

反転ドメイン波長変換技術の開発とその応用

原田 明憲* , 二瓶 靖和* , 岡崎洋二* , 神山宏二*

Development of Periodically Poled Wavelength Converter and the Application

Akinori HARADA*, Yasukazu NIHEI*, Yoji OKAZAKI*, and Koji KAMIYAMA*

Abstract

A periodically poled crystal is one of the most attractive crystals to realize high quality visible lasers. The periodically poled MgO-LiNbO₃ (PPMGLN) with uniform periodicity was successfully obtained by a novel corona discharge method. We have achieved blue and green laser diode-pumped intracavity frequency doubling of solid-state lasers by using PPMGLN. Larger temperature acceptance bandwidth of the PPMGLN made it possible to realize the simultaneous temperature control of the laser diode and of the solid-state laser cavity. As a result, our new blue and green solid-state lasers are compact in size, highly stable in laser power, operate with low noise, and their beam quality are high. By using these blue and green solid-state lasers, a new digital photo printing system and a new fluorescent image analyzer were realized. In addition, it has been basically confirmed that the conversion wavelength of PPMGLN can be expanded from UV regions to 1.55 μm.

1. はじめに

富士写真フイルム(株)は、写真のフルデジタル化を目的として、1996年に「Frontier」を世界に先駆けて発売した¹⁾²⁾。これは、カラー写真を高速で処理するラボ機器において、CCD入力による銀塩ネガフイルムのデジタル画像や電子スチルカメラからのデジタル画像などを画像処理によって自由に編集処理し、青、緑、赤色の光の3原色のレーザー光源によるレーザー走査露光により、デジタルプリントするものである。レーザー走査露光法は、もっとも高品位なデジタル記録方法として注目され、高精細、高画質、高速のデジタルカラープリントはカラー写真の新たな世界を提供した。「Frontier」のシステムの中でコアとなるデバイスのひとつが、それまでに実用化されていなかった小型、高性能の青、緑色レーザーであり、当社において独自に開発した、反転ドメイン波長変換結晶を用いた高品位、小型、長寿命の青、緑色波長変換固体レーザーを初めて搭載した(Photo 1)。

KEY 技術である反転ドメイン波長変換技術は、設計により紫外波長領域 (> 350nm) から遠赤外波長領域ま

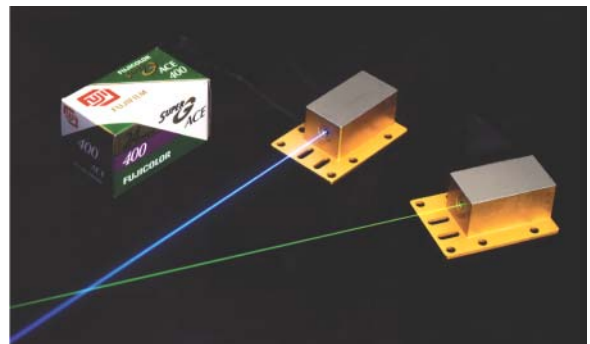


Photo 1 Blue and green diode-pumped intracavity frequency doubling solid-state lasers.

で自由に波長変換できる技術であり、前述した本技術の当初の研究目的である青、緑色の可視光、小型、高品位レーザー以外のコヒーレント光を発生させることへ発展可能な技術である。

これまでに当社にて構築してきた反転ドメイン波長変換技術の詳細、本技術のこれまでの商品展開と、今後の新たな波長領域への技術展開の可能性について述べる。

2. 反転ドメイン波長変換素子とは

反転ドメイン結晶は、Fig. 1 に示すように人為的に強誘電体結晶の自発分極配向をミクロンオーダーの周期にて 180 °分極反転した“人工結晶”であり、その原理は 1962 年に Armstrong らによって提案されたものである³⁾。通常のバルク単結晶では不可能な、新たな機能、性能の

本誌投稿論文 (受理 2002 年 10 月 7 日)

* 富士写真フイルム(株) 宮台技術開発センター
〒258-8538 神奈川県足柄上郡開成町宮台 798

* Miyanodai Technology Development Center
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Miyanodai, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun,
Kanagawa 258-8538, Japan

向上が示唆されていた。Fig. 2は反転ドメイン波長変換結晶における反転周期と、第二高調波発生(SHG)発生時の位相整合波長の関係を示したものである。周期を任意に選定することで、材料自身の吸収端である $\approx 350\text{nm}$ 以上の波長帯のいずれにおいても、自由な位相整合波長を選定することが可能となる。たとえば、青色($\approx 473\text{nm}$)にSHG発生する場合には $\approx 4.7\mu\text{m}$ 、緑色($\approx 532\text{nm}$)の場合には $\approx 7.0\mu\text{m}$ の反転周期が必要となる。また、それ以外にUV領域($< 400\text{nm}$)、光通信の波長領域($\approx 1.5\mu\text{m}$ 帯)、遠赤外領域($\approx 3 \sim 5\mu\text{m}$ 帯)まで拡張した波長変換が可能となる。しかし、上記の周期が数ミクロンオーダーであるために、作成が技術的に困難で、これまで実現されていなかったものである。

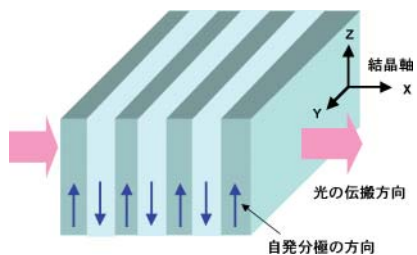


Fig. 1 Basic structure of a periodically poled crystal.

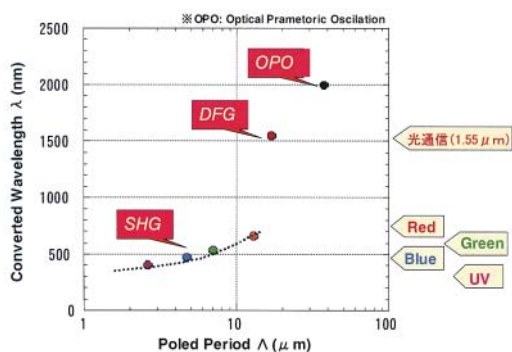


Fig. 2 SHG wavelength dependence on domain period for periodically poled MgO-LiNbO₃.

3. MgO-LiNbO₃反転ドメイン波長変換結晶

自発分極をもつ強誘電体結晶の中で、紫外用を除けば、波長変換結晶としてLiNbO₃、LiTaO₃、KNbO₃、KTiPO₄が1980年代後半までに開発されて、高機能なバルク光学材料としての研究は一段落ついた。この中で、光学材料として実用化されたのは、緑SHG発生用のKTiPO₄、青SHG発生用のKNbO₃と光変調用のLiNbO₃が挙げられる。

これまで、青色波長変換固体レーザの構成は、レーザ結晶としてNd:YAG結晶が、波長変換結晶としてKNbO₃が最も多く用いられてきた^{4) - 6)}。KNbO₃は青用のSHGの波長変換結晶として比較の変換効率が高いが、温度許容範囲が狭いという問題を有し、精密な結晶の温度制御が必要であった。また、946nmで位相整合するために角度位相整合となるために、ウオークオフと呼ばれるSHGのビームが楕円化する問題が生じ、ビーム品質が悪化することが指摘されていた。加えて、結晶の品質に問題が

あり、安定に良質な結晶を確保することに難点があった。

一方、数百mW以下の低出力の緑色波長変換固体レーザは、波長変換結晶としてKTiPO₄が用いられてきた⁷⁾。KTiPO₄はTYPEIIと呼ぶ位相整合する波長変換結晶であり、共振器内で偏光が回転する。このため、KTiPO₄そのものは広い温度許容範囲を有しているが、共振器においてはその位相差を制御するために結晶を温調する必要があり、実質的には温度許容範囲が狭くなってしまふことが難点であった⁸⁾⁹⁾。

これらの問題に対して、当社は高品位、小型の青、緑色波長変換固体レーザを実現するための波長変換結晶として、MgO-LiNbO₃反転ドメイン結晶(periodically poled MgO-LiNbO₃ crystal;以下、PPMGLNと略す)を新規に開発した。MgO-LiNbO₃は高い非線形定数を有するのに加えて、波長350nm以上において透明であり、紫外波長領域までの波長変換が可能である。また、MgO-LiNbO₃は光耐久性に優れた結晶であり、Fig. 3に示すようにLiNbO₃、LiTaO₃比べてMgO-LiNbO₃は、波長473nm、ビーム径30 μm で光出力100mW以上までのArレーザ光に対してもまったく問題なく、十分な光耐久性を有していることを確認している。

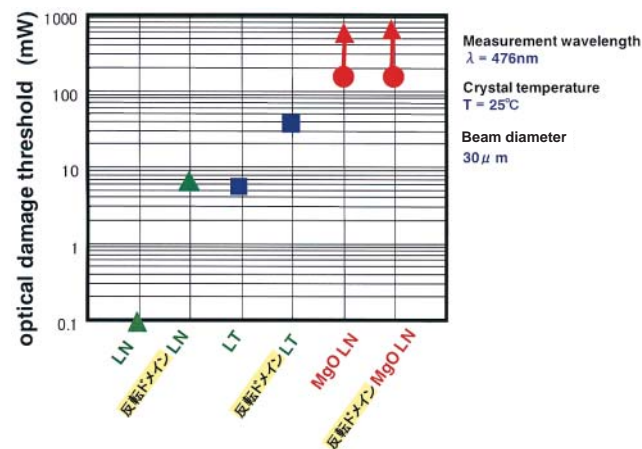


Fig.3 Optical damage threshold of MgO-LiNbO₃, LiNbO₃, LiTaO₃.

4. コロナ帯電法によるMgO-LiNbO₃反転ドメイン形成

これまでに、LiNbO₃、LiTaO₃、KTiPO₄などの強誘電体結晶を用いた幾つかの反転ドメイン結晶作成方法が提案されている^{10) - 13)}。これらの中でも、LiNbO₃、LiTaO₃はもっとも代表的な結晶であり、チョクラルスキー法により3inch径の大型結晶育成が可能三方晶系に属する1軸異方性結晶である。反転ドメインの物理現象自身は、結晶中のLiおよびNb、Taイオンのわずかな変位(0.05 ~ 0.09nm程度)により自発分極の方向が反転する現象であり、外部からの高電界などの作用により局所的な反転が可能である。これまでに、電界印加法、プロトン交換法、電子線照射法により反転ドメインが形成されてきた。特に、高電圧パルスの電界印加法を用いて、LiNbO₃、LiTaO₃結晶で比較的均一な反転ドメインの形成に成功している。

LiNbO₃反転ドメインバルク結晶を用いたシングルパスでのSHGの報告例としては、高出力LD励起Nd:YAGレーザを基本波として、最大450mWの473nm青色出力¹⁴⁾を、最大2.7Wの532nm緑色出力¹⁵⁾が得られている。しかし、いずれの場合も高出力が得られているが、LiNbO₃光損傷を回避するために140°C以上にLiNbO₃を温調しており、高品位、小型のレーザ光源としての実用適性はない。一方、小型、高効率期待できるNd:YAGレーザの内部共振器型波長変換では、532nm緑出力が0.4mW¹⁶⁾得られているに過ぎない。

MgO-LiNbO₃は、LiNbO₃、LiTaO₃に対して光耐久特性に優れ、LiTaO₃、KTiOPO₄に対して大きな非線形光学定数を持つ優れた結晶でありながら、電気導電率が高いために精密周期制御された反転ドメイン形成方法が見出されていなかった。当社では、Fig. 4に示した新規に独自開発したコロナ帯電法により、MgO 5mol %ドーパされたZ方位軸カットMgO-LiNbO₃にて周期均一性に優れた反転ドメイン形成に成功した¹⁷⁾。コロナ帯電による反転ドメインの具体的な作成法は、まず、基板厚0.4mmのZカットMgO-LiNbO₃の+Z面に、青の基本波946nm、緑の基本波1064nmにてそれぞれ室温で擬位相整合するようにTa周期電極をスパッタとリソグラフィーにて形成する。これらのサンプルを、Fig. 4に示すようにコロナ帯電装置にセットする。+Z面のみTa周期電極間を高抵抗に維持するために10⁻⁷ Torrの高真空中に保持し、-Z面に-5.5kVの高電圧を100°Cで2秒間かけ、PPMGLNを作成する。作成したサンプルのY方位軸の断面を光学研磨し、HF:HNO₃ = 1:2の混酸でエッチングした反転ドメイン構造の顕微鏡写真をFig. 5に示した。反転ドメインの核が+Z面側から発生し、-Z面に貫通するまで深さ方向に対して均一な周期の反転ドメインが形成できていることがわかる。また、PPMGLN L=2.0mmでの946nm基本波に対する青色473nm波長変換出力の波長依存性を基本波光源として、Ti:Al₂O₃レーザを用いて測定した。その結果、半値幅は0.6nmで、理論計算値とほぼ一致することが確認できた。このことは、反転ドメインが結晶長方向での周期性が光学的にも均一であることを示唆しており、新規に開発したコロナ帯電法が高品位のMgO-LiNbO₃反転ドメイン形成方法として有効であることが実証された。

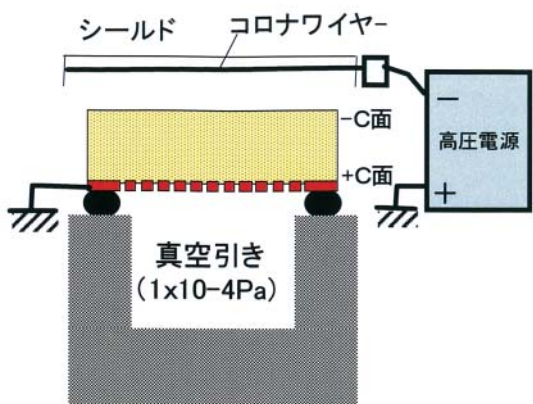


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for the novel corona discharge method.

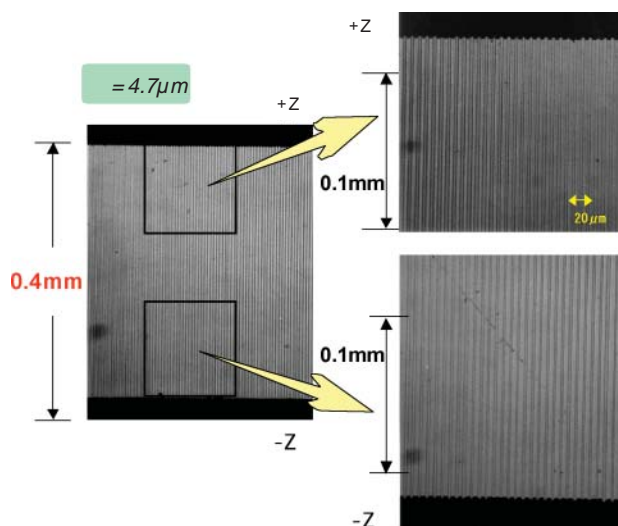


Fig. 5 Optical-microscope image of the Y face-cross section of the bulk domain structure of a 0.4mm-thick periodically poled MgO-LiNbO₃ after chemical etching.

また、高品位、出力安定な青、緑光源の実現を目的として、波長変換結晶の性能としてPPMGLNの位相整合時の広い温度許容範囲にも注目して開発してきた。PPMGLNは、基本波と第二高調波が同一のn_e偏光をとるために、単位結晶長あたりの温度許容範囲が広がる特長も有する。加えて、非線形定数をもっとも大きいd₃₃を用いた実効非線形定数d_{eff} = 21pm/Vが得られるため、アングルカットのKNbO₃ (16pm/V)などに対して高い変換効率を得ることができる。当社は、これらの特長を最大限活かし、高い変換効率を確保しつつ広い温度許容範囲を得るために、PPMGLNの結晶長L=2mmにすることとした。946nm青色対応PPMGLNの青色473nmの結晶長2mmにおける波長変換パワーの温度依存性を測定し、9°C (18°Cmm)の広い温度許容範囲であることが確認できた。これは、これまでのKNbO₃ (4°Cmm)に対して約5倍広い温度許容範囲である。

さらに、KNbO₃結晶は90°分域が生じやすいため散乱損失が多く、また、2光子吸収などによる吸収の影響があるために、共振器内に挿入した場合の内部ロスが0.5%程度と大きい。これに対して、PPMGLNの内部ロスは0.1%以下で、KNbO₃に対して非常に小さい。後述する内部共振器型固体レーザの波長変換の場合、非線形定数の2乗と内部ロスの逆数の2乗に比例するので、PPMGLNはKNbO₃に対して非常に大きな変換効率期待できることも大きな特長のひとつである。

5. 青、緑波長変換固体レーザ

5.1 青、緑色固体レーザの構造と特性

当社独自のPPMGLNの特長を活かした、小型、高品位の青、緑色波長変換固体レーザの構造と特性について以下に述べる。青、緑とも半導体レーザ励起の内部共振器型の固体レーザで、基本構造は同一である^{18),19)}。青色

波長変換固体レーザは、レーザ結晶としてNd:YAG結晶を用いた。励起光源には、発光幅50 μ m、最大出力500mWの当社で独自開発した高出力ワイドストライプ型半導体レーザを用いた。半導体レーザ光をNd:YAG結晶内に集光し、 $\lambda=946$ nmの基本波をレーザ発振させ、PPMGLNによって波長変換し、 $\lambda=473$ nmの青色波長変換光を発生させた。Nd:YAGの前面のフラットミラーと反対側の凹面ミラーの高反射ミラーにより、946nmに対するファブリペローレーザ共振器を形成している。共振器長を10mmとし、共振器内にエタロンを挿入することで完全な縦単一モード動作を容易にし、安定かつ低ノイズ特性を実現した。Fig.6に示すように、高効率、温度許容範囲の広いPPMGLNを用いたことで、半導体レーザとPPMGLNを含む固体レーザ部の同時温度調節が可能となり、同一ペルチェ上には半導体レーザとPPMGLNを含む固体レーザ共振器を配置した構造にすることで、波長変換レーザの寸法41 \times 22 \times 21mm³までの小型化を実現している。また、このことが同時に環境温度に対しても出力、ノイズとも安定な特性をも可能にしている。緑色波長変換固体レーザに用いたレーザ結晶とPPMGLNのスペック以外は、基本的に青色波長変換固体レーザと同様である。基本波を発振させるレーザ結晶として、励起効率のよいNd:YVO₄を用いた。半導体レーザ光でNd:YVO₄を励起して $\lambda=1064$ nmの基本波をレーザ発振させ、PPMGLNによって $\lambda=532$ nmの緑色波長変換光を発生させている。

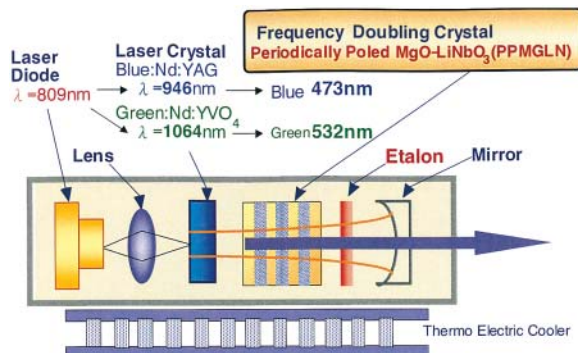


Fig. 6 Basic configuration of the blue and green diode-pumped intracavity frequency doubling solid-state lasers.

青、緑色波長変換固体レーザの諸特性について示す。Fig. 7は、励起LDの駆動電流に対する青、緑それぞれの光出力特性の一例である。青色波長変換固体レーザは、半導体レーザ励起500mW時に青色出力最大17mWが得られ、その変換率は3.4%であった。また、駆動電流変化に対しても常に安定な単一縦モード動作であることを確認した。一方、緑色波長変換固体レーザは励起500mWの時に緑色出力最大90mWが得られ、その変換率は18%であった。

PPMGLN結晶は複屈折による角度位相整合でないため、ウォークオフがなく、ビームは非常に均一なTEM₀₀ガウスビームで、楕円比1:1、ビーム品質を表すパラメータであるM²は1.05と良好であり、光耐久性に問題がないことも改めて確認できた。

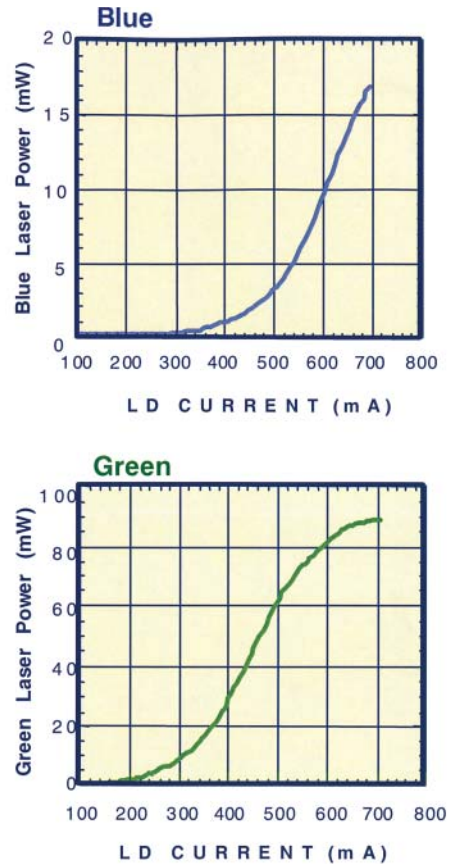


Fig. 7 SH power of intracavity frequency doubling as the function of pumping laser diode (LD) power. SHG: (Second Harmonic Generation).

当社が目的とするシステム機器などに青、緑色固体レーザを搭載するためには、環境温度に対する安定性、保存温度に対する耐久性もきわめて重要である。環境温度を変化させた場合の出力の安定性とノイズ安定性の結果をFig. 8に示す。環境温度は10 $^{\circ}$ Cから45 $^{\circ}$ Cまで変化させた。出力安定性は $\pm 1\%$ 以内、ノイズ安定性は1% rms以内であった。あわせて、ビーム径変動の測定を行い、その変動が $\pm 1\%$ 以下であることも確認した。上記の環境温度範囲の多重サイクル試験を行っても出力安定性、ノイズ特性にまったく影響なく、システムに搭載できる環境特性を持つことを確認した。また、保存温度試験(-25 $^{\circ}$ C \sim 70 $^{\circ}$ C)に対する耐久性も保証されている。

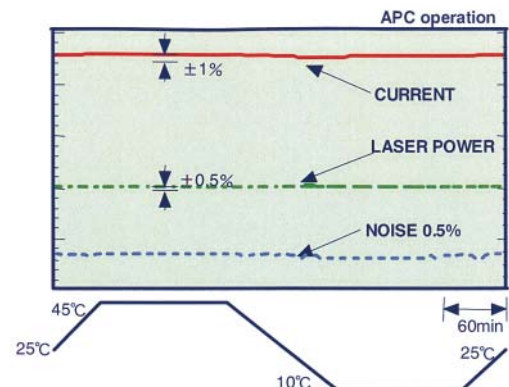


Fig. 8 Temperature stability of blue diode-pumped intracavity frequency doubling solid-state lasers.

5.2 青,緑波長変換固体レーザーの応用展開

これまで述べてきた当社の青,緑色波長変換固体レーザーは,冒頭に述べたように当社のデジタルラボシステム「Frontier」以外にも応用展開されている。バイオ解析分野では,従来のRI(放射性同位元素)を標識マーカーとするRI法に対して,化学発光法や蛍光法などの非RI法が急速に普及しつつある。これまでの励起光源のArレーザー,450nm青色LEDでは放熱,サイズ,励起効率などが問題であった。独自の青,緑色波長変換固体レーザーの搭載により,これらの問題を一気に解決し,Photo 2に示すように,現在,高感度,高分解能の小型軽量の蛍光分析システム「FLA3000」を発売している。



Photo 2 Fluorescent image analyzer FLA3000.

また,印刷分野のデジタルワークフロー時代に対応した,フォトポリマータイプ世界最高速のプレートセッター用の露光光源として,出力250mWの高出力緑色固体レーザーを新たに開発して搭載し,Photo 3に示す「Luxel P-9600」を商品化した。



Photo 3 Platesetter Luxel P-9600.

6. 反転ドメイン波長変換結晶の新たな展開

反転ドメイン結晶は,前述したように,原理的には周期を任意に選定することで,Fig. 2に示したように材料自身の吸収端である $\approx 350\text{nm}$ 以上の波長帯のいずれにおいても自由な波長に波長変換することが可能となる。これまでの青,緑色SHGではそれぞれ周期が $\approx 4.7\mu\text{m}$, $7\mu\text{m}$ であったが,その応用波長域拡大の可能性を広げるために,さらに短周期の紫外波長領域の限界と,長周期の光通信波長帯($1.55\mu\text{m}$ 帯)での周期制御性の高い波長変換素子の基礎検討を行なった。

独自のコロナ帯電法は,光損傷特性に優れる MgO-LiNbO_3 反転ドメインの作成方法として最適な方法であり,周期 $\approx 2.4\mu\text{m}$ の高精細のピッチで波長 $\approx 390\text{nm}$ 帯をねらった高効率の紫外用PPMGLNの作成にも成功した。これにより得られた素子のSHG波長変換効率を評価したところ,従来作製してきた青用PPMGLNと同等の性能指数である 8pm/V が得られた。Table 1に示すように,ポレート系の他の紫外波長域用の波長変換結晶に比べて5倍~10倍の高い変換性能を示した。さらに,周期を $\approx 2.0\mu\text{m}$ 以下まで高精細化することにより,YAG固体レーザーのTHG(Third Harmonic Generation)の355nmの波長域までの波長変換が可能となれば,現在のTHGレーザーの効率,出力を飛躍的に向上することが可能になり,各種露光用光源,半導体プロセスの評価装置,バイオ用の蛍光励起光源などの応用が期待されている。

Table 1 Effective Nonlinear Coefficient of UV Periodically Poled MgO-LiNbO_3 .

位相整合波長: $780\text{nm} \rightarrow 390\text{nm}(\text{SHG})$

UV波長変換結晶	反転周期 (μm)	d_{eff} (pm/V)
PPMGLN	2.4	8.0
BBO	—	1.7
CLBO	—	0.6

一方,長周期の $\approx 17\mu\text{m}$ 近辺を選定することにより,光通信で多用されている波長帯の $1.55\mu\text{m}$ 帯での波長変換への展開も可能になる。光通信分野の大容量伝送に伴う波長の多重化において,波長変換はネットワーク間の光クロスコネクタ装置内のKEYデバイスとして注目されている技術のひとつである。この場合には,これまでに説明したSHGではなく,差周波発生(DFG: Difference Frequency Generation)による波長変換を行なう。差周波発生の原理はFig. 9に示すように,強いポンプ光($\lambda_p=1.56\mu\text{m}$)のSHG($\lambda_s=0.78\mu\text{m}$)と,波長変換したい信号光($\lambda_s=1.57\mu\text{m}$)を反転ドメイン波長変換素子に同時に導波させると,波長変換波($\lambda_c=1.55\mu\text{m}$: $1/\lambda_c=1/\lambda_p-1/\lambda_s$)を発生させることができるものである。

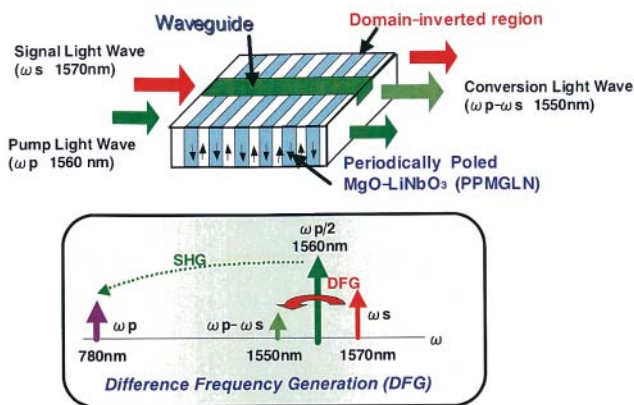


Fig. 9 Wavelength conversion based on DFG used in the optical fiber communication.

これまで他社は、ノンドープのLiNbO₃を用いたDFG素子を開発してきたが、変換効率をアップさせるためにポンプ光強度をアップすると光損傷により効率が飽和することが問題視されていた。当社では、「Frontier」用に開発した光損傷に強いMgO-LiNbO₃反転ドメイン技術を進展させた素子の要素を検討している。ノンドープLiNbO₃のDFG素子では、ポンプ光強度20mWレベルで変換効率が飽和するのに対して、MgO-LiNbO₃の素子では最大ポンプ光強度の律速で、80mWでも効率の飽和は見られないことを原理的に確認した²⁰⁾。今後、光通信の情報容量が飛躍的に増大したときのKEYデバイスとしての展開が期待される。

7. まとめ

当社は、光損傷特性に強いMgO-LiNbO₃結晶を用いて、独自に開発したコロナ帯電法により、473nm青色及び532nm緑色に対応した均一な周期ドメイン反転構造を有する波長変換素子のMgO-LiNbO₃反転ドメイン結晶(PPMGLN)の開発に成功した。これらの反転ドメイン結晶を用い、半導体レーザー励起内部共振器型波長変換固体レーザーを開発し、最大光出力青色17mW、緑色90mWの高効率なレーザー出力を得た。この波長変換固体レーザーはMgO-LiNbO₃反転ドメイン結晶を用いたことにより、1)高変換効率、2)同時温調による小型化、安定化、3)高いビーム品質を実現した。

この独自の高性能、小型青、緑色波長変換固体レーザーを、銀塩感材にレーザー走査露光するラボ用デジタルフルカラープリントシステム「Frontier」、分子生物学用多目的蛍光画像解析システム「FLA3000」、および印刷用プレートセッター「Luxel P-9600」に搭載し、Keyデバイスとしてシステムの飛躍的な性能向上に貢献した。

また、ドメイン反転結晶の周期を任意に制御することで、紫外領域(>350nm)から光通信の波長領域までの波長拡大の可能性を原理的に確認し、新たな応用展開の可能性を示した。

参考文献

- 1) 大谷薫明, 梅本真, 松本正幸. 富士フィルム研究報告. No.42, 1 (1997).
- 2) 小澤良夫ほか. 富士フィルム研究報告. No.45, 3 (2000).
- 3) J. A. Armstrong; N. Bloembergen; J. Ducuing; P. S. Pershan. Phys. Rev. 127, 1918 (1962).
- 4) W. P. Risk; R. Pon; W. Lench. Appl. Phys. Lett. 54, 1625-1627 (1989).
- 5) G. J. Dixon; Z. M. Zhang; R. S. F. Chang; N. Djev. Opt. Lett. 13, 137-139 (1988).
- 6) G. Hollemann; E. peik; H. Walther. Opt. Lett. 19, 192-194 (1994).
- 7) T. Baer. Opt. Soc. Amer. B 3, 1175 (1986).
- 8) 永井秀夫, 桑雅弘, 太田一成, 清水裕一. レーザ学会研究会報告. RTM-90-38, 13 (1990).
- 9) M. Oka; S. Kubota. Opt. Lett. 13, 807-809 (1988).
- 10) S. Thaniyavarn; T. Findakly; D. Booher; J. Moen. Appl. Phys. Lett. 46, 933-935 (1985).
- 11) K. Mizuuchi; K. Yamamoto; H. Sato. J. Appl. Phys. 75, 1311-1315 (1994).
- 12) M. Gupta; W. P. Risk; A. C. G. Nutt; S. Dlau. Appl. Phys. Lett. 63, 1167-1169 (1993).
- 13) Q. Chen; W. P. Risk. Electron. Lett. 30, 1516-1517 (1994).
- 14) M. Pollnau; Q. W. Ross; W. A. Clarkson; P. G. R. Smith; P. E. Britton; D. C. Hanna. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO '97) postdeadline papers. CPD32 (1997).
- 15) G. D. Miller; R. G. Bachko; W. M. Tulloch; D. R. Weise; M. M. Fejer; R. L. Byer. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO '97) OSA Technical Digest Series, Paper CTuB2 (1997).
- 16) V. Pruneri; J. Webjorn; P. St. J. Russell; J. R. M. Barr; D. C. Hanna. Opt. Com. 116, 159-161 (1995).
- 17) A. Harada; Y. Nihei. Appl. Phys. Lett. 69, 2630-2632 (1996).
- 18) A. Harada; Y. Nihei; Y. Okazaki; H. Hyuga. Opt. Lett. 22, 805-807 (1997).
- 19) 原田明憲, 岡崎洋二, 神山宏二. レーザ研究. 26, 861-868 (1998).
- 20) B. Zhou; C. Q. Xu; B. Chen; Y. Nihei; A. Harada. Jpn. J. Appl. Phys. 40, L796-L798 (2000).

(本報告中にある“Luxel”は富士写真フイルム(株)の商標です。)