高密度光ディスク用光導波路型SHG青色レーザー

北岡 康夫, 鳴海 建治, 水内 公典, 山本 和久, 横山 敏史, 加藤 誠
松下電器産業(株) 光ディスク開発センター (〒570-8501 大阪府守口市八雲中町3-1-1)

Waveguide-Type SHG Blue Laser for High-Density Optical Disk System

Yasuo KITAOKA, Kenji NARUMI, Kiminori MIZUUCHI
Kazuhisa YAMAMOTO, Toshifumi YOKOYAMA, and Makoto KATO
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Optical Disk Systems Development Center
3-1-1 Yagumo-Nakamachi, Moriguchi, Osaka 570-8501

(Received November 27, 1997)

A high power SHG blue laser with direct modulation capability at high frequency has been demonstrated using a tunable distributed Bragg reflector (DBR) laser diode and a waveguide-type quasi-phase-matched second harmonic generation (QPM-SHG) device in x-cut Mg doped LiNbO₃. Continuous blue light power of 12 mW and pulsed peak power of 26 mW were generated. The SHG blue laser was installed to an optical head, and readout of ROM disk and recording on phase change optical disk were performed. A butt-coupling-type 0.8 cc SHG blue laser was also fabricated. It was indicated that SHG blue laser is applicable to high-density optical disk system.

Key Words: Second harmonic generation, Quasi-phase-matching, Waveguide, Butt-coupling, Optical disk system

1. はじめに

赤色半導体レーザー (AlGaInP系, 波長650nm) の実現により, デジタルオーディオCDに比べて7倍以上高密度のDVDが開発・商品化され, 光ディスクでも映像を扱う時代となった. 高精細画像の情報を光ディスクに記録したり, 現行のビデオテープの置き換えを考え4時間以上の録画時間を得るためには10GB以上の記録容量が必要とされる. 光ディスクの高密度化技術として, (1) 光源の短波長化, (2) レンズの高NA (Numerical Aperture) 化などがある.

我々は, 短波長光源を用いた光ディスクシステムの高密度化に着目してきた. 12cm径のディスクに10GB以上の記録容量を実現するためには青色領域の光源が必要であり, 青色レーザー実現の1つのアプローチとして, 波長変換デバイスを用いた赤外半導体レーザーの第2高調波発生 (Second Harmonic Generation: SHG) による400nm帯の光源開発を行ってきた. 光ディスク用光源として要望される仕様に, (1) 10mW以上の出力, (2) -135dB/Hz以下の低ノイズ, (3) 回折限界での集光, (4) 数10MHz以上の高速変調, (5) 1cc以下の小型化などがある. 上記仕様を満足する青色光源を実現するため, 光導波路型波長変換デバイスと光フィードバックにより発振波長がロックされた半導体レーザーにより構成される直接波長変換方式の青色光源を提案してきた. 光導波路型波長変換デバイスを用いた構成では, 大きな光閉じこめ効果および長い相互作用長による高効

率波長変換, および青色光が導波モードであることによる良好な集光特性が期待できる¹⁻⁴⁾. また, 光フィードバック機能が集積化されたDistributed Bragg Reflector (DBR) 型半導体レーザーを基本波として用いることにより, 低ノイズ化および小型化が期待できる. さらに, 固体レーザーなどをを用いない直接波長変換であるため, 波長変換により得られる青色光の高速直接変調も可能となる.

今回, MgO:LiNbO₃基板を用いた高効率光導波路型波長変換デバイスと高出力波長可変DBR半導体レーザーを開発し, 直接変調可能な10mW以上の高出力青色レーザー (426nm) を実現し, その諸特性について検討した. また, 結合レンズを削除した直接結合特性についても検討し, 1cc以下の超小型SHG青色レーザーを実現した. さらに, SHG青色レーザーを光ピックアップに搭載し, 相変化光ディスク上に15GB相当の単一マーク記録を行ったので報告する.

2. SHG 青色レーザー

2.1 構成

提案するSHG青色レーザーは, Fig.1に示すように赤外の波長可変DBR半導体レーザーと光導波路型擬位相整合方式 (Quasi-Phase-Matched: QPM) -SHGデバイスから構成される. SHG青色レーザーにおいて高効率波長変換を実現するためには, 半導体レーザーの波長をQPM-SHGデバイスの位相整合波長に一致させる必要がある. 我々は従来よ

り、グレーティングや狭帯域バンドパスフィルタなどを用いて光フィードバックによる半導体レーザーの波長ロック検討を行ってきた⁵⁾。本論文では、波長ロック機能が集積化された波長可変DBR半導体レーザー(出力:100mW, 波長852nm)を基本波光源として用いた。SHGデバイスには、xカットMgO:LiNbO₃基板上に周期的分極反転領域とプロトン交換光導波路を形成した光導波路型QPM-SHGデバイスを用いた。

波長可変DBR半導体レーザーは、独立した電極を有する活性領域とDBR領域から構成される。DBR領域には回折格子が形成され、レーザー波長を回折格子のBragg波長に固定する。また、DBR領域へ電流注入することによりDBR領域の屈折率変化を与え、発振波長を可変することが可能である。この波長可変DBR半導体レーザーは⁶⁾、本SHG青色レーザーへ応用するためにSDL社(米国)により開発されたものである。DBR領域に波長制御電流として100mAを注入した時、単一縦モードを維持しながら波長可変範囲2nmが得られた。また、しきい値16mA、動作電流140mAに対し、100mWの出力が得られた。

次に、光導波路型QPM-SHGデバイスの構成について説明する。基板として用いたMgO:LiNbO₃は、短波長光が照射されたときに屈折率変化が生じる現象(光損傷)に関してその変化量が小さく⁷⁾、高出力の青色光発生のために有効な結晶基板である。また、非線形光学定数も大きく、高い変換効率が期待できる。光導波路型QPM-SHGデバイスにおいて高効率波長変換を実現するため、基本波と高調波のオーバーラップを大きくし、かつ深い分極反転領域を形成する必要がある。本論文では、半導体レーザーとの直接結合を容易にするため、結晶基板にはx板(TEモード伝搬)を用いた。我々は、x板上に深い周期的分極反転領域を形成可能な2次元電界印加法を開発し⁸⁾、深さ1.3 μ m、周期3.2 μ mの分極反転層を10mm長にわたり均一に実現した。また、周期的分極反転領域と垂直方向に形成されたプロトン交換光導波路上に高屈折率クラッド層を形成し、基本波の閉じ込めをよくすることで、高調波とのオーバーラップ、すなわち変換効率の向上を実現した⁹⁾。光導波路の導波損失は1dB以下であった。

2.2 SHG特性

波長可変DBR半導体レーザーと光導波路型QPM-SHGデバイスを一体モジュール化し、その諸特性を調べた。xカット基板上に形成されたプロトン交換光導波路は、半導体レーザーの偏光方向と同じTEモードの基本波を導波させることが可能なので、半波長板なしで半導体レーザー光を光導波路内に効率よく結合することができる。結合レンズを選択し、半導体レーザーの集光スポットを光導波路の横モードに一致させることにより、高結合効率50%を実現した。Fig.2に、SHG出力特性を示す。横軸は光導波路内に結合した半導体レーザー出力、縦軸は青色出力を示す。DBR領域(波長可変部)への電流注入により、波長可変DBR半導体レーザーの波長を光導波路型QPM-SHGデバイスの位相整合波長に一致させ、光導波路への半導体レーザー入力50mWに対し12mW(連続光)青色光を得、変換効率20%を

実現した。青色出力の安定性は、10時間に対して $\pm 5\%$ であり、光損傷による出力変動は観測されなかった。測定された青色光の相対雑音強度は-144dB/Hzであり、光ディスク用光源として十分低いノイズレベルが得られた。

次に、波長可変DBR半導体レーザーのDBR領域(波長可変部)への電源注入によるSHG青色レーザーの立ち上げ制御を検討した。波長可変DBR半導体レーザーは、動作電流一定(ACC)で駆動した。はじめに、DBR領域への注入電流を0mAから80mAまで走査し、Fig.1に示すように得られた青色光をフォトディテクターで検出し、青色出力が最大になる注入電流(I_{dbr})をメモリーに記憶する。次に、注入電流を I_{dbr} に調整し、青色出力を安定化する。1.3秒程度の制御時間で、SHG青色レーザーを立ち上げ安定化することができた。波長可変DBR半導体レーザーを基本波として用いることにより、電気的なフィードバック制御が可能となり、高速での立ち上がり特性を実現することができた。

青色光の直接変調特性について説明する。本論文では、外部変調器を用いない半導体レーザーの駆動電流を直接変調したときの青色光変調特性について検討した。一般のファブリペロー半導体レーザーでは、その駆動電流を変調すると、マルチ縦モード発振が生じる。QPM-SHGデバイスは、高効率波長変換を実現するための位相整合波長に対する許容幅が0.1nm程度と小さいため、この基本波である半導体レーザーの縦モード広がりには変換効率の低下をまねく。基本波として波長可変DBR半導体レーザーを用いることにより、縦モードの広がりには抑制される。Fig.3は、波長可変DBR半導体レーザーと光導波路型QPM-SHGデバイ

Fig.1 Configuration of a SHG blue laser.

Fig.2 Generated blue light power as a function of coupling laser diode power in the waveguide.

Fig.3 Output waveform for blue light of directly modulated SHG blue laser.

スから構成されたSHG青色レーザーの青色光の出力変調波形を示している。変調周波数は10MHz (duty: 33%)である。光導波路への半導体レーザーピーク入力115mWに対して、青色ピーク出力26mWが得られた。

以上の結果、波長可変DBR半導体レーザーと光導波路型QPM-SHGデバイスから構成されたSHG青色レーザーは、出力、出力安定性、ノイズ、変調特性など光ディスクの仕様を満足し、光ディスク応用に適した青色光源であることが示された。

2.3 小型化

結合レンズを用いたモジュール構成では、超小型化(1cc以下)および量産化可能な工法を実現することは困難である。光通信分野では、小型実用化を目指して半導体レーザーと光ファイバの直接結合による実装検討が活発に行われている¹⁰⁾。波長可変DBR半導体レーザーは光フィードバック機能が集積化されているため、直接結合による超小型のモジュール構成が可能となる。

我々は従来より、zカットLiTaO₃基板上に作製した光導波路型QPM-SHGデバイスの入射端面にTa₂O₅半波長膜を形成し、半導体レーザーとの直接結合特性について検討してきた¹¹⁾。xカットMgO:LiNbO₃基板上的のプロトン交換光導波路は、半波長板なしで半導体レーザー光を導波することができるため、直接結合型モジュールには有利である。波長可変DBR半導体レーザーとMgO:LiNbO₃光導波路型QPM-SHGデバイスの直接結合において、半導体レーザー射出端面と光導波路入射端面の距離が1μm以下の時、70%の高結合効率を実現した。Fig.4の右側に示されるのは、試作した直接結合型SHG青色レーザーである。サイズは0.8ccである。左側は通常のAlGaAs半導体レーザー(9mmφステム実装)である。室温近傍では、温度制御なしで安定な動作を確認している。半導体レーザー端面と光導波路端面の距離は5μmで固定され、結合効率35%に対し青色出力2mWが得られた。

直接結合型SHG青色レーザーの試作より、Siサブマウント上に半導体レーザーチップとQPM-SHGデバイスを実装したプレーナタイプの直接結合モジュール実現への可能性が見い出せ、さらに小型で量産可能なSHG青色レーザーの実現可能性が示された。

Fig.4 Butt-coupling type SHG blue laser with a size of 0.8 cc, compared with conventional AlGaAs laser diode.

3. 光ディスクへの応用

3.1 光ピックアップの構成

SHG青色レーザーを搭載した光ピックアップを試作し、光ディスクへの応用について検討した。Fig.5に光ピックアップの構成を示す。SHG青色レーザーから出射された光は、レンズによりコリメートされ、プリズムペアによりビーム形成される。ビーム整形されたビームは、偏光ビームスプリッタ(PBS)を透過し、反射プリズムでλ/4板と対物レンズに導かれる。対物レンズは基材厚0.6mm用のNA=0.6の非球面レンズである。ディスクで反射したビームは、PBSで反射し、検出レンズとシリンドリカルレンズを透過後、フォトディテクター上に導かれる。フォトディテクター表面には、青色領域に最適化した無反射コートが形成されている。フォーカスサーボ信号は非点収差法で、トラッキングサーボ信号はプッシュプル法および位相差法で検出された。対物レンズ後の青色出力は、連続動作(CW)時で2.2mW、変調動作時でピーク出力6mWが得られた。対物レンズ後の青色光の集光特性を評価したところ、タンジェンシャル・ラジアル方向ともに半値全幅0.39μmの回折限界の集光スポットを実現した。

Fig.6は、SHG青色レーザーを搭載した光ピックアップを用いて、高密度ROMディスクの(a) 単一信号および(b) ランダム信号、を再生した結果である。単一信号のピット長は、現行のDVD-ROMディスクの最短ピット長0.40μmに対

Fig.5 Configuration of an optical pickup with the SHG blue laser.

(a)

(b)

Fig.6 Readout characteristics of ROM disk by using an optical pickup with the SHG blue laser. (a) for pure tone signal and (b) for random signal.

し、波長比(425nm/650nm)で求めた値に設計した。単一信号のピット長 $0.25\mu\text{m}$ に対して $C/N = 52.4\text{dB}$ が得られ、SHG青色レーザーを搭載した光ピックアップの集光特性が回折限界まで集光でき、現行の赤色半導体レーザーを用いたDVDと比較しても十分な光学的周波数特性が得られることが示された。一方、(b)はトラックピッチ $0.74\mu\text{m}$ 、最短マークピット長 $0.29\mu\text{m}$ (8-15変調)のランダム信号を再生したアイパターンである。この時、得られたジッタ(data to data)は11%であった。今後、ディスクカッティング条件や光ピックアップ調整の最適化などにより、さらにジッタが向上すると思われる。SHG青色レーザーを搭載した光ピックアップにより光ディスクの高密度化が図れ、光源の短波長化が10GB以上の高密度光ディスクシステム実現に有効な手段であることが示された。

3.2 記録特性

SHG青色レーザーが搭載された光ピックアップを用いて、相変化光ディスクへの高密度記録再生について検討した。実験に用いられた青色用相変化光ディスクの断面構造をFig.7に示す。基板にはDVDと同じ 0.6mm 厚のポリカーボネート基板が用いられ、基板上にはスペース間隔が $0.33\mu\text{m}$ および $0.35\mu\text{m}$ のランド・グループが形成された。また、基板上に誘電体層(ZnS)により挟まれた記録層(GeSbTe)を形成され、反射層としてはAuが用いられた。

Fig.8は、スペース間隔 $0.33\mu\text{m}$ のランドおよびグループ上に単一信号記録したマークを透過型電子顕微鏡で観察し

Fig.7 Cross section of phase-change optical disk.

Fig.8 Recorded mark on phase-change optical disk observed by TEM.

た結果である。マーク長 $0.24\mu\text{m}$ の記録マークがランド・グループに形成され、 $120\text{mm}\phi$ の光ディスクに片面15GB相当の記録密度の単一マーク記録を実現した。また、スペース間隔 $0.35\mu\text{m}$ のグループ上にマーク長 $0.3\mu\text{m}$ の単一信号記録を行い、同じSHG青色レーザー光ピックアップで再生したところ $C/N = 46\text{dB}$ が得られた。

4. まとめ

波長可変DBR半導体レーザーと $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 光導波路型QPM-SHGデバイスを用いて、高出力かつ低ノイズで、高速変調可能なSHG青色レーザーを実現した。連続動作で12mW青色出力、変調動作で26mWのピーク青色出力が得られた。また、直接結合により0.8ccの超小型SHG青色レーザーを実現した。さらに、SHG青色レーザーを搭載した光ピックアップを試作し、高密度ROMディスクの再生特性および相変化光ディスクへの記録再生特性について検討し、良好な記録再生特性が得られた。

我々は、SHG青色レーザーの基本波光源として波長可変DBR半導体レーザーを、また波長変換デバイスとして光導波路型QPM-SHGデバイスを用いることを提案してきた。上記要素技術により構成されるSHG青色レーザーは、特性面だけでなく小型化の可能性など光ディスクに応用するための課題を解決できるものとして、その有効性が示された。

謝 辞

光導波路型QPM-SHGデバイスの作製に協力して頂いた大西 繁喜氏, また光ピックアップの作製および構成に助言を頂いた伊藤 昇氏, 水野 定夫氏に感謝致します. 高密度ROMディスクの作製および評価に協力して頂いた阿部 伸也氏, 相変化光ディスクへの記録再生に有意義な助言と多大なる協力を頂いた西内 健一氏, 植野 文章氏に感謝の意を表します. SHG青色レーザーの出力安定化用制御系を構築して頂いた高峯 浩一氏に感謝致します.

参考文献

- 1) K. Mizuuchi and K. Yamamoto: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 2943.
- 2) S. Sonoda, I. Tsuruma, and M. Hatori: The 57th Autumn Meeting,

- 1996, The Japan Society of Applied Physics 8p-KG-7.
- 3) S. Okamoto and T. Tohma: Microoptics News **13** (1995) 31.
- 4) M. Fujimura, T. Suhara, and H. Nishihara: Electro. Lett. **27** (1991) 1207.
- 5) Y. Kitaoka, K. Mizuuchi, K. Yamamoto, and M. Kato: Opt. Review **1** (1994) 227.
- 6) V. M. Gulgazov, H. Zhao, D. Nam, J. S. Major, and T. L. Koch: Electro. Lett. **33** (1997) 58.
- 7) D. A. Bryan, R. Gerson, and H. E. Tomaschke: Appl. Phys. Lett. **44** (1984) 847.
- 8) K. Mizuuchi, K. Yamamoto, and M. Kato: Electro. Lett. **33** (1997) 806.
- 9) K. Mizuuchi, H. Ohta, K. Yamamoto, and M. Kato: Opt. Lett. **22** (1997) 1217.
- 10) C. A. Armiento, M. Tabasky, C. Jaganath, T. W. Fitzgerald, C. L. Shieh, V. Barry, M. Rothman, A. Negri, P. O. Haugsjaa, and H. F. Lockwood: Electro. Lett. **27** (1991) 1109.
- 11) Y. Kitaoka, H. Wada, S. Nishino, K. Mizuuchi, K. Yamamoto, and M. Kato: Opt. Review **3** (1996) 481.