レーザーレター

半導体レーザー励起 NYAB グリーンレーザー

天野 壮*・横山精一*・小山英樹*
天野 覚*・望月孝晏*

(1989年11月22日 受理)

Diode Pumped NYAB Green Laser

Sho AMANO*, Seiichi YOKOYAMA*, Hideki KOYAMA*
Satoru AMANO* and Takayasu MOCHIZUKI*

(Received November 22, 1989)

A new diode-pumped green laser has been demonstrated. A NYAB ($\text{Nd}_{x-y_{1-x}}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$), self-frequency-doubling Laser crystal of type I, was pumped by a broad area laser diode. The threshold pumping power is 4.7 mW. We obtained cw green laser output up to 16 mW (0.531 μm) with a conversion efficiency of 4.4 %.

Key Word : NYAB, Self-frequency-doubling, LD, Green laser.

1. はじめに

近年、高密度光メモリー、カラーディスプレイ、計測等の多くの分野から、小型で・高信頼性のグリーンレーザーの要求が高まっている。そのため半導体レーザーの短波長化の研究が精力的に進められている。しかしながら、現在 InGaAlP 系 0.6 μm 帯赤色半導体レーザーが実用レベルに成りつつあるが、グリーン化にはまだまだ時間がかかりそうである。

一方、0.8 μm 帯で発振する GaAlAs 系半導体レーザーの研究は高出力化に移行している。そこで、これを固体レーザーの励起光源に用い、そのレーザー基本波を非線形光学結晶で波長変

換する事により、従来半導体レーザーでは達成困難であった発振波長領域をカバーする動きも活発に行われている。例えば、グリーンレーザーにおいても、半導体レーザー励起の Nd:YAG レーザーを非線形光学結晶(主には KTP 結晶)と組み合わせる事により達成されている。これは従来このグリーン領域で使われていた気体レーザー、或いはランプ励起方式の固体レーザーに比べ、はるかに小型・高効率・高信頼性の良好な性能を示している¹⁾。

しかしながら、レーザー発振作用と非線形光学効果が1つの素子でできるのならば、さらなる小型・高信頼性グリーンレーザーが可能になるであろう。この様な機能結晶は、

* 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 Optronics Products, (3-3-1 Musasino, Akishima Tokyo, 196)

“multi-function crystal” 或いは “self-frequency-doubling crystal” と呼ばれる。

この結晶に関する研究は意外に古く、1969年 Johnson と Ballman らが LiNbO_3 結晶に Tm^{3+} レーザーイオンをドーピングする事により、そのレーザー基本波である $1.85 \mu\text{m}$ とその2倍波 $0.93 \mu\text{m}$ を得たのに始まる²⁾。

最近の例としては、Byer らが Nd:MgO:LiNbO_3 を $0.60 \mu\text{m}$ の色素レーザーで励起し、Nd の基本波 $1.09 \mu\text{m}$ と 2 倍波 $0.55 \mu\text{m}$ の cw 発振を得た事を報告している³⁾。しかしながら、この結晶は位相整合をとるため結晶温度を 152°C に上げなければならず実用化には問題を残している。

一方 NYAB ($\text{Nd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$) は、1981年 Dorozhkin らによって初めて報告された結晶で、Nd の $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移 $1.32 \mu\text{m}$ とその2倍波 $0.66 \mu\text{m}$ の発振は確認したものの、 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ $1.06 \mu\text{m}$ の2倍波 $0.53 \mu\text{m}$ に関しては、Nd イオンの $0.53 \mu\text{m}$ での自己吸収が大きいため得られなかった⁶⁾。その後、中国の Baosheng らは Nd 濃度を最適化する事により1986年色素レーザー励起で NYAB で $1.06 \mu\text{m}$ 、 $0.53 \mu\text{m}$ のパルス発振に成功した⁵⁾。この NYAB 結晶は角度位相整合をとるため結晶の温度を上げる必要がなく実用的である。

そこで我々は今回、この NYAB 結晶を半導体レーザーの発振波長 $0.8 \mu\text{m}$ にて励起し、 $1.06 \mu\text{m}$ の2倍波 $0.53 \mu\text{m}$ の cw 発振実験を試みた。

2. NYAB 結晶の特性

この結晶の特性を Table I にまとめる⁵⁾。

この結晶は負の一軸性結晶で R32 群に属し、有効非線形光学定数 d_{eff} は Type I において

$$d_{\text{eff}}^I = d_{11} \cos \theta \cos 3 \phi \quad (1)$$

と表される。 d_{11} は 1.7 pm/V で位相整合角 θ は $32^\circ 54'$ から、 d_{eff}^I は 1.43 pm/V となり KDP 結晶の約4倍と大きい。

この結晶はフラックス法で育成され、Nd イ

Table I Properties of NYAB.

Chemical formula		$\text{Nd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$
Space group		R32
Nd ³⁺ concentration		$2.23 \times 10^{20} \text{ ions/cm}^3$ ($x = 0.04$)
Stimulated emission cross section of $1.062 \mu\text{m}$		$10 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Fluorescent Life time		$\sim 60 \mu \text{ sec}$
Refractive indices	$1.062 \mu\text{m}$	$n_o = 1.7553$ $n_e = 1.6869$
	$0.531 \mu\text{m}$	$n_o = 1.7808$ $n_e = 1.7075$
Phase matching angle		$32^\circ 54'$ (Type I)
dij Coefficient		$d_{11} = 1.7 \text{ pm/V}$
Effective SHG Coefficient		$d_{\text{eff}} = 1.43 \text{ pm/V}$ (Type I)
Walk off angle		$2^\circ 22'$
Absorption Coefficient		1.39 cm^{-1} ($0.531 \mu\text{m}$) 6.82 cm^{-1} ($0.804 \mu\text{m}$)
Density		3.75 g/cm^3

オン濃度を高くすることが可能であるが、濃度消光、励起光と $0.53 \mu\text{m}$ の吸収等に関係し、最適な Nd イオン濃度がある。一般に $\text{Nd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ において x は 0.04 から 0.08 とされているが、本実験には $x = 0.04$ のものを用いた。

この濃度における蛍光寿命は測定の結果 $\sim 60 \mu\text{s}$ であった。

NYAB の吸収スペクトルを Fig. 1 に示す。 $0.804 \mu\text{m}$ に吸収ピークがあり、Nd:YAG に比べブロードである事がわかる。これは半導体レーザーの波長チューニングが容易になるということであり、半導体レーザー励起に適していると言える。

Fig. 2 (a) に $0.804 \mu\text{m}$ 半導体レーザーで励起した時の蛍光スペクトルを示す。最大ピークは $1.062 \mu\text{m}$ にあり、これを含め合計8つのピークが見られる。これは Nd イオンの2重縮退している $^4F_{3/2}$ レベルから4重縮退している $^4I_{11/2}$ レベルへの8遷移をきれいに表しているが、それぞれのピーク位置・相対強度は Nd:YAG (b)

(a)

Fig. 1 Absorption Spectra of NYAB (a) and Fig. 1 (b) shows the Absorption Spectra of NYAB, Nd : YAG and Diode Laser emission at around 0.8 μm wave length range.

に比べ異なる。しかし、最大ピークのスペクトル幅（半値全幅）は0.6 nmでNd:YAGとほとんど同じであった。

(a)

(b)

Fig. 2 Fluorescence Spectra of NYAB (a) and Nd : YAG (b) excited by Diode Laser at 0.804 μm .

3. NYAB レーザー発振実験

このNYAB結晶を半導体レーザーで端面励起し発振実験を行った。Fig. 3にその実験配置を示す。用いた半導体レーザーは最大出力500 mWのブロードエリア型であり、その発振波長は0.804 μm に温度チューニングした。NYAB

Fig. 3 Schematic of the Diode pumped NYAB green laser experimental arrangement.

Fig. 4 Green light output power of NYAB laser as a function of the incident pumping power by Diode laser.

結晶は $3\text{ mm } \phi \times 5\text{ mm } L$ で両端面は平面研磨してある。半導体レーザー光入射側端面には $0.804\text{ }\mu\text{m}$ で HT (高透過率), レーザー基本波 $1.062\text{ }\mu\text{m}$ で HR (高反射率), 他方の面には $1.062\text{ }\mu\text{m}$, $0.531\text{ }\mu\text{m}$ で AR (無反射率) の直接コートをはどこした。出力ミラーは, 曲率半径 100 mm の $1.062\text{ }\mu\text{m}$ で HR, $0.531\text{ }\mu\text{m}$ で HT の外部ミラーを用いた。集光系は半導体レーザー光のコリメートレンズとフォーカシングレンズから成る。

本実験に用いた結晶は位相整合条件が Type I であるので, 異常光線 (e 軸) 方向に発生する 2 倍波を増加するには, 常光線 (o 軸) 方向の基本波を効率よく発生する必要がある。そのため励起半導体レーザー光の偏波面を o 軸方向に合わせている。

上述の実験配置でレーザー基本波 $1.062\text{ }\mu\text{m}$ とその 2 倍波 $0.531\text{ }\mu\text{m}$ の cw レーザー発振が観測された。半導体レーザー励起入力と $0.531\text{ }\mu\text{m}$ 出力の入出力特性を Fig. 4 に示す。発振しきい値 4.7 mW , 入射励起パワー 360 mW の時, 16 mW の最大出力が得られた。この時半導体レーザーからグリーン光への変換効率は約 4.4% で

ある。さらにこのグリーン光の偏光性は e 軸方向に $800:1$ の偏光比をもつ直線偏光であった。

Fig. 4 の実線は解析シミュレーションコードより計算した結果である。このコードは, 励起半導体レーザーの光線追跡により, 空間的励起率分布・フォトン分布を考慮したレート方程式を解きレーザー出力を求めるものである。以前『Nd: YAG+KTP』系グリーンレーザーの解析にも利用した¹⁾。今回このコードにより計算した結果は (各パラメータは Table I に示したものを使用), 実験結果と良く一致した。この事から我々の解析シミュレーションコードの有様性は明らかであり, これを用い今後さらなる最適化を図ることが可能である。

4. まとめ

我々は半導体レーザー励起による NYAB の cw グリーンレーザー発振を試み, 最大出力 16 mW を得た。Nd: YAG と非線形光学結晶である KTP (KTiOPO_4) を用いた系によるグリーンレーザーは, NYAB に比べ $\sigma \cdot \tau$ 積 (誘導放出断面積と蛍光寿命の積), d_{eff} (有効非線形光学定数) が大きいためレーザー性能的には優れている。しかし本実験結果から, NYAB でも十分実用レベルの性能が得られる事が判明した。さらに, NYAB は小型・高信頼性等デバイス化する上では非常に有利であると言える。

今後は結晶長, Nd 濃度, さらに集光光学系の最適化を図り, 高出力化を目指し, さらにより小型デバイス化への検討を進める。

参 考 文 献

- 1) 天野壮, 他: 光と電波の境界領域第130回委員会, 第158回研究会資料 (1989).
- 2) L.F. Johnson et al.: J. Appl. Phys. **40** (1969) 297.
- 3) T.Y. Fan et al.: J. Opt. Soc. Am. **3** (1986) 140.
- 4) L.M. Dorozhkin et al.: Sov. Tech. Phys. Lett. **7** (1981) 555.
- 5) Lu Baosheng et al.: Chines Phys. Lett. **3** (1988) 413.