レーザー解説

半導体レーザー励起・3原色固体レーザー

天野 壮*・横山精一*・藤野正志*・天野 覚*・望月孝晏*

(1990年7月9日 受理)

Diode Pumped RGB Visible Solid-State Lasers

Sho AMANO,* Seiichi YOKOYAMA,* Masashi FUJINO,* Satoru AMANO*
and Takayasu MOCHIZUKI*

(Received July 9, 1990)

We have developed green, blue, and red solid state lasers by diode laser pumping. A green laser outputs up to 22 mW at 531 nm with an NYAB crystal, and a blue one up to 7 mW at 473 nm with Nd:YAG/KNbO₃ crystals. These visible lasers are efficient, compact, and reliable compared with flashlamp-pumped lasers or gas lasers. Many applications with these lasers are presented.

Key Words: RGB, LD, NYAB, KTP, KNbO₃

1. はじめに

半導体レーザー（以下LDと記す）を励起源に用いた固体レーザーの研究は、高出力LDの実用化と共に近年とみに盛んになり、このレーザーへの期待の大きさがうかがわれる。このレーザーは従来のランプ励起固体レーザーに比べ、はるかに小型で長寿命、安定性に優れているため幅広い応用を可能にする。

その1つとして、LD励起による小型・高信頼性の固体グリーン及びブルーレーザーが挙げられる。産業界では高密度光メモリー、カラーディスプレイ、計測、医療等の応用から、このレーザーの要求が高まってきたが、従来の固体レーザーでは実現が困難であった。すなわち、ランプ励起固体レーザーではサイズ・信頼性の

点で問題が残る。一方、小型の固体レーザーとしてはLD自体もあるがその発振波長は0.6 μm の赤色LDが実用化レベルになったものの、これ以上の短波長はまだまだ時間がかかりそうである。

そこで我々は、LD励起によりグリーン・ブルー・レッドの3原色小型全固体レーザーを実現した。以下これについて現状を述べる。

2. グリーンレーザー

一般的なNd:YAGとKTPの組み合わせによるものと、“self-frequency-doubling crystal”と呼ばれるNYABについて紹介する。

2.1 1.06 μm Nd:YAGレーザーの第2高調波

*HOYA(株)オプトロニクス事業センター (〒196 東京都昭島市武蔵野3-3-1)

*HOYA Corporation, Center for Optonics Products (3-3-1 Musashino, Akishima, Tokyo 196)

Fig. 1 Schematic of a CW end-pump Nd:YAG laser.

Table I Specifications of HOYA diode pumped green lasers.

Model	L-321	L-322	L-323
Wavelength (μm)	0.53		
Output Power (mW)	2	5	10
Mode	TEM_{00}		Multiple
Beam Divergence (mrad)	<3		
Beam Diameter (mm)	<1		
Output Stability (%)	<3		
Pointing Stability (μrad)	<20		<50
Polarization Ratio	>100:1		
Operating Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	10~30		
Head Size (mm)	78×42×146		

Fig.1に示すLD端面励起固体レーザーでは、LD光をレーザーロッド端面から発振光モードと一致するように絞り込む事により、非常に高効率な TEM_{00} 基本モード発振を得る事ができる。我々はこの様な構成でNd:YAGの $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ 遷移1064 nmレーザーにおいて、発振しきい値2 mW, スロープ効率(LD光 $\rightarrow$ 1064 nm光)54%という高効率でビーム品質の良いレーザーが実現できる事を以前報告した¹⁾。このキャビティ内に波長変換素子KTPを挿入することにより第2高調波の532nmグリーンレーザーが得られる。このいわゆるイントラキャビティ方式ではキャビティ内で基本波の内部パワーが高く、構造が簡単であるという利点がある。一方、この方式ではモード競合が引き起こすノイズがグリーン光出力を不安定にし、これは“green problem”と呼ばれてしばしば問題となった。これを解決するためにエタロン挿入によるシン

グル縦モード化²⁾、或いは $\lambda/4$ 板挿入による偏光制御³⁾が提案され良い結果が得られている。

HOYAが開発した小型グリーンレーザー“L-320シリーズ”の諸性能はTable Iの通りであり、外観をFig. 2に示す。

2.2 NYABレーザー

上述した様に、一時的にはレーザー発振作用を持ったNd:YAGと波長変換作用をもったKTPの2つの素子の組み合わせでグリーンレーザーが構成されている。しかしながら、この2つの作用が1つの素子でなされるのであれば、装置はより小型・高信頼なものになるであろう。このような結晶としてNYAB($\text{Nd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$)が挙げられる。レーザー活性イオンとしてNdが入っており基本波は1062 nmで発振し⁴⁾、その誘導放出断面積は $10 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ と報告されている⁵⁾。角度位相整合条件をType I

Fig. 2 HOYA diode-pumped green laser head.

Fig. 3 Green output power at 531 nm vs. diode laser pump power.

にとると、有効非線形光学定数 d_{eff} はKDP結晶の約4倍である。このNYAB結晶（3 mm ϕ $\times$ 5 mmLで両端面平面研磨）をLD光 804 nmで端面励起し発振実験を行った。その時の入出力特性をFig. 3に示す。発振しきい値4.8 mW, 入

射LDパワー375 mWの時, 22.7 mWの最大出力が得られた。この時LD光からグリーン光への変換効率は約6%である。さらにこのグリーン光の偏光性は結晶 e 軸方向に800:1の偏光比をもつ直線偏光であった。共振器内にエタロンを挿入し単一縦モード化することにより, 出力ノイズは100 kHz~10 MHz帯域でバックグラウンドと同レベル（-70dB以下）に抑えられた。この時までエタロンの最適化をしてないため出力は4 mW程であった⁶⁾。我々はNYABのグリーンレーザーとしての実用性を示したが, 現在, 結晶長・Nd濃度・さらに集光光学系の最適化を図っている。

3. ブルーレーザー

ブルーレーザーについては, 次の3種類の発生方法について研究している。それぞれ一長一短があり, 応用によって使い分けられていくと思われる。

3.1 0.94 μm Nd:YAGレーザーの第2高調波

Nd:YAGの $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 遷移は3単位系であるが, LD励起により946 nmのCW発振が得られる⁷⁾。これを2.1で述べたのと同じ構成で, すなわちキャビティ内に波長変換素子としてKNbO₃を挿入する事により, 473 nmのブルーレーザーが得られる。我々はKNbO₃が非線形光学定数が大きく, 損失が少ない等の理由よりこれを選んだ。この結晶は946 nmで温度チューニングにより90度位相整合が可能であり, これでブルーレーザーを実現した例も報告されている⁸⁾。しかし, この時の位相整合温度は185℃と高く, かつその許容幅は0.3 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}$ と極めて狭いため⁹⁾, 装置化が非常に難しい。そこで我々は, Type I・角度位相整合のKNbO₃を用いてブルー光を得た。基本構成はFig. 1と同じで, 発振線946 nmが3単位レーザーであり自己吸収がある事を考慮し, Nd:YAGロッドの長さは1 mmとした。出力ミラーは946 nmで高反射であるのはもちろんであるが, 1064 nmの

Fig. 4 Blue output power at 473 nm vs. KNbO_3 crystal temperature.

Fig. 5 Blue output power at 473 nm vs. diode laser pump power.

発振が起こらないようこの波長で高透過になっている。 KNbO_3 結晶は長さ5 mm, 位相整合角度は30度に設計した。ただ, 角度位相整合でも KNbO_3 結晶の温度コントロールは必要で, 結晶温度と473 nm出力との関係をFig. 4に示すが, 今回実験に用いた結晶は30.5℃でピークを示した。結晶温度30.5℃でのLD光とブルー光の入出力特性をFig. 5に示す。入射LDパワー350 mWの時, 最大出力7.2 mWが得られた。この時変換効率は約2%。さらにブルー光は200:1の偏光比をもつ直線偏光であった¹⁰⁾。

このブルー発生方法の技術的問題点は KNbO_3 結晶にある。この結晶はどうしても温度コントロールが必要であり, 結晶均一性はもちろん研磨・コートに課題が残る。

3.2 Nd:YAGレーザーとLDの和周波

この方法ではNd:YAGレーザー1064 nmとLD光809 nm (Nd:YAG励起用と混合用に併用)をType II・90度位相整合のKTPで和周波混合し, 459 nmのブルーレーザーを発生させる。我々は長さ5 mm Nd:YAGと長さ3 mmのKTPを用い, 300 mWのLD入射パワーに対し32 μW の459 nm出力を得た。この実験ではキャビティロスが2.7%もあり出力が低かったが, 我々の計算によれば, キャビティロスを1%以下にし1 WLDを用いれば1 mW以上のブルー光が得られる事がわかっている¹¹⁾。3.1の方法に比べて, この方法での波長変換素子KTPは位相整合波長・角度・温度に対する許容幅が広く何のコントロールも不要であり使いやすい¹²⁾。また, 高速変調可能という長所もあるものの, 得られるブルー出力は信号光のLD光の特性を反映して, 横・縦モードともマルチであった¹³⁾。しかし将来, LDの開発が進み横・縦単一モードの高出力LDができれば, ビーム品質の良い実用的なブルーレーザーになるであろう。そういう意味でこの方式は, まだLDの性能向上待ちといった感がある。

3.3 LDの直接第2高調波

この方法はLD励起レーザーというわけではないが少しふれる。857 nmで KNbO_3 結晶は室温90度位相整合が取れる。そこでこの波長で発振する縦・横単一モードLD光を, 長さ5 mmのこの結晶に通すとその第2高調波である429 nmブルー光が得られた。我々の実験では, 結晶が不均一で又一回通過させたただけなのでLD光100 mWに対し, 429 nm出力は $\sim 5 \mu\text{W}$ しか得られなかった。しかし外部共振器を組みLD光を閉じ込める事により, LD光105 mWに対しなんと41 mWの縦・横単一モードのブルーレ

ザーを得たという報告もある¹⁴⁾。かなり高効率で優れた特性を示しているが、この方式は、出力が元のLD1個の出力で決まる、エネルギー蓄積できないのでピークパワーがとれない等の短所もある。さらに、やはりKNbO₃結晶を使っているため、この温度コントロールをしなければならぬが、その温度許容幅が0.1℃・cm以下と極めて狭いのが問題である⁹⁾。

4. レッドレーザー

4.1 1.34 μm Nd:YAGレーザーの第2高調波

Nd:YAGの⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2}遷移は1.3 μm帯で発振するが、これは基本波のままでも光通信の応用上興味深い。Fig.1の構成でミラーコートはこの波長域で高反射、1064 nmで高透過にする事により、1319 nm, 1339 nmの同時発振が見られた⁷⁾。このキャビティ内にType II・位相整合角度61度、結晶長2 mmのKTPを挿入したところ665 nmと669 nmのレッドレーザーが観測された。669 nmは1339 nmの2倍波であり、665 nmは1339 nmと1319 nmの和周波である。これはKTPの位相整合波長の許容幅が広いために起こったと考えられる。未だ最適化を行っていないため、出力的には低くLD入射パワー600 mWで約0.1 mWである。レッドレーザーの場合、グリーン・ブルーレーザーと違って既にLD自体で実用化されているが、この方式のレッドレーザーではピークパワーが高くとれる等の利点がある。

5. おわりに

以上、LD励起固体レーザーにおいて三原色を実現するために必要な波長変換技術を紹介した。HOYAではこの他、ハイピークパワーが得られるQスイッチレーザー¹⁵⁾、安定した単一縦モード発振を得るガラスリングレーザーGEM

(Glass End-pumped Monolithic ring laser)¹⁶⁾などの開発も行っている。さらに光通信等への応用として、Nd, Erイオンをコアにドーブしたガラスファイバレーザー¹⁷⁾、光導波型ガラスレーザー¹⁸⁾なども材料開発から行い、LD励起して良好な性能を得ている。LD励起により適した新たなレーザー材料開発とLD自体の性能向上、及び上述したようなレーザー技術の開発により、LD励起固体レーザーはさらに優れた特性を持つ事が可能となり、近い将来産業界で重要な地位を占めるようになるであろう。

参 考 文 献

- 1) 横山精一：レーザー協会会報 12 (1987) 6.
- 2) T.Bear: J. Opt. Soc. Am. B.3 (1986) 1175.
- 3) M. Oka et al.: Opt. Lett. 13 (1988) 805.
- 4) 天野壮他：レーザー研究 17 (1989) 895.
- 5) L.M.Dorozhkin et al.: Sov. Tech. Phys. Lett. 7 (1981) 555.
- 6) 天野壮他：電気学会研究会資料, OQD-90-14 (1990).
- 7) 小山英樹他：第36回応物学会予稿集 (1990, 春) p.855.
- 8) G.J.Dixon et al.: Opt. Lett. 13 (1988) 137.
- 9) K.Kato: IEEE J. Quantum Electron. QE-15 (1979) 6.
- 10) 藤野正志他：第51回応物学会講演予定 (1990, 秋).
- 11) 藤野正志他：第50回応物学会予稿集 (1989, 秋) p.807.
- 12) J.C.Baumert et al.: Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 2192.
- 13) W.P.Risk et al.: Appl. Phys. Lett. 54 (1989) 789.
- 14) W.J.Kozlovsky et al.: Appl. Phys. Lett. 56 (1990) 2291.
- 15) 天野壮他：光と電波の境界領域第130委員会, 第158回研究会資料 (1989) p.7.
- 16) E.C.Rea et al.: Technical Digest of CLEO, Baltimore, April (1989) p.222.
- 17) T.Yamashita et al.: Technical Digest of CLEO, Anaheim, April (1988) p.320.
- 18) 青木宏他：第37回応物学会予稿集 (1990, 春) p.913.