

研究

LD 励起 Nd: YVO₄ レーザーの第二高調波による ホログラムの製作

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7月1日受付, 1992年12月24日受理)

Recording of Hologram Using Second Harmonics of LD Pumped Nd: YVO₄ Laser

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 July 1, 1992; Accepted December 24, 1992)

The Fresnel hologram was recorded and recontracted using the second harmonic beam of LD pumped Nd: YVO₄ laser as a light source. The holographic contour map was observed in the recontracted image. We found this map caused by the longitudinal multimode oscillation of Nd: YVO₄ laser.

1. はじめに

半導体レーザーで Nd: YAG あるいは Nd: YVO₄ などの結晶を励起し波長 1064nm のレーザー光を発振させるいわゆる LD 励起固体レーザー^{1,2)}は, 1. 装置の小型化が容易である, 2. 入出力変換効率が高く高出力光が比較的容易に得られる, 等の特徴をもつ。

LD 励起固体レーザーと KTP (KTiOPO₄)³⁾などの非線形光学結晶 (以下 SHG 結晶と呼ぶ) を組み合わせて第二高調波を発生させると小型かつ固体の可視域レーザーが実現でき, この小型可視域レーザーは, CD を代表とする光ディスクの高密度記録用光源などに応用することが期待されている。

また発振波長の 532 nm は, 人間の比視感度のピークにとっても近いため理想のホログラム用の光源となると考えられる。しかしこの光源を用いてホログラムを製作した報告はない。

そこでわれわれは, この小型可視域レーザーを用いてホログラムを製作し, この小型可視域レーザーをホログラム用光源として使用したとき再生像に生じる等高線状の縞について実験的に解析した。

2. LD 励起固体レーザーの intra-cavity SHG

2.1 装置構成

レーザー発振器の構成^{1,2)}の概略を Fig. 1 に示す。固体レーザー励起用半導体レーザー (LD) にはスペクトラダイオードラボ (spectra diode labs) のブロードエリア型 SDL2422 を用いた。レーザー媒質には Nd: YVO₄⁴⁾ (Nd 濃度 1 at. %, カット方向 a-cut) を用いた。この媒質の厚さは 1 mm で両端面であり, LD 入射端面は固体レーザーの発振波長 1064 nm に対して高反射コーティング, LD の発振波長 810 nm に対して無反射 (AR) コーティングを施し, 他面には波長 1064 nm に対して AR コーティングを施した。また出力鏡の曲率は R=30 mm とし, Fig. 1 のように固体レーザーの共振器内 (共振器長 15.7 mm) に厚さ 5 mm の KTP 結晶を入れてタイプ II の位相整合により第二高調波 (532 nm) を発生させるようになっている。

このレーザー発振器において, LD の出力が 220 mW のとき約 12 mW の SH 出力が得られた。

2.2 SH 光のビームプロフィール

レーザー共振器より約 1m 離れたところで日本科学エンジニアリング製モードキャンアナライザー (SS-20 D) により SH 光のビーム強度のプロフィールを計測したところ Fig. 2 に示すように X 方向および Y 方向とも 0 次のガウシアンモードになっており TEM₀₀ モードであると考えられる。

2.3 レーザーのパワーの安定度

このレーザーのパワー時間特性を Fig. 3 に示す。Fig. 3 よりパワーが急激に落ちるところがあることがわかる。半導体レーザーの出力光が 100%, Nd:YVO₄ 結晶に入射せず結晶端面で数 % 反射して半導体レーザーに戻る。この戻り光が半導体レーザーの共振器内に注入されモードホッピングをひきおこし半導体レーザーの発振波長を変化させる。Nd:YVO₄ の吸収バンドのピークに位置していた半導体レーザーの発振波長が吸収バンド

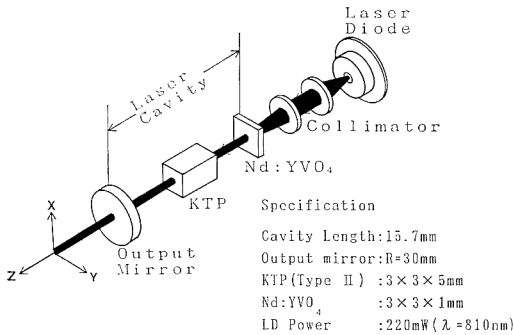


Fig. 1 The setup for the intra cavity second harmonic generation of LD pumped Nd:YVO₄ laser.

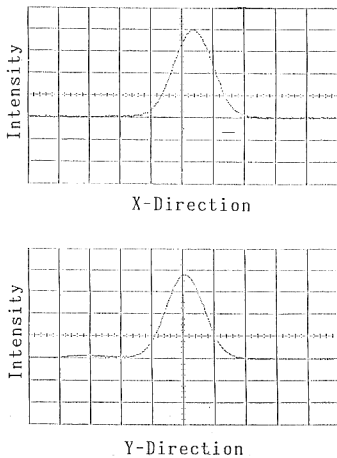


Fig. 2 Beam profile of second harmonic wave of LD pumped Nd:YVO₄ laser. The second harmonic wave oscillates in TEM₀₀ mode.

のピークから外れるため吸収効率が低下し、Nd:YVO₄ 共振器内のゲインが低下する。その結果レーザー出力の急激な変動が起こると考えられる。しかしこの現象は 10 分程度では起らないためホログラムの撮影には影響はないと考えられる。

3. ホログラム光学系

ホログラムの撮影にあたって最も一般的なフレネル型ホログラム光学系を用いた。今回使用した光学系の配置図を Fig. 4 に示す。

ハーフミラーにより二方向にレーザー光を分け一方は物体光としてスペイシャルフィルターを通して物体に当たりその散乱光がホログラム乾板を露光し、もう一方は参照光としてスペイシャルフィルターを通り直接ホログラム乾板を露光する。物体光と参照光の光量比は参照光側のハーフミラーとスペイシャルフィルターとの間に連続可変 ND フィルターを置き、この ND フィルターによりホログラムのコントラストが一番良くなるように光量を調節した。そしてホログラム記録用乾板にアグファホロテスト 8E 56 を使用し、現像は D-19 5分、定着はフジフィックス 10分とした。

またホログラム再生系は、ホログラムを撮影時に使っ

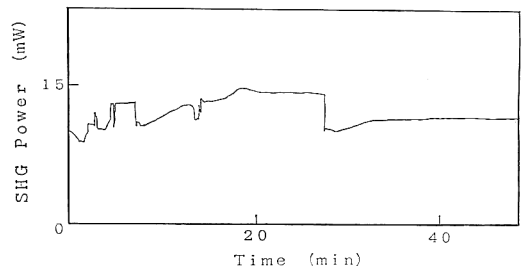


Fig. 3 Temporal fluctuation of laser power.

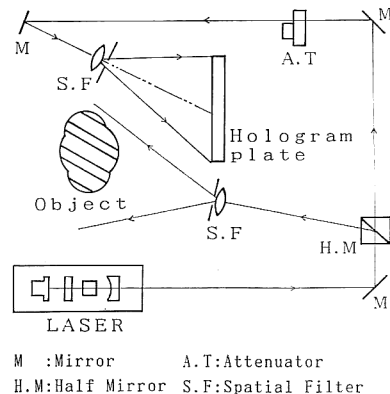


Fig. 4 The experimental setup for recording of Fresnel hologram.

た光学系を使用し、撮影の時に乾板を置いた位置に現像処理をした乾板を戻し、物体照明光を遮光し参照光を光源として使用し、撮影時に物体を置いた位置に再生像が見えるような位置で観察することにした。

4. 結 果

ホログラムの再生像の写真撮影したものを Fig. 5 に示す。Fig. 5 において人形の形状に合わせて等高線状の縞が観察される。ルビーレーザーを用いてホログラムを撮影したときルビーレーザーの二波長発振が原因となって等高線縞が生じる。これと同様に Nd:YVO₄ レーザーも多モード発振を起こしていることが原因ではないかと推測される⁵⁾。

そこでまずマイケルソン干渉計により時間的コヒーレンスの測定を行った。マイケルソン干渉計でできた干渉縞を写真撮影し干渉縞を写したネガをマイクロデンシトメーターにかけ干渉縞の濃度を測定する。あらかじめ測定しておいたレーザーパワーフィルム濃度特性曲線を用いて干渉縞の濃度をレーザーパワーに変換しコヒーレンス度 $|\gamma|$ を

$$|\gamma| = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times \frac{I_1 + I_2}{2(I_1 \cdot I_2)^{0.5}} \quad (1)$$

により算出した。ここで I_1, I_2 はハーフミラーで分けられた光線の強度で今回は $I_1 = I_2$ であった。二つの光路差を変化させて、光路差に対するコヒーレンス度 $|\gamma|$ の変化を求めた結果が Fig. 6 である。なお干渉縞の測定間隔は、このレーザーの共振器長が 15.7 mm ということを考慮して 4 mm ピッチとした。この図より約 20 mm 程度の間隔で可視度が落ちていることがわかる。

使用したレーザーの共振器長は 15.7 mm であるが共振器内に長さ 5 mm の KTP³⁾ (屈折率 1.76) が入って

いるため実効的な共振器長は 19.5 mm となる。コヒーレンス度 $|\gamma|$ はだいたい共振器長の間隔で低下しているのでレーザーはマルチモード発振していると考えられる。

次にマルチモード発振が等高線状の縞の原因かを調べるために白色の立体を被写体として、光スペクトラムアナライザー (F.S.R=500 GHz, フィネス約 100) を用いて Nd:YVO₄ レーザーの SH 光である 532 nm の光の縦モードを観測しながらホログラムの撮影をすることにした。その実験配置図を Fig. 7 に、またその再生像を写真撮影したものを Fig. 8 に示す。Fig. 8 を見ると、明暗の縞が等間隔で奥行方向にできていることがわかる。この明暗の縞を観察し、奥行方向に対する明暗の縞の間隔を測定すると約 7 mm のピッチの等間隔であることがわかった。また、縞のコントラストは、一本置き (14 mm 周期) で高くなることがわかった。

ホログラム再生像の明暗の縞はいわゆるビートノイズであるからこの縞間隔からビートノイズに寄与する波長を算出することができるはずである。ホログラム再生像の奥行に対する明暗の縞間隔を Δd , ビートノイズに寄与する波長の波長差を $\Delta \lambda$ とすると、

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta d \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi} \quad (2)$$

という関係をもつ。ここで θ は参照光の入射角で、 ϕ は被写体の傾き角である (Fig. 7 参照)。

(2)式を周波数差に換算すると

$$\Delta \nu = \frac{C}{\Delta d \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi} \quad (3)$$

ここで $\Delta \nu$ は発振モードの周波数差で、 C は光速である。

今回の光学系では θ は 54° で ϕ は 38° であった。レーザー光の主発振波長は $\lambda = 532$ nm でホログラムの再生像の奥行に対する明暗の縞のピッチが $\Delta d_1 = 7$ mm であ

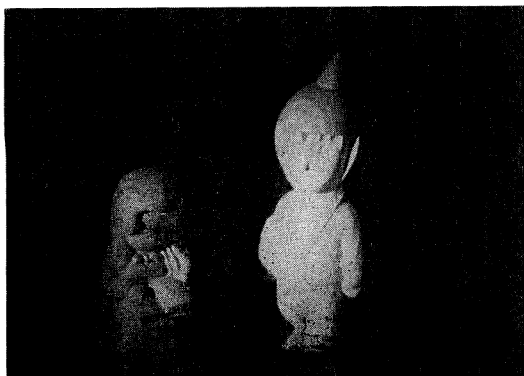


Fig. 5 The reconstructed image of Fresnel hologram. The holographic contour map is observed in it.

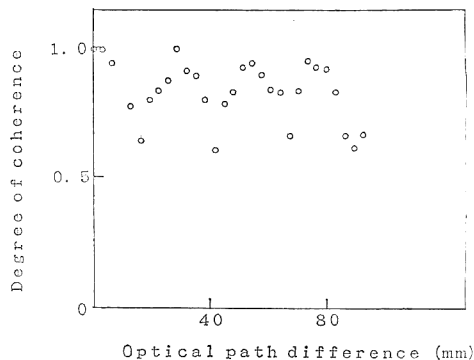


Fig. 6 Measurement result of the temporal coherence. The minimum points of degree of coherence appear at every cavity length.

るから、これらの数値を(3)式に代入すると $\Delta\nu_1=101$ GHz となる. また、コントラストの高い縞ピッチ $\Delta d_2=14$ mm を代入すると、 $\Delta\nu_2=50$ GHz が得られる.

光スペクトラムアナライザ (F. S. R.=500 GHz, フィネス約 100) による Nd:YVO₄ レーザーの SH 光である 532nm の光の縦モード観測の結果、このレーザーは、シングルモード発振動作と 3 モード発振動作の間を時間的に推移することがわかった. 発振モードを Fig. 9 に示す. 3 モード発振時、基本波は 2 モード発振しており、両端のモード (A, C) はそれぞれ基本波の第二高調波、中央のモード (B) は基本波 2 モードの和周波である. また、白色の立体を撮影しているとき、このレーザーは 3 モード発振していたものと考えられる.

モード間の周波数間隔は 50 GHz であるので、両端 (A, C) のモード間の周波数差は 100 GHz となり、ホログラム再生像の明暗の縞間隔から求めた数値と良く一致する. また、A, B の両モードはピークが高く隣接して

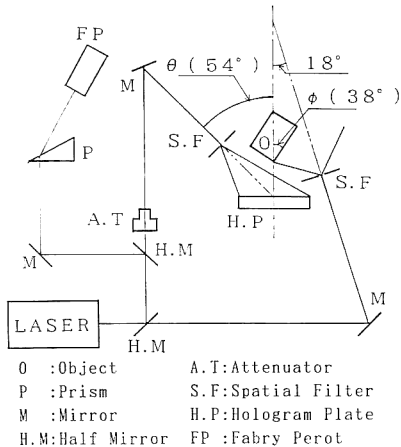


Fig. 7 The experimental setup for recording of Fresnel hologram of a white cube.

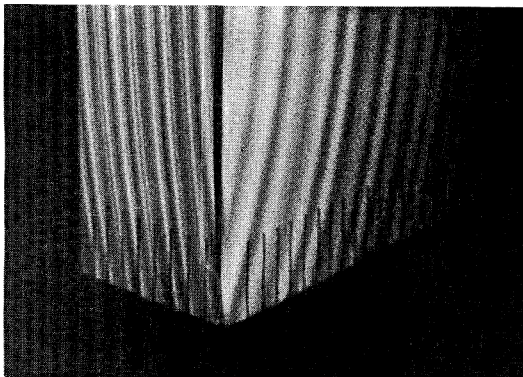


Fig. 8 The contour map in recontracted image of white cube.

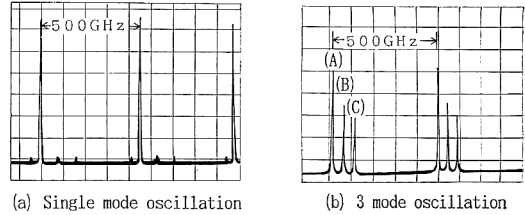


Fig. 9 Longitudinal mode of second harmonic wave of Nd:YVO₄ laser at the single mode oscillation (a) and the three mode oscillation (b). Free spectral range and finesse are 500 GHz and about 100 respectively.

いることから、A, B モードのビートがホログラム再生像中で長周期 (14mm) でかつ、コントラストの高い縞となって現れていると考えられる.

以上のことから Nd:YVO₄ レーザーの SH 光の 3 モード発振がホログラム再生像に現れた周期的な縞の原因と結論づけられる.

多モード発振の原因として、共振器内の KTP の複屈折が考えられる. KTP の複屈折によって、基本波の常光線と異常光線間の位相が遅れが生じて、本来、直線偏光で発振していたレーザー光の偏光面に対して、直交した偏光モードが発振してしまう. このため、基本波が 2 モード発振する. KTP の屈折率は温度依存性が大きく、共振器内のレーザー出力によって複屈折性が変化するので、完全なシングルモード発振を得るには、KTP の温度コントロールが不可欠であると考えられる.

5. 結 論

LD 励起 Nd:YVO₄ レーザーの第二高調波を光源として、フレネル型ホログラムを製作し、再生することに成功した. 現段階では種々の原因によりまだ縦モードをシングルモード化できていないが、このレーザーの発振波長は人間の比視感度のピークに近く、低いパワーでも人間の目に見やすいので、縦モードをシングルモード化できれば理想的なホログラム用光源となると思われる.

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) 小島哲夫, 佐々木孝友, 中井貞夫, 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) 94-99.
- 3) 岸本俊樹, 伊東雅宏: "強誘電体 KTiOPO₄ の物性と光学非線形性", 固体物理, **25** (1990) 597-608.
- 4) 桑野泰彦, 斎藤誠一: "LD 励起固体レーザー用 Nd: YVO₄ 結晶", レーザー研究, **18** (1990) 64-69.
- 5) L. O. Heflinger and R. F. Wuerker: "Horographic

contouring via malutifrequency lasers," Appl. Phys. Lett., 15 (1969) 28-30.

Appendix

ホログラム上に生じている等高線上の明暗の縞は、波長が $\Delta\lambda$ だけ異なる二つの波長の光がホログラム乾板上に同時に情報を記録することが原因である⁵⁾。ホログラムの記録は、ホログラム記録用の乾板に一種のグレーティングを記録することと同じであるから、ホログラム上に生じている等高線上の明暗の縞は、波長が $\Delta\lambda$ だけ異なる二つの波長の光によりホログラム乾板上にできた二つのグレーティングが原因であると考えられる。そこで以下に示すモデルでホログラム上に生じている明暗の縞に寄与している波長を算出した。

Fig. 10 のように記録面の法線方向で入射する光線と記録面の法線に対して 2θ の角度で入射する光線とでグレーティングを作るとき、光線の波長を λ とすると記録されるグレーティングの間隔 d は

$$d = \frac{\lambda}{\sin 2\theta} \quad (4)$$

となり、(4)式を λ で微分すると

$$\Delta d = \frac{\Delta\lambda}{\sin 2\theta} \quad (5)$$

となる。

$d, d + \Delta d$ の二つのピッチを持つグレーティングに波長 λ の光をグレーティング面の法線に対して書き込み時と同じ角度 2θ で入射した場合を考える。このとき $d + \Delta d$ のグレーティングで回折された波長 λ の光は、書き込み時と回折角が $\Delta\theta$ だけ異なり、次式ようになる。

$$(d + \Delta d) \cdot \sin 2\theta - (d + \Delta d) \cdot \sin \Delta\theta = \lambda \quad (6)$$

これを整理すると

$$\Delta\theta = \frac{\Delta d}{d} \sin 2\theta \quad (7)$$

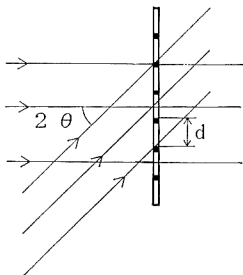


Fig. 10 The recording of grating. The angle of 2θ is one between direction of incident light and normal direction of grating, d is pitch of grating.

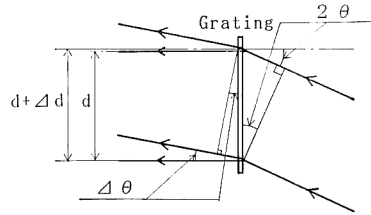


Fig. 11 The diffraction by holographic double grating. The angle of 2θ is one between direction of incident light and normal direction of grating. The pitches of double grating are d and $d + \Delta d$.

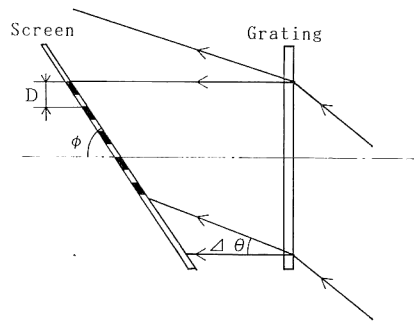


Fig. 12 The diffracted image by holographic double grating. The angle $\Delta\theta$ is difference between the angles of two beams diffracted by double grating. Two diffracted beams make fringes on screen. The period of fringes is D .

となる (Fig. 11 参照)。

ホログラム乾板上には間隔 d のグレーティングによる回折光と間隔 $d + \Delta d$ のグレーティングによる回折光が同時に存在しているのでホログラム再生像は $\Delta\theta$ の角度を持った二つの波面で形成される。

このときホログラム再生像の位置にスクリーンを置いてやると二つの波面による干渉縞が観察される。グレーティング面の法線に対するスクリーンの傾き角を ϕ 、スクリーン上で現れる干渉縞の間隔を D とすると (Fig. 12 参照)

$$D = \frac{\lambda}{\Delta\theta \sin \phi} \quad (8)$$

となり(8)式に(4), (5), (7)式を代入し

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{D \cdot \sin 2\theta \cdot \sin \phi} \quad (9)$$

を得る。これが波長差 $\Delta\lambda$ の二つの光線でホログラムを撮影したときのホログラム上の奥行方向の明暗の縞の間隔との関係式となる。