

# フォトリフラクティブ位相共役鏡を用いた 高ビーム品質固体レーザー

鄭 和 翊\*・松岡 史哲\*\*・出来 恭一\*\*・有澤 孝\*\*

## High Beam Quality Solid-State Laser with Photorefractive Phase Conjugate Mirror

Kazuyoku TEI\*, Fumiaki MATSUOKA\*\*, Kyouichi DEKI\*\* and Takashi ARISAWA\*\*

A LD-pumped zigzag slab Nd:YAG oscillator-amplifier system is described in this article. The system employs a photorefractive nonlinear device as the phase conjugate mirror. The photorefractive phase conjugator is optimized in the point view of high-energy pulse capacity, fidelity of phase conjugation and stability. The laser system generates the IR laser pulses of 600 mJ and the second harmonic pulses of 250 mJ at the repetition rate of 100 Hz. The second harmonic output has a nearly diffraction limited beam quality.

**Key words:** photorefractive effect, phase conjugate mirror, solid state laser, LD pumped, second harmonic generation

回折限界ビーム品質を有する Nd:YAG 等の固体レーザーはチタンサファイアレーザーなどの励起用途やレーザー加工などにおいて強力なツールとなる。しかし、レーザー出力が大きくなるにつれて、レーザー結晶の熱効果によって収差が生じ、ビーム品質は劣化してしまう。位相共役鏡を用いることでレーザー媒質の収差は補正することができる。位相共役鏡による固体レーザーの波面補正にはフォトリフラクティブ (PR) 効果、誘導ブリュアン散乱 (stimulated Brillouin scattering: SBS), 飽和利得を用いる方法<sup>1,2)</sup> 等がある。筆者らはこれまでフォトリフラクティブ効果を用いた方法に関して研究を行ってきた。

BaTiO<sub>3</sub> 結晶は PR 結晶の中でも電気光学定数が最も大きいことで知られているが、Rh イオンをドープすることで近赤外での感度が向上することが発見されて以来、Nd:YAG レーザーの共振波長での Rh:BaTiO<sub>3</sub> を用いた研究が行われるようになった<sup>3)</sup>。PR 結晶を用いた位相共役鏡のよく用いられる方式としては、内部ループ方式 (もしくは CAT 型)<sup>4)</sup> と外部ループ (もしくはリング型)<sup>5)</sup> の 2 種類がある。Rh:BaTiO<sub>3</sub> 結晶による内部ループ方式の位相共役鏡を用いた master oscillator power amplifier (MOPA) システムの研究は Brignon らによって行われた<sup>6-8)</sup>。外部

ループ方式の位相共役鏡を用いた MOPA システムの研究は筆者ら<sup>9-11)</sup> によって初めて行われた。外部ループ方式は応答時間と高エネルギーパルスへの耐性などの観点から内部ループ方式に対して有利である。PR 位相共役鏡を用いた MOPA システムの報告は上記以外に Roosen らのグループ<sup>12)</sup> によって行われているが、Roosen および Brignon らの実験はパルスエネルギーおよび平均出力ともに低く、PR 位相共役鏡の有効性を確信させるものではなかった。筆者らの試みは PR 位相共役鏡の高出力レーザーへの初めての試みといえる。

### 1. 自己励起位相共役鏡

PR 位相共役鏡の高い位相補正能力を引き出し、高エネルギー MOPA システムに適用するためには、以下のような条件を満足する必要がある。第 1 に、レーザー増幅器などによって品質の劣化したビームに対しても高い反射効率と高い忠実度を維持すること。第 2 に、PR 効果特有の不安定要因を排除すること。

図 1 にレーザーシステムに適用可能な実用的な位相共役鏡の構成を示す<sup>11)</sup>。結晶には 45° カットの Rh:BaTiO<sub>3</sub> (Deltronic Crystal Industries, Inc.) を用いている。外部

\*東海大学理学部物理学科 (〒259-1292 平塚市北金目 1117) (現所属:三木プーリー(株) 〒211-8577 川崎市中原区今井南町 461)  
E-mail: tei@mikipully.co.jp

\*\*日本原子力研究所関西研究所 (〒619-0215 木津町梅美台 8-1)

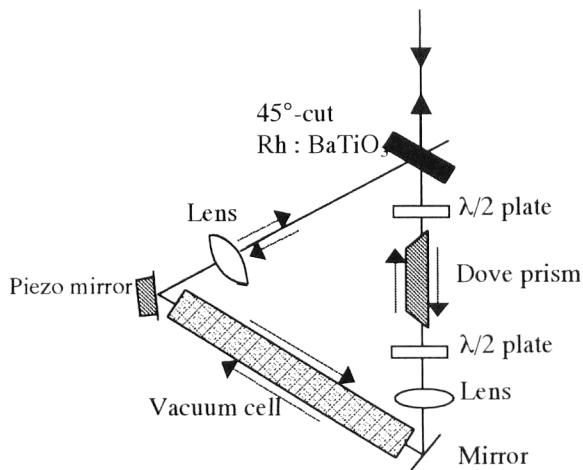


図1 外部ループ方式に基づく実用的な自己励起位相共役鏡。

ループの2枚のレンズによって構成される望遠鏡の物点と像点は、結晶の位置と一致している。したがって、結晶に入射した一様なレーザー光強度分布は、外部ループ周回後に再現される。このことにより、ビーム品質に左右されることなく、安定した効率と忠実度が保証される。望遠鏡の焦点には、ブレイクダウンを避けるため、真空セルを配置している。外部ループ内のダブリズムはビーム断面を90°回転するのに用いられている。これにより、ループ内での位相共役光以外の横モード発振を抑制することができる。ここでの横モードとはPRゲインが高いときに発生するモードで、PR効果特有の不安定要因である。ループ内の波長板は結晶に到達する光の偏光を異常光線に保つためのもので、ダブリズム内では、ダブリズムの固有偏光である45°の直線偏光となるよう調整されている。PR効果はSBSとは異なり、マルチ縦モードのレーザー光に対しても感度を有するが、縦単一モードの場合は使用上注意を要する。縦単一モードの場合、結晶内に透過型格子と一緒に反射型格子が形成されるため、反射率の低下や、不安定要因となることが知られている。縦単一モードのレーザーシステムに用いる場合、反射型格子形成を抑制することが加えて必要とされる。図1の位相共役鏡ではピエゾミラーを振動させることで、反射型格子生成を抑制することができる。

この位相共役鏡が $M^2=130$ という劣化したレーザービームに対して、100%近い忠実度と60%近い反射率という高い能力を維持できることを実験的に確認した<sup>10)</sup>。

## 2. フォトリフラクティブ位相共役鏡を用いたレーザーシステム

マスター発振器はパルス幅50 ns、パルスエネルギー100  $\mu$ J、繰り返し数100 Hzで動作する。システムは発振器の他

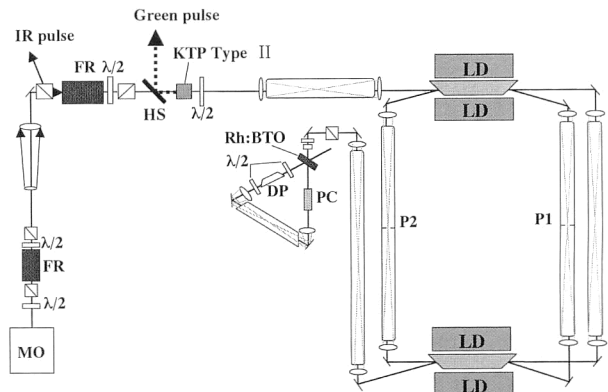
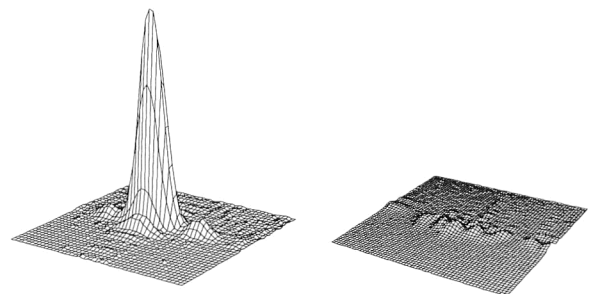


図2 PR自己励起位相共役鏡を用いたNd:YAG MOPAシステム。



(a)

(b)

図3 レーザー出力の遠視野像。(a)位相共役鏡、(b)通常の鏡。

に2台の増幅器、PR位相共役鏡から構成されている。増幅器にはジグザグスラブNd:YAGを採用し、結晶の両サイドより半導体レーザーによって励起されている。MOPAシステムの基本は4パス方式であるが、特別なMOPA方式を採用することで、高出力用ファラデーローテーターは1機のみ用いている(図2)。P1、P2のピンホールは寄生発振を抑制するため挿入した。その径は回折限界のビーム径よりかなり大きいものを選んで用いている。位相共役鏡への入射エネルギーは15 mJである。システムから取り出される基本波( $\lambda=1064$  nm)パルスエネルギーは600 mJ、平均出力60 Wであった。発振器を立ち上げてからレーザー出力が定格値まで達するのにおよそ20秒要するが、実用上問題は無い。

出力の安定性は1%程度と高く、ビーム品質は回折限界の1.1倍であった。図3はレーザービームの遠視野像を示す。図3(a)は位相共役鏡を用いた場合で、図3(b)は位相共役鏡の代わりにミラーをおいた場合の遠視野像である。PR位相共役鏡はこのような高出力下でも安定して動作し、忠実度も高いことが実証された。

図2の位相共役鏡内部にあるポッケルスセル(PC)は、

レーザー増幅器のゲイン増大に伴って障害となった寄生発振を防止するために用いられている。位相共役鏡内部の PC には蛍光や ASE (amplified spontaneous emission) の偏光は常光線とし、メインパルスは異常光線になるよう高電圧パルスのタイミングが調節されている。

筆者らはこのシステム内部に第二高調波発生結晶として Type II 位相整合の KTP 結晶を組み込み、回折限界の 1.1 倍の品質で 250 mJ (変換効率 42%) のグリーン光パルスを繰り返し数 100 Hz で得ることに成功した。このシステムにおいて第二高調波用の結晶内部の収差も位相共役波によって補正されている。

筆者らの研究によって、PR 位相共役鏡の不安定性は克服され、位相補正に関する高い潜在能力が利用可能となった。また、1 J 近いパルスエネルギーを出力する MOPA へ適用されたことで、PR 位相共役鏡の有用性が実証された。現在本システムは日本原子力研究所関西研究所にてチタンサファイア CPA システムの励起源として用いられており、さらなる出力増強も計画されている。

## 文 献

- 1) M. Trew, G. J. Crofts, M. J. Damzen, J. Hendricks, S. Mailis, D. P. Shephered, A. C. Tropper and R. W. Eason: *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1346-1348.
- 2) D. Udaiyan, G. J. Crofts, T. Omatsu and M. J. Damzen: *J. Opt. Soc. Am. B*, **15** (1998) 1346-1352.
- 3) B. A. Wechsler, M. B. Klein, C. C. Nelson and R. N. Schwartz: *Opt. Lett.*, **22** (1994) 536-538.
- 4) J. Feinberg: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 486-488.
- 5) M. Cronin-Golomb, B. Fischer, J. O. White and A. Yariv: *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1983) 919-921.
- 6) A. Brignon, J.-P. Huignard, M. H. Garrett and I. Mnushkina: *Opt. Lett.*, **22** (1997) 215-217.
- 7) A. Brignon, J.-P. Huignard, M. H. Garrett and I. Mnushkina: *Opt. Lett.*, **22** (1997) 442-444.
- 8) A. Brignon, S. Senac, J.-L. Ayrat and J.-P. Huignard: *Appl. Opt.*, **37** (1998) 3990-3995.
- 9) 竹内洋祐, 相原順一, 鄭 和翔, 横田英嗣: “Q スイッチ Nd: YAG レーザーによるリング型自己位相共役鏡の位相補正能力の測定”, 31p-ZQ-4, 第 44 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 第 3 分冊 (1997) p. 948.
- 10) K. Tei, Y. Niwa, M. Kato, Y. Maruyama and T. Arisawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 5885-5887.
- 11) K. Tei, F. Matsuoka, M. Kato, Y. Maruyama and T. Arisawa: *Opt. Lett.*, **25** (2000) 481-483.
- 12) N. Huot, J. M. C. Jonathan, G. Pauliat, G. Roosen, A. Brignon and J.-P. Huignard: *CLEO Europe '98 Technical Digest*, paper CWO2, (1998) p. 237.

(2001 年 4 月 11 日受理)