

研究

単一縦モード半導体レーザーによる Nd : YVO₄ 結晶の 吸収スペクトルの測定

小西 泰司・尾松 孝茂・長谷川 朗・小倉 磐夫

千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1992年10月8日受付, 1993年1月26日受理)

Measurement of Absorption Spectrum of Nd : YVO₄ Crystal Using Single Longitudinal Laser Diode

Yasushi KONISHI, Takashige OMATSU, Akira HASEGAWA and Iwao OGURA

Department of Image Science, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

(Received October 8, 1992; Accepted January 26, 1993)

We measured absorption spectrum of Nd : YVO₄ crystal by scanning wavelength of single longitudinal mode laser diode. The wavelength is scanned by controlling the temperature of laser diode and the range of scanning is near the peak of absorption spectrum. In our method the detail of the absorption spectrum can be obtained because of using the light source with a spectrum width of 300 MHz at FWHM. We found that absorption spectrum has peak with the high absorption coefficient between 808 nm and 809 nm.

1. はじめに

半導体レーザー (LD) 励起固体レーザーはフラッシュランプ励起に比べて、高効率である、小型化が可能である、などの利点を持つ。特に、レーザー媒質として、Nd : YVO₄ は Nd : YAG に比べ LD 光の吸収効率が高く、超小型レーザーとして期待されている¹⁻⁴⁾。現在、固体レーザーの励起源として使用されているブロードエリア型 LD はスペクトル幅が広く、集光性が悪い、縦シングルモード LD の高出力化が実現されれば、さらに励起効率が向上できると考えられる。しかし、縦シングルモード LD は戻り光や温度変化によるモードホッピングや波長変化に大変弱い⁵⁾。縦シングルモード LD を固体レーザーの励起源として使用した場合、固体レーザーの吸収線のピークは鋭いため、LD の発振波長の安定性が固体レーザーの出力安定度を決定してしまう。したがって LD の波長制御を議論するには、Nd : YVO₄ の吸収ピーク付近での吸収係数を微細に知ることが不可欠となる。

これまで Nd : YVO₄ の吸収率測定は分光光度計で行われてきたが、固体レーザーとして用いられる Nd : YVO₄ の結晶サイズは極めて小さく、分光光度計による吸収率測定が困難である。また大きさの小さい試料を分光光度計を用いて吸収率を測定した場合、分解能は試料の大きさに依存する。例えば 3 mm 角の試料を分光光度計で吸収率測定を行った場合、実効的な分解能は数 nm となり、吸収係数の微細な構造を測定することができなかった。

本研究は、シングルモード LD のわずかな発振波長の変動が固体レーザーの出力安定性に及ぼす影響を調べることが目的とする。そのために、Nd : YVO₄ の吸収ピーク発振で発振するシングルモード LD の発振波長の温度依存性を利用して、809 nm 近傍で LD の波長掃引を行い、Nd : YVO₄ 結晶の吸収係数を測定した。

2. 実験

2.1 測定用光源

測定用光源としてはシャープ製 LD LTO 17 MD (最

大出力 50 mW, 発振波長 $\lambda=810$ nm) を使用した. この LD の発振モードを光スペクトラムアナライザ (FSR = 1500 GHz, フィネス約 150) で観測した. 発振スペクトルを **Fig. 1** に示す. シングルモード発振していることがこの図からわかる. 使用する LD のスペクトル広がり, 測定結果の周波数分解能を決定するため, さらに正確なスペクトル幅を知る必要がある.

われわれはマイケルソンの干渉計を用いて LD の時間的コヒーレンスを測定し, そのコヒーレンス関数から周波数広がり, を換算した. **Fig. 2** にコヒーレンス関数の測定結果を示す. スペクトル広がり, をローレンツ型関数で仮定すれば, コヒーレンス関数は指数的な減衰関数で与えられる. コヒーレンス関数を指数関数で fitting して, 関数の減衰時間から換算すると, スペクトル幅は 300 MHz (FWHM) となった. LD の波長掃引による吸収係数の分光測定は, 従来の分光光度計で得られる結果よりはるかに微細なスペクトル構造の情報を得ることが可能であると考えられる.

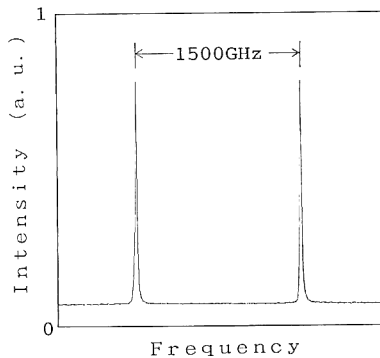


Fig. 1 Longitudinal mode of laser diode (LTO 17MD). Free spectrum range is 1500 GHz and finesse is about 150.

2.2 LD の発振波長の温度特性

使用する LD の発振波長の温度特性を測定した. APC (自動出力制御), ATC (自動温度制御) 駆動による波長制御がなされた LD のケース温度を 11~40 °C まで 0.5 °C ピッチで徐々に温度を上げ, そのときの LD の発振波長を絶対値の測定が可能な波長計 (アドバンテクト製 TQ 8325) で測定した. モードホッピングが起るために, 一台の LD では連続的な波長掃引はできない. そこで, モードホッピング波長の異なる二台の LD を並用し, 809 nm 近傍において連続的な波長掃引を可能にした. 使用した二台の LD の発振波長温度依存性を **Fig. 3** に示す. この結果から 808~810 nm の波長域で連続掃引できることがわかる. なお, ATC の安定度は ± 0.05 °C 以下である.

2.3 LD 発振波長掃引による Nd: YVO₄ 結晶の吸収率測定

使用した測定サンプルは a-cut, Nd 添加量 1.0 at.% で大きさが 3×3×1 mm の Nd: YVO₄ 結晶である. 測定光学系を **Fig. 4** に示す. LD の発振波長をモニター

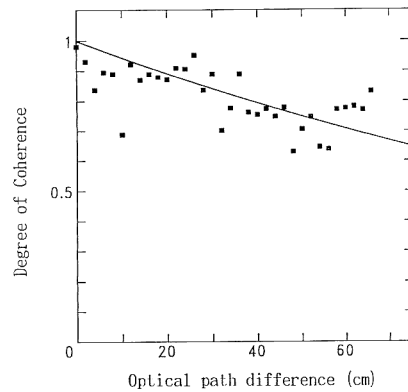


Fig. 2 Temporal coherence function of laser diode beam.

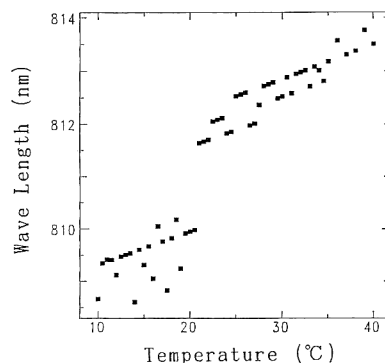
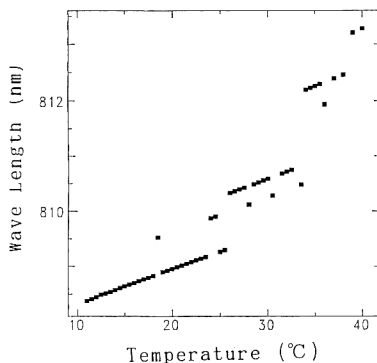


Fig. 3 Wavelength of laser diode vs. temperature of laser case.

しながら, LD 光を Nd:YVO₄ 結晶に入射し, 結晶からの透過光を計測する. 吸収のピークは 809 nm に存在するといわれているため 808~809 nm にかけては LD の温度掃引を 0.1°C ピッチすなわち周波数間隔 3 GHz (波長間隔 0.007 nm) で計測を行った. Nd:YVO₄ 結晶は, C 軸方向の偏光に対して吸収率が大きい. そこで, LD 光は結晶中で異常光線となるように入射した.

Nd:YVO₄ 結晶の吸収率の測定結果を Fig. 5 に示す. この測定結果をもとに Nd:YVO₄ 結晶の吸収係数を算出した.

LD 光が結晶に入射するとき, また結晶から光が射出する時, 反射が生じる. 入射光強度を I_{in} , 射出光強度を I_{out} , 入射面側の反射率を R_1 , 射出面側の反射率を R_2 , 吸収係数を α , 結晶の長さを L とすると以下の式が成り立つ.

$$I_{out} = (1 - R_1)(1 - R_2) \exp(-\alpha L) I_{in} \quad (1)$$

使用したサンプルには, 入射面側に反射率が 2% 以下になるように AR コートが施されている. Nd:YVO₄

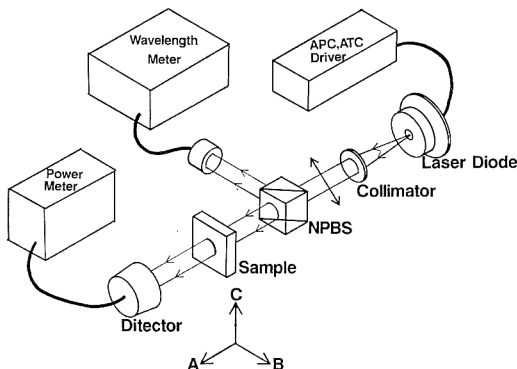


Fig. 4 Experimental arrangement for measuring absorption spectrum of Nd:YVO₄.

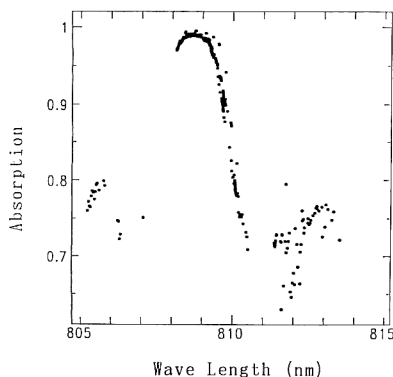


Fig. 5 Characteristic curve of absorption of Nd:YVO₄ crystal vs wavelength.

結晶の 809 nm 領域の異常光線の屈折率は 2.16 である⁶⁾. この数値をもとにしてフレネルの式を用いて計算すると $R=13.5\%$ となる. そこで Nd:YVO₄ 結晶の反射率を $R_1=2\%$, $R_2=13.5\%$ として (1) 式を変形すると次式となる.

$$\alpha = -\frac{1}{L} \ln \left\{ \frac{I_{out}}{I_{in}} \times 1.179 \right\} \quad (2)$$

この式を用いて Nd:YVO₄ 結晶の吸収係数を算出した. この結果を Fig. 6 に示す. この結果によれば 808.2~809.2 nm にかけて吸収係数が大変高く吸収係数は 40 cm^{-1} を越えることがわかる. また, ピークは 808.7 nm に存在する. そして, 809.2~810 nm の領域では吸収係数が急激に減少していく. 吸収係数のピークより長波長側での半値半幅は 1.1 nm である. これらの数値は従来報告されている数値に比べ, ピーク値は約 20% 高く YAG の吸収係数の約 7 倍程度である⁷⁾. また, 吸収線幅は, 1/2 程度の狭い値であった.

従来の測定系 (分光光度計) において, 1 mm 当りのグレーティング本数を N , 試料の大きさを R , 分光光度計の射出側のレンズの F ナンバーを F , 射出側のスリット幅を W とすると実効的な分解能 $\Delta\lambda$ は,

$$\Delta\lambda = \frac{W}{NRF} \quad (3)$$

で与えられることが知られている. 3 mm の試料を $F=10$, $N=1200$ 本の分光光度計でスリット幅 $10 \mu\text{m}$ (エアリーディスクの大きさ) で分光特性を測定したとすると分解能は約 0.3 nm (レーリー回折限界) となるが, 実際には光源の強度やディテクターの感度が有限であるため, 実際に分光特性を測定するためにはスリット幅を大きくする必要がある. 仮にスリット幅 $30 \mu\text{m}$ で吸収係数を測定した場合, 分解能は約 1 nm となる. そのた

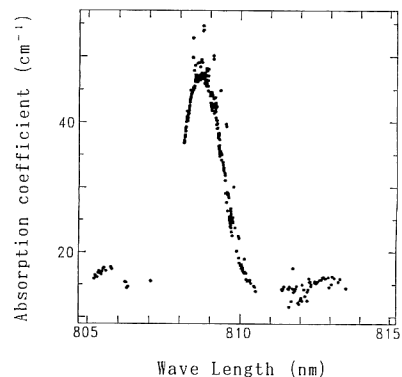


Fig. 6 Characteristic curve of absorption coefficient of Nd:YVO₄ crystal vs wavelength.

め分光光度計で吸収係数を測定した場合、数 nm のスペクトル線幅内の平均値を測定していると考えられる。それに対して当研究室で考案した分光計測方法は、測定光源の線幅が狭いため、従来報告されている数値よりピークが高く、また狭い線幅が得られたと考えられる。

YAG に比べて、吸収スペクトル幅が広い YVO₄ においても、ブロードエリア型の LD の発振線幅 ($\Delta\lambda=3\sim 5$ nm) より、吸収スペクトル幅は狭く、励起効率向上には、Nd ドープ量を増やすか、あるいは、シングルモード LD の使用が不可欠であると考えられる。

3. 考 察

励起に用いる LD の強度 $I_{LD}(\lambda)$ 、Nd: YVO₄ の発振しきい値 $I_{th}(\lambda)$ とすると、Nd: YVO₄ レーザーの発振強度 $I_{YVO_4}(\lambda)$ は

$$I_{YVO_4}(\lambda) = \eta(\lambda)(I_{LD}(\lambda) - I_{th}(\lambda)) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 λ は励起用 LD の波長、 $\eta(\lambda)$ はスロープ効率である。 $\eta(\lambda)$ は Nd: YVO₄ の吸収率と線形的な関係をもつので、 $I_{LD}(\lambda)$ が $I_{th}(\lambda)$ に比べて十分大きい時には、 $\eta(\lambda)$ の波長依存性、すなわち、Nd: YVO₄ の吸収率の LD 波長依存性が、YVO₄ レーザーの出力を決定する。LD 波長変化による YVO₄ レーザー出力低下を 10% まで許容したとすると、励起用 LD の発振波長が 807.8~809.8 nm の間にあればよいことになる。シングルモード LD が温度による波長変動は 0.07 nm/°C であるから、LD 波長を吸収のピーク (808.7 nm) に設定すれば、温度は ± 6 °C の範囲で出力変動は $\pm 10\%$ 以下に抑制できる。

4. む す び

われわれは LD の発振波長-温度特性を利用し、従来の分光光度計よりも高波長分解能を持つ吸収分光法により、Nd: YVO₄ 結晶の吸収のピークがある 809 nm 近傍の吸収係数の測定を行った。この方法は、レンズによ

りサンプルに入射されるビームの大きさを自由に変わることができると小さいサンプルでも測定が可能である。

Nd: YVO₄ 結晶の吸収係数は従来の測定値に比べて、約 20% 高く、吸収スペクトルの半値幅も従来言われていた幅の約 1/2 であることがわかった。これは測定光源の線幅が極めて狭いことに起因していると考えられる。さらに、808.2~809.2 nm にかけてブロードなピークが存在する。このピーク波長に LD 波長を設定すれば、固体レーザーの出力安定性は向上するものと考えられる。

最後に、この研究を行うにあたって Nd: YVO₄ 結晶を提供していただいた Dr. Ring Jiwu 氏に感謝いたします。

文 献

- 1) R. A. Fields, M. Birnbaum and C. L. Fincher: "Highly efficient diode-pumped Nd crystal laser," Technical Digest, CLEO '87 FL 4 (1987).
- 2) R. A. Fields, M. Birnbaum and C. L. Fincher: "Highly efficient Nd: YVO₄ diode-laser end-pumping laser," Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 1885-1886.
- 3) T. Sasaki, T. Kojima, A. Yokotani, O. Oguri and S. Nakai: "Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd: YVO₄ microchip lasers," Opt. Lett., **16** (1991) 1665-1667.
- 4) 永本浩一, 中塚正大, 内藤健太, 中山正宣, 吉田国雄, 佐々木孝友, 金辺 忠, 中井貞雄, 齋藤誠一, 桑野泰彦: "LD 励起 Nd: YVO₄ レーザー", レーザー研究, **18** (1990) 639-645.
- 5) R. Lang and K. Kobayashi: "External optical feedback effect on semiconductor injection laser diode," IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 347-355.
- 6) T. Taira, A. Mukai, Y. Nozawa and T. Kobayashi: "Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd: YVO₄ microchip lasers," Opt. Lett., **16** (1991) 1955-1957.
- 7) 小島哲夫, 佐々木孝友, 中井貞雄, 桑野泰彦: "LD 励起マイクロチップ固体レーザー", レーザー研究, **18** (1990) 646-651.