers (University Science Books, 1986) p.465., 5)K.Otsuka et al: IEEE J.Quantum Electron. QE-16 (1980) 538., 6)永元浩一他：レーザー研究 18 (1990) 646., 7)G.J.Kintz et al: IEEE J.Quantum Electron. QE-26 (1990) 1457.

Table 1 Nd concentration vs. absorption coefficient, absorption length in YVO₄ and YAG lasers.

レーザー材料	Nd濃度 (at%)	吸収係数 α (cm ⁻¹)	吸収長 $1/\alpha$ (mm)
a軸カット Nd:YVO ₄ (c軸偏光)	2.02	71.5	0.14
	1.78	54.4	0.18
	1.1	31.4	0.32
Nd:YAG	1.1	8.5	1.18

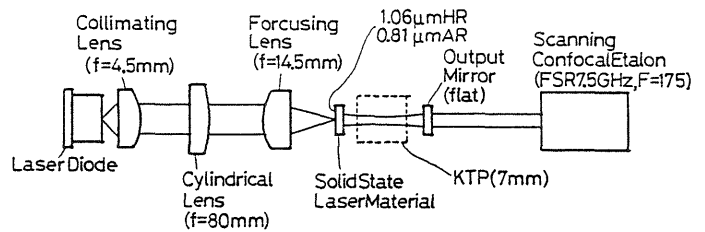


Fig.1 Experimental setup of microchip laser pumped by a laser diode.

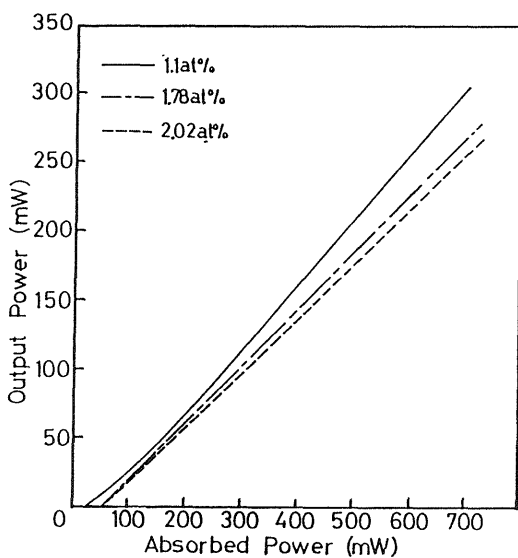


Fig.2 1.06μm output power vs. absorbed power. (Output mirror:R=95%,R=50mm)

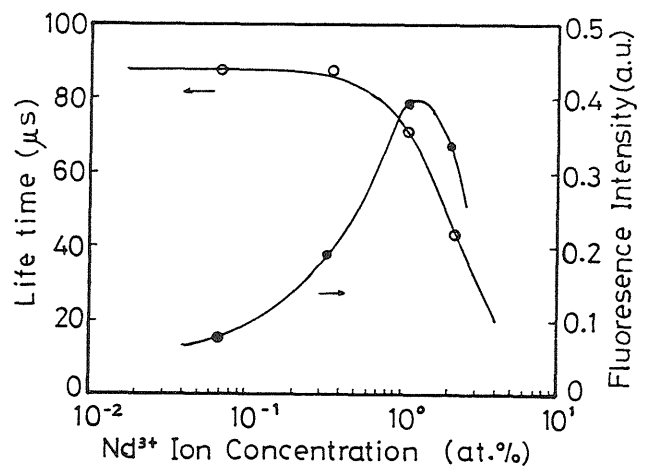


Fig.3 Life time and fluorescent intensity vs. Nd³⁺ concentration in YVO₄

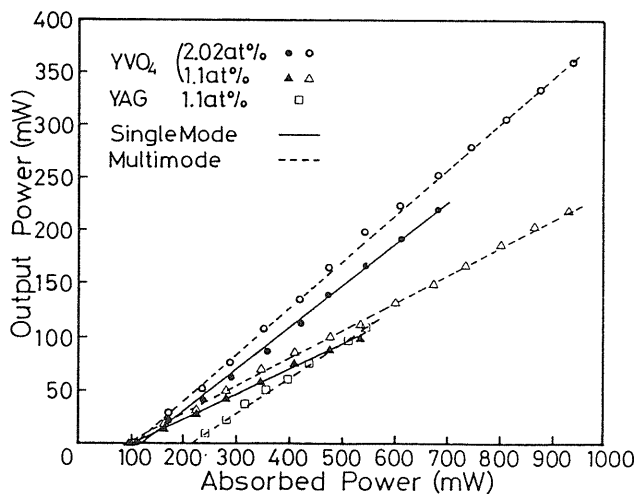


Fig. 4 1.06 μ m output power vs. absorbed power. Output mirror: R=95%, R=flat.

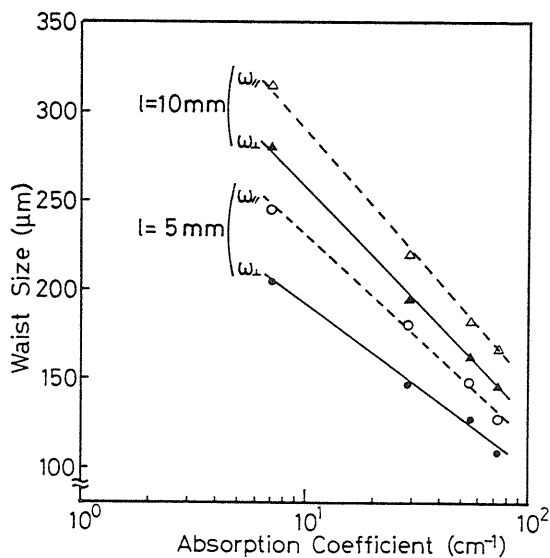


Fig. 5 Oscillating waist size in cavity vs. absorption coefficient of Nd:YVO₄. Output mirror: R=99.8%, R=flat, l: cavity length.

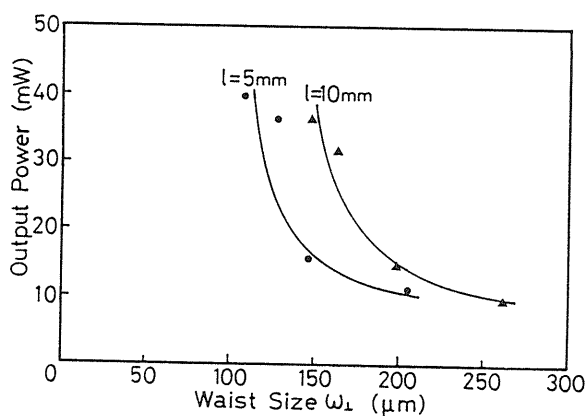


Fig. 6 1.06 μ m Output power vs. waist size in cavity.

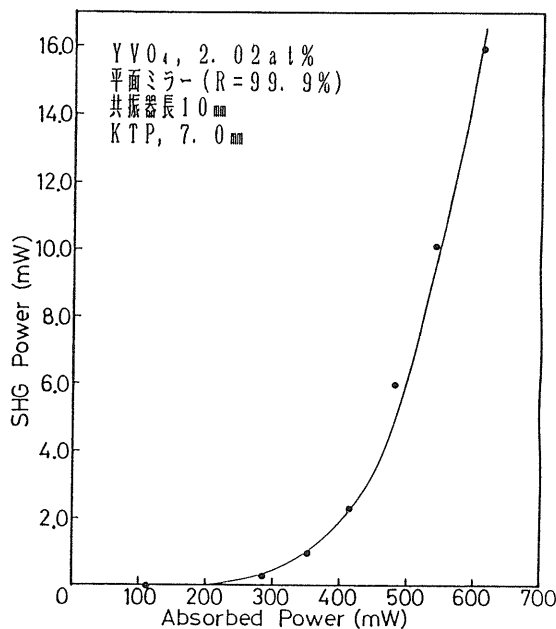


Fig. 7 Output power of single mode green light vs. absorbed power.

R_{ω} and $P_{2\omega}$ Vs Temperature of KTP

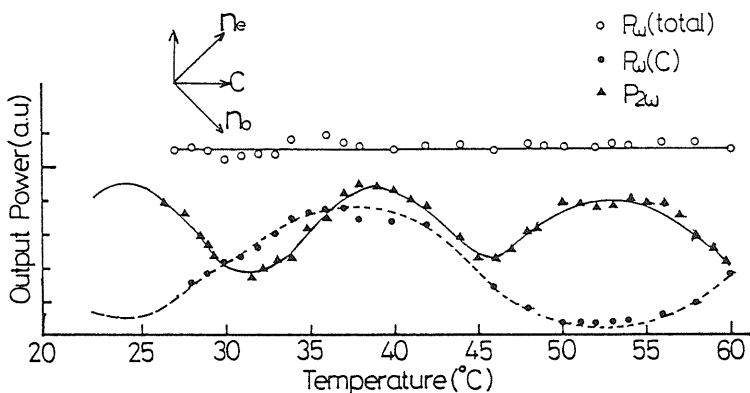


Fig. 8 KTP temperature vs. Output power P_{ω} (total), P_{ω} (c), $P_{2\omega}$.