非線形波長変換による小型青色レーザー

Compact Blue-laser by Nonlinear Frequency Conversion

田辺 譲*

1. はじめに

1960年にMaimanがルビーレーザーのパルス発振に成功して以来、光エレクトロニクスが盛んに研究され始めたが、本格的に実用化の段階に入ったのは半導体レーザー (semiconductor laser) が出現してからである。現在の光産業の最大分野はコンパクトディスクであるが、そこには波長 780 nm の半導体レーザーが中核部品として使われている。

しかし、半導体レーザーには可視域以下の短波長光の発振が困難であるという問題がある。現在のところ、GaInAlP 系の材料を用いて 670 nm 程度の発振が限界である。そのため、青色半導体レーザー (400~500 nm) の実現を目標として、世界中の研究機関がしのぎを削っている段階である。青色レーザーの開発のモチベーションのひとつは光ディスクメモリの高密度化である。収束された光スポット径の最小値は波長に比例して小さくなることが知られており、光波長が半分になると、光スポット面積が 1/4 になり、記録密度が 4 倍になるとされている。また、レーザープリンタの高速化、印字印質の向上が可能となり、コンパクトなフルカラーレーザーディスプレイが実現可能である。

青色レーザーとしてはガスレーザーであるアルゴンイオンレーザーが知られているが、求められているのは機器に組み込める小型・高信頼の青色固体レーザーであり、それは半導体レーザーを発展させたものしかありえないと考えられる。

2. 短波長化のスキーム

青色半導体レーザーを実現するには、次の 2 つのアプローチがある。

- ①半導体レーザー自体から電流注入によって青色光を発光させる方法、バンドギャップの広い II-IV 化合物 (ZnS, ZnSe など)、カルコバイライトなどの新たな材料系の導入が必要である。昨年 3 M 社¹⁾より Blue-Green 領域 (常温で 510~520 nm) で ZnS-ZnCdSe 系の材料を用い液体窒素温度でパルス発振ではあるがレーザー発振に成功したとの発表があり、着実な進展をみせている。
- ②半導体レーザー自体は赤外域 (800 nm 台) で発振させ、それを非線形光学結晶 (nonlinear crystal) によって波長変換 (波長を半分) し、400 nm 台の青色光を発光させる方法で、ここ 2~3 年急速に発展してきた方法である。

ところで、非線形光学 (nonlinear optics) は通常の線形光学の一般化であり普遍的なものであるが、その適用は長い間高エネルギー域に限定されると考えられてきた。高い非線形光学定数を有する非線形光学結晶で実用的で利用可能なものが存在しなかったからである。しかし近年、KTP 等の有用な結晶の発見、あるいは KNbO₃等の育成技術の進展によって、半導体レーザー光程度の光出力 (~100 mW) に対しても充分高い波長変換 (第 2 高調波発生: second harmonic generation) 効率が得られるようになってきた。

半導体レーザー光を非線形光学結晶を用いて波長変換する方法として試みられているのは、Fig.1 に示す 3 つのスキームである。

*Yuzuru Tanabe
旭硝子/Asahi Glass Co., Ltd.

Fig.1 Three methods for nonlinear frequency conversion.

固体レーザ法は 809 nm の半導体レーザ光で一度 Nd:YAG レーザ結晶を励起し、活性物質である Nd から発光した高品質の光 (946 nm) をバルクでは最大の非線形光学係数をもつ酸化物単結晶 KNbO_3 によって青色に波長変換する方法である。一度別の赤外光へ変換してからさらに青色光へ変換するために、総合効率が低くなる、あるいは部品点数が多くなるという欠点があるが、レーザ結晶というエネルギー蓄積要素があるため、Q スイッチ発振、モードロック発振など多様な発振形態が可能である。

バルク直接変換法は、860 nm の半導体レーザ光を直接、非線形光学結晶 (KNbO_3) で青色に波長変換する方法である。多重反射 (共振) 構造を導入しており、現在最も高い変換効率が得られている。しかし、半導体レーザの制御に負担がかかるのが欠点であり、半導体レーザの発振周波数の安定化 (ロッキング) が必要である。

導波路法は、導波路としては最大の非線形光学係数を

もつ LiNbO_3 単結晶基板上に幅 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、厚み $0.6\text{ }\mu\text{m}$ の導波路をプロトン交換によって形成し、閉じこめ、位相整合等、導波路の多様な特徴を生かして高効率な波長変換を実現しようとするもので、多重反射構造による増倍を行わずに高い効率が得られ、将来の光源との集積化も期待できる。

一方、半導体レーザと導波路との光学的結合が難しい、あるいは狭い導波路から光を取り出すために出射光のビームプロファイルが一般的には良好でないという欠点がある。

次に、以上の 3 つのスキームに関する開発の現状についてより詳細に述べることにする。

3. 固体レーザ法

固体レーザ法²⁾による青色光源を光ディスク等の情報機器に適用する場合に最も問題になるのは効率とノイズ

Fig.2 Schematic diagram of Q-switched frequency doubling diode-pumped Nd:YAG laser system.

Fig.3 Oscilloscope traces of blue output pulses.

である。ノイズに関しては YAG+KTP の Green の系で発生する偏光モード競合がよく知られているが、 KNb_3O_3 のタイプ I 波長変換を用いることによってノイズ発生を回避することが期待できる。しかし、波長変換効率については先ほど述べたことによってバルク直接変換法を上回るのは難しいと思われるため、高ピークパワーの青色パルス光を得るのが主要な狙いであると考えられる。

我々のグループでは音響光学 Q スイッチを用いることによって、パルス幅 160 ns、ピークパワー 10 W の 946 nm パルス光および KNbO_3 単結晶による共振器内波長

変換 (intracavity) と組み合わせ、ピークパワー 42 mW の青色光パルスを得ている。Fig.2 に実験構成を示し、Fig.3 に青色光パルス波形を示す。

本方法は現時点では高ピークパワーの青色光パルスを得る唯一の方法であり、さらにより高いピークパワーの追求およびモードロック発振と共振器内波長変換との組み合わせ等が今後試みられていくであろう。

4. 導波路法

導波路法^{3),4)}に関しては、半導体レーザを含めたすべて

Fig.4 Schematic illustration of SHG by Cerenkov radiation.

Fig.5 Schematic illustration of SHG by periodically poled waveguide.

Fig. 6 Newly proposed nonlinear waveguide for Cerenkov radiation.

を半導体材料によって構成する等によって全体をモノリシックにしない限り、バルク直接変換法に比べてあまり小型化が期待できないこと、効率においてもバルク直接変換を直ちに上回することは難しいと考えられることから、次の世代の技術と考えられる。しかし、半導体で培われたプレーナ技術が適用でき、さまざまなバリエーションが考えられることから、研究対象としては極めて興味深い分野である。

最近、有機の非線形材料をコアに用いたファイバ導波路タイプのチェレンコフ法が有力な方法として出現した⁵⁾。また、平面導波路タイプとしてはLiNbO₃結晶のチェレンコフ法 (Fig. 4 参照)、準位相整合法 (ドメイン反転法, Fig. 5 参照) に続き、KTP, LiTaO₃の準位相整合法 (ドメイン反転法) が登場している。準位相整合法 (ドメイン反転法) は、チェレンコフ法とは異なり入射光に対して共線的に青色光が得られるのが利点であり、レンズによる収束時に有利であるといわれていて、今後の開発の主流になるであろう。一方、チェレンコフ法に比べて波長依存性、温度依存性が強くなる可能性があり、導波路法もメリットが損なわれる可能性がある。

我々のグループでは、導波部と波長変換部を分離した方法を考案し実験を行った。Fig. 6 に構成, Fig. 7 に実験結果を示す。

5. バルク直接変換法

バルク直接変換法^{6),7)}は、既にIBMのグループによって、実験室レベルであるが、160 mWの半導体レーザ光入力 (856 nm) に対して 41 mWの青色光 (428 nm) が得られており、驚異的な変換効率である。現時点では他の方法を1桁以上上回っており、効率に関しては実用レベルに達したといえる。効率が高いということは出力の小さい半導体レーザが使用できることを意味し、実用上極

Fig. 7 Measured SH power P_{2w} as a function of waveguide thickness (Cerenkov angle $\sim 21^\circ$)

めて重要である。

今後おそらくこれ以上の効率は他の方法で出ないであろうし、また必要もないと思われる。

バルク直接変換法では、今後は実用化の次のハードルであるノイズ特性、出力安定性、さらには小型化、低コスト化が大きな問題になっている。

我々のグループでは、3枚ミラーで構成したディスクリートの進行波型共振器 (リング共振器) とKNbO₃単結晶を組み合わせ、光帰還法による半導体レーザの周波数制御を用い、0.1%以下の青色光出力安定度と ~ 130 dB/Hz (RIN) 程度のノイズレベルを得ている。Fig. 8 に試作したモジュールの基本構成を示す。この時、半導

Fig. 8 Schematic diagram for direct frequency doubling of laser diode by using triangular ring multi-pass cavity.

Fig.9 Second-harmonic power stability.

Fig.10 Schematic diagram for direct frequency doubling of laser diode by using monolithic ring KNbO_3 built-up cavity.

体レーザ光入力 (862 nm) 102.8 mW に対して 6.6 mW の青色光出力を得ている。出力安定度を Fig.9 に示す。

また、最近我々のグループでは、新たに KNbO_3 で作成したモノリシックの進行波型共振器 (リング共振器) を用い小型モジュール (50 mmL×30 mmW×20 mmH) を試作し、半導体レーザ光入力 100 mW に対して、14.6 mW の青色光出力を得ている。構成を Fig.10、外観を Fig.11 に示す。ビームプロファイル (Fig.12 参照)、ノイズレベル (Fig.13 参照)、波面収差も同じく良好で実用化にさらに一歩近づいたと考えられる。

一方、バルク直接変換法の大きな欠点とされていた変 Vol.8, No.1

Fig.11 Compact blue-laser.

Fig.12 Beam profile of blue SH output.

Fig.13 Noise characteristics of blue SH output.

調に関しても、最近我々のグループで外部変調器を用いずに青色レーザ光を変調することに成功しており、バルク直接変換法の光ディスク書込み、あるいはレーザプリンタへの応用の道が開かれたと考えている。原理的には KNbO_3 のある特殊な方位に電界を印加することによって、光帰還法による半導体レーザの周波数ロッキングを保持したままで、位相整合を制御することによって青色出力を変調するものである。構成を Fig.14、変調波形を

Fig.15 に示す。

形状に関しては、 KNbO_3 単結晶モノリシックリングの大きさはわずか数 mm であり、半導体レーザチップは数 100 ミクロンであるため結合光学系さえ小型になればかなり小型化が可能であり、我々もさらに小型化に注力していく予定である。

6. おわりに

非線形波長変換による青色レーザの高出力化、高効率化をターゲットとした研究開発はここ 1, 2 年で終わりを告げ、それ以後は本格的な実用化の検討に入ると考えられる。実用化のためには効率以外のさまざまな仕様を満たす必要があり、これによって淘汰された方式のみが生き残るであろう。青色レーザが実現すればオプトエレクトロニクスのあらゆる分野にインパクトを与えるのは確実であり、また非線形光学デバイスの本格的な実用化

という点で意義深いと思われる。

引用・参考文献

- 1) M.A.Hasse et al.: Appl.Phys.Lett.,59,1272 (1991)
- 2) W.P.Risk, R.Pon, and W.Lenth : Appl.Phys. Lett.,54,1625 (1989)
- 3) E.J.Lim, M.M.Fejer, R.L.Byer, and W.J.Kozlovsky : Electron.Lett.,25,731 (1989)
- 4) C.J.vander Poel, J.D.Bierlein, J.B.Brown,and S. Colak : Appl.Phys.Lett.,57,2074 (1990)
- 5) A.Harada et al.: Appl.Phys.Lett.,59,1535 (1991)
- 6) W.J.Kozlovsky, W.Lenth, E.E.Latta, A.Moser, and G.L.Bona : Appl.Phys.Lett.,56, 2291 (1990)
- 7) 妹尾他:「LD 波長変換ブルーレーザの特性」, 応物シンポジウム 「レーザ・原子発振器と極限量子光学」予稿集, D2, 1990, pp.38~39
- 8) T.Senoh et al.: in Technical Digest of Conference on Lasers and ElectroOptics (Optical Society of America, Washington,D.C.,1991),Paper CWA 6

Fig.14 Schematic diagram for direct modulation of blue SH output.

Fig.15 Oscilloscope trace of modulation waveform.