高機能回折光学素子による先端レーザー技術

尾松 孝茂

千葉大学大学院 融合科学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

Advanced Laser Technologies Based on A Functional Diffractive Optics

Takashige OMATSU

Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

(Received June 30, 2009)

Functional diffractive optics including a volume Bragg grating, a polarization selective mirror, as well as photorefractive nonlinear materials has potentially been applied to explore advanced laser technologies such as coherent beam coupling, radially-polarized beam generation, and high-power laser outputs with high beam quality. In this paper, we address several successful demonstrations of advanced lasers by utilizing the functional diffractive optical elements.

Key Words: Laser, Diffractive optics, Nonlinear optics

1. はじめに

レーザーを応用する分野が拡大するに伴い、レーザーの光波としての性質(周波数・振幅・位相・波面・パルス波形など)を自在に制御してレーザー光波を目的に合わせてカスタマイズする、いわば、光波のシンセサイジング(光波シンセシス)が重要になってきた。光波シンセシスにとって回折光学素子は光波の位相や電場ベクトルの時間・空間分布を制御する重要な光学素子である。

回折光学素子は、ここ数年で大きく進化した。体積型ホログラフィック回折格子^{1,2)}や偏光選択性回折格子^{3,4)}に代表される高機能回折光学素子は高出力レーザーのスペクトル狭帯域化、通常の共振器では固有モードとして発振しない軸対称偏光モードの発生、など高度な光波シンセシスを可能にする。また、フォトリフラクティブ材料⁵⁾や誘導ブリュアン散乱⁶⁾に代表される動的ホログラム素子は超短パルスレーザーの波面制御、パルス波形制御の多彩な光波シンセシスを可能にする。

本稿では、光波シンセシスにおける回折光学素子の果たす役割と最近の研究動向を回折格子の種類別に整理して概説したい。

2. 高機能回折光学素子

2.1 体積型ホログラフィック回折格子(Volume Bragg Grating, VBG)

フロリダ中央大学CREOLのGlebovらのグループは photothermorefractive (PTR) ガラスと呼ばれるNa, Zn,

Al-Silica系ガラスに紫外光を用いて体積型ホログラムを記録し、熱定着する技術を研究してきた。このPTRガラスに記録された体積型ホログラフィック回折格子 (Volume Bragg Grating, VBG) は、CW光に対して 100 kW/cm^2 , 1 nsパルス光に対して 20 J/cm^2 という高い損傷しきい値と90%近い高い回折効率を示す。

これまでに高出力半導体レーザー、チタンサファイアレーザー、Cr:LiSAFレーザーなどの広帯域レーザーの発振スペクトル狭帯域化^{7,8)}、独立した複数の半導体レーザーのコヒーレント結合⁹⁾、チャープパルス増幅器におけるパルス圧縮¹⁰⁾など、VBGを用いた様々な応用が実証されている。さらには、Ndイオンなどのレーザー活性イオンを添加したPTRガラス¹¹⁾も開発されており、PTRガラス素子ワンチップで小型で単一モード発振するレーザーが実現できる可能性もある。

PTRガラスを用いたVBGによる高出力半導体レーザーの発振スペクトル狭帯域化とアルカリ金属蒸気レーザー励起^{12,13)}に関する報告は本特集号における鄭らの解説記事に譲り、ここでは、Venusらによる独立した2台の半導体レーザーをコヒーレント結合した実験例を取り上げる⁹⁾。実験配置概念図をFig. 1に示す。980 nm帯半導体レーザー(出力50 mW)の外部に外部共振器ミラー用のVBGを配置してフィードバック光を戻し、狭帯域レーザー発振($< 30 \text{ pm}$)させる。その発振光の一部をコヒーレント結合用のVBGで回折し、別の半導体レーザーに注入する。その結果、2台の独立した半導体レーザーが完全に互いに同期する。同期後は外部共振器ミラー用のVBGを取り除いても2台の半導体レーザーの同期は持続する

Fig. 1 Scheme diagram of coherent coupling of laser diodes. (a) Combining independent diodes; (b) spectral locking LD-1 by an external volume Bragg grating (VBG); (c) phase locking two diodes by another volume Bragg grating; (d) after the locking grating is removed.

(Fig. 2). この実験で使用したVBGの回折効率率は98%, 波長選択性は100 pmであった. 最終的な実験光学系は独立する2台の半導体レーザーの外部にコヒーレント結合用のVBGを配置するだけの簡単な光学系であるため, 多数の独立な半導体レーザーをコヒーレントに結合することも難しい. すでに同グループでは計算機シミュレーション結果を報告している¹⁴⁾.

2.2 偏光選択性回折素子

偏光選択性回折素子の中でも, フォトニックラティス社で開発した自己クロニング法によるフォトニック結晶型偏光選択回折素子¹⁵⁾は高い偏光消光比と設計自由度を示す. これまでに, 径方向, 周方向の軸対称偏光子, 軸対称偏光モード用レーザー共振器ミラー, 軸対称偏光変換素子などが開発されている. これらの素子を用いた様々なレーザー¹⁶⁻¹⁸⁾が提案されているが, その中から, われわれが開発した高出力軸対称偏光モードレーザーを取り上げ紹介する¹⁹⁾.

レーザー装置の構成は, 側面励起型Nd:YVO₄スラブレーザー増幅器, 1/4波長板, テレスコープ, 全反射ミ

Fig. 2 Dark curve shows the lasing spectrum of LD-1 locked by a locking grating; Light curve shows the lasing spectrum of LD-2 locked by a coupling grating.

ラー, フォトニック結晶型偏光選択回折ミラーからなる (Fig. 3). 使用したNd:YVO₄スラブ結晶の方位は a -cut, 結晶サイズは20 mm × 5 mm × 2 mm, Ndイオン濃度は1 at.%であった. Nd:YVO₄結晶は強い偏光異方性を有するので, 発振光の偏光は c -軸に沿った直線偏光になる. 1/4波長板を用いて円偏光に変換し, 円偏光に対して周方向偏光モードだけを選択的に反射するフォトニック結晶型偏光選択回折ミラーで径方向偏光モードを出力する. フォトニック結晶型偏光選択回折ミラーで反射された周方向偏光モードはNd:YVO₄の強い誘導放出を受けて, 共振器を往復するうちに再び直線偏光になり, 1/4波長板に戻る. このような一連の偏光ダイナミクスを繰り返しフォトニック結晶型偏光選択回折出力ミラーからは常に径方向偏光したレーザーだけが出力として取り出される (Fig. 4). 共振器内部のテレスコープは発振するレーザーモードサイズを拡大し, フォトニック結晶型偏光選択回折ミラーの開口を有効利用するために配置されている. 出力ミラーの反射率が最適化されていないので, 径方向モードの取り出し効率は15%と高いが,

Fig. 3 Schematic diagram of radially polarized laser based on a Nd:YVO₄ bounce laser.

Fig. 4 Polarization dynamics of the laser mode in the laser cavity.

Fig. 5 Spatial forms of the radially-polarized output. Intensity profiles of (a) vertically-polarized component, (b) 45°-polarized component, and (c) horizontally-polarized component, respectively.

6 W以上の径偏光モードがレーザー出力として取り出された (Fig. 5). レーザー出力鏡をフォトニック結晶型偏光選択性回折素子に変更するだけの簡単な光学系なので、さらなるパワースケーリングやQスイッチパルス動作やモードロック動作などへも展開できる。

2.3 フォトリフラクティブ動的ホログラム素子

最も広く利用されているフォトリフラクティブ材料はチタン酸バリウム結晶 (BaTiO_3)^{20,21)} である。 BaTiO_3 結晶は可視から近赤外に至る広い波長感度と 10 cm^{-1} を超える大きな二光波混合利得を示す。したがって、 BaTiO_3 結晶内部に記録された動的ホログラム格子を介して位相共役波発生や光増幅が簡単に実現できる。 BaTiO_3 結晶の最も重要な機能の一つである位相共役波発生は、レーザーの波面補償やスペクトル制御に応用できる。これまでにレーザーシステムの一部に BaTiO_3 結晶からなる位相共役鏡を配置した発振器-増幅器システム (位相共役発振器-増幅器システム, Phase conjugate master-oscillator power amplifier, PC-MOPA) が数多く報告されている²²⁻²⁶⁾。すでに回折限界に近いビーム品質で 25 W を超えるレーザー出力を達成した実験例も報告されているが、その詳細については本特集号の縄田らによる解説記事に譲り、ここでは、ユニークな2つの実験報告例を取り上げる。

Godardらは、回折格子とInGaAs系半導体レーザー ($1.55 \mu\text{m}$) からなる外部共振器の間にフォトリフラクティブ結晶であるCdTe結晶を配置したレーザーシステムを提案した^{27,28)}。実験配置図をFig. 6に示す。外部共振器内で対向するモードがCdTe結晶に反射型フォトリフラクティブ動的ホログラム格子を記録する。このホログラム格子が体積型ホログラムとして機能して、外部共振器モードの同調を自動的に行う。この結果、縦シングル

Fig. 6 Self-organized laser diode with an intra-cavity photorefractive volume Bragg grating.

Fig. 7 Accessible range of $\delta\lambda$ under stable single-mode operation as a function of optical power at $1.6 \mu\text{m}$ with and without a CdTe crystal.

モード発振可能な範囲が格段に広がる (Fig. 7)。この実験はフォトリフラクティブ動的ホログラム格子を一種の VBG として用いたもので興味深い。

また、側面励起 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ レーザー共振器の全反射ミラーの代わりに位相共役鏡を配置した位相共役レーザー共振器が千葉大学とインペリアルカレッジから提案されている²⁹⁾ (Fig. 8)。共振器内部のフーリエ面近くに配置された空間フィルタを時間反転波である位相共役波は損失なく高効率に通過できるので、回折限界近いビーム品質の空間モードを高効率にアライメントフリーで発振できる。励起パワー 22 W に対して 7.5 W の連続波レーザー出力を達成している (Fig. 9)。

さて、強誘電体中のキャリア移動を伴うフォトリフラクティブ結晶の応答速度は比較的遅く、いずれの応用研究でも BaTiO_3 結晶の遅い応答速度と如何にうまく付き合

Fig. 8 Phase conjugate laser based on a $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ bounce laser in combination with a photorefractive phase conjugate mirror.

Fig. 9 Spatial form of the output from the phase conjugate resonator.

Fig. 10 Chemical structure of $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ crystal.

うか、あるいは、如何にうまく手なづけるかが成否のカギを握る。これに対して、最近、半導体と強誘電体との中間のバンドギャップを有するフェロエレクトロニック半導体と呼ばれる新しいフォトリフラクティブ結晶が現れた。この結晶は、半導体と同等の高いキャリア移動度と強誘電体と同等の大きな非線形性を示す。代表的なフェロエレクトロニック結晶として $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶があげられる (Fig. 10)³⁰⁻³²⁾。

$\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶の1 μm レーザーに対する位相共役波発生の時間応答をFig. 11に示す。 $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶は、 BaTiO_3 結晶に比べ位相共役波の立ち上がり速度が2桁近く速く、 BaTiO_3 結晶とほぼ同等の反射率(>40%)を示す。また、相転移温度が室温(～10度)近くにあり強冷却できない BaTiO_3 結晶に対して、 $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶には50度以下に相転移温度がない。したがって、フォトリフラクティブ結晶でしばしば起こる結晶温度上昇に伴う光損傷(デポーリング)を強冷却することで未然に回避できる。このように、 $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶は、従来の位相共役レーザーシステムの性能は飛躍的に向上させる可能性がある。

この他、超短パルスレーザーによるフォトリフラクティブ効果の新展開としてFeドープ LiNbO_3 における二光子吸収を用いたスペクトルホログラム記録も注目しているが、詳細は西岡の解説記事に譲る。

3. まとめ

体積型ホログラフィック回折格子や偏光選択回折素子やフェロエレクトロニック結晶など、高機能回折光学素子の進展は目覚ましい。高出力レーザーのコヒーレント結合、軸対称偏光モード発生、高出力位相共役レーザーなど、これまで提案されていたものの実現性や実用性が乏しかったアイデアが進化した回折光学素子を利用することで次々と具現化されていくその様はまさに“Dream comes true”である。

特に、1台のレーザーが出せるレーザー出力に限界が見え始めているなか、高効率なコヒーレント結合が実現できれば、レーザーのパワーに事実上、上限がなくなる。今後の展開に目が離せない。

参考文献

- 1) O. M. Efimov, L. B. Glebov, L. N. Glebova, K. C. Richardson, and V. I. Smirnov: Appl. Opt. **38** (1999) 619.
- 2) O. M. Efimov, L. B. Glebov, and V. I. Smirnov: Opt. Lett. **25** 1693-1695 (2000).
- 3) F. Pigeon, J. C. Pommier, S. Reynaud, O. Parriaux, M. A. Ahmed,

Fig. 11 Temporal behavior of 1 μm phase conjugation in SPS crystal.

- N. Landru, and J. P. Feve: Opt. Express **15** (2007) 2573.
- 4) R. Oron, S. Blit, N. Davidson, A. A. Friesem, Z. Bomzon, and E. Hasman: Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 3322.
- 5) P. Gunter and J.-P. Huignard ed.: *Photorefractive Materials and Their Applications 3* (Springer-Verlag, Berlin, 2006).
- 6) A. Brignon and J.-P. Huignard ed.: *Phase Conjugate Laser Optics*, (Wiley, New Jersey, 2004).
- 7) A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov, and L. Glebov: Opt. Lett. **32** (2007) 2611.
- 8) T. Chung, A. Rapaport, V. Smirnov, L. B. Glebov, M. C. Richardson, and M. Bass: Opt. Lett. **31** (2006) 229.
- 9) G. B. Venus, A. Sevan, V. I. Smirnov, and L. B. Glebov: Opt. Lett. **31** (2006) 1453.
- 10) K.-H. Liao, M.-Y. Cheng, E. Flecher, V. I. Smirnov, L. B. Glebov, and A. Galvanauskas: Opt. Express **25** (2007) 4876.
- 11) Y. Sato, T. Taira, V. Smirnov, L. Glebova, and L. Glebov: Conference on Laser and Electro-Optics-European Quantum Electronics Conference (CLEO-QELS) 2009 (14-19 June 2009, Munich), CA9.4.
- 12) A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov, and L. Glebov: Opt. Lett. **32** (2007) 2611.
- 13) A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov, D. A. Hostutler, and L. Glebov: Opt. Lett. **33** (2008) 702.
- 14) A. Sevan, O. Andrusyak, I. Ciapurin, V. Smirnov, G. Venus, and L. Glebov: Opt. Lett. **33** (2008) 384.
- 15) S. Kawakami, T. Kawashima, and T. Sato: Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 463.
- 16) J. Liu, K. Ueda, L. Zhong, M. Musha, A. Shirakawa, and T. Sato: Opt. Express **16** (2008) 10841.
- 17) T. Sato, K. Miura, N. Ishino, Y. Ohtera, T. Tamamura, and S. Kawakami: Opt. Quantum Electron. **34** (2002) 63.
- 18) Y. Kozawa, S. Sato, T. Sato, Y. Inoue, Y. Ohtera, and S. Kawakami: Appl. Phys. Express **1** (2008) 022008.
- 19) J. Hamazaki, A. Kawamoto, R. Morita, and T. Omatsu: Opt. Express **16** (2008) 16762.
- 20) J. Feinberg: Opt. Lett. **7** (1982) 486.
- 21) S. MacCormack and J. Feinberg: Opt. Lett. **18** (1993) 211.
- 22) A. Brignon, J. P. Huignard, M. H. Garrett, and I. Mnushkina: Opt. Lett. **22** (1997) 442.
- 23) K. Tei, F. Matsuoka, M. Kato, Y. Maruyama, and T. Arisawa: Opt. Lett. **25** (2000) 481.
- 24) K. Nawata, Y. Ojima, M. Okida, T. Ogawa, and T. Omatsu: Opt. Express **14** (2006) 10657.
- 25) K. Nawata, M. Okida, K. Furuki, and T. Omatsu: Opt. Express **15** (2007) 9123.
- 26) L. Lombard, A. Brignon, J.-P. Huignard, É. Lallier, G. Lucas-Leclin, P. Georges, G. Pauliat, and G. Roosen: Comptes rendus-Physique **7** (2006) 233.
- 27) A. Godard, G. Pauliat, G. Roosen, P. Graindorge, and P. Martin: Opt. Lett. **26** (2001) 1955.
- 28) A. Godard, G. Pauliat, G. Roosen, and E. Ducloux: Appl. Opt. **43** (2004) 3543.
- 29) T. Omatsu, A. Minassian, and M. J. Damzen: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 2024.
- 30) T. Bach, M. Jazbinsek, P. Gunter, A. Grabar, I. Stoika, and Y. Vysochanskii: Opt. Express **13** (2005) 9890.
- 31) M. Jazbinsek, D. Haertle, G. Montemezzani, P. Gunter, A. A. Grabar, I. M. Stoika, and Y. M. Vysochanskii: J. Opt. Soc. Am. B **22** (2005) 2459.
- 32) T. Bach, M. Jazbinsek, G. Montemezzani, P. Gunter, A. A. Grabar, I. Stoika, and Y. M. Vysochanskii: J. Opt. Soc. Am. B **24** (2007) 1535.