

単一偏波ファイバレーザを用いた波長変換技術とその応用

光応用製品事業推進室 高橋尚平¹・堀本啓一¹・嶋津啓介¹・金子亨¹・
西村文比古²・石橋健一²・金田恵司³
株式会社青森フジクラ金矢 福士智己⁴

Wavelength Conversion Technology utilizing Linearly-Polarized Fiber Laser and its Application

S. Takahashi, K. Horimoto, K. Shimadu, T. Kaneko, F. Nishimura, K. Ishibashi, K. Kaneda,
and T. Fukushi

近年、ディスプレイやバイオ分析、医療の分野において、波長変換技術を用いた可視および紫外域の高出力レーザ光源が注目されている。高い変換効率を得るためには、波長変換素子内の高いパワー密度が要求されるため、高出力かつ高ビーム品質なファイバレーザは、波長変換用の基本波光源として適している。そこで当社ではファイバレーザを用いた波長変換レーザ光源を開発し、可視および紫外域の高出力レーザ光源を実現した。

At the recent, the visible and ultraviolet high-power lasers utilizing wavelength conversion technologies have received considerable attention in the display, biotechnology and medical fields. To acquire high wavelength conversion efficiency, the fiber lasers with high output power and high beam quality are well suited as fundamental light sources. We have developed novel visible and ultraviolet high-power lasers by using linearly-polarized fiber lasers.

1. ま え が き

近年、可視および紫外域のレーザ光源は、レーザ加工およびマーキングだけではなく、レーザテレビやレーザプロジェクタなどのディスプレイ用途、フローサイトメータやDNAシーケンサなどのバイオ分析機器用途、さらに眼科治療などの医療機器用途など、新規分野において注目されており、その市場は拡大している。しかし、可視域の中でも緑色から橙色までの波長 500 nm～600 nm 帯は、半導体レーザでの直接発振が難しいことから、高価で大型な色素レーザなどが利用されていた。そこで固体レーザによって発振させた波長 1000 nm～1200 nm 帯の基本波を、非線形光学効果のひとつである第二高調波発生 (SHG: Second Harmonic Generation) により、波長 500 nm～600 nm 帯の高調波に変換するための技術開発が活発に行われている¹⁾。

波長変換には非線形光学結晶が用いられるが、特に周期分極反転を利用した疑似位相整合 (QPM: Quasi Phase Matching) 波長変換素子は、その簡便さなどから広く検討されている²⁾。代表的なものとしては、非線形

光学定数が大きく、波長 300 nm～4500 nm 帯の紫外から赤外域まで透明性をもつ周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled LiNbO₃) や周期分極反転タンタル酸リチウム (PPLT: Periodically Poled LiTaO₃) がある。

高出力可視光源の実用化を考えた場合、高出力時に起こる光損傷 (フォトリフラクティブ効果) への耐性³⁾ や光源全体での発光効率、サイズなどが課題となる。PPLN や PPLT の耐光性は、結晶組成を調整し酸化マグネシウム (MgO) を添加することで大きく改善されており、QPM 波長変換素子を使用することで、シンプルなモジュール構成設計で高い波長変換効率を得ることが可能となる。

SHG において高い変換効率を得るためには、高いパワー密度が必要であり、高出力かつ高ビーム品質な基本波が重要となる。また QPM 波長変換素子は異方性をもつため、単一の直線偏波であることも求められる。

当社で開発しているファイバレーザは、高ビーム品質かつ単一偏波での高出力発振が可能であり、集光性も良いため、QPM 波長変換素子用の基本波光源として最適である⁴⁾。また既存の固体レーザに比べ利得帯域が広いいため、固体レーザでは困難な波長で発振させることが可能なおうえ、電力効率、スペース効率、信頼性、メンテナンス性、デリバリティに優れており実用性が非常に高い。

1 設計開発部

2 設計開発部 主席技術員

3 設計開発部部长

4 光部品課

当社では以前からファイバレーザの優位性に着目し、波長変換に特化したファイバレーザの開発を行ってきた。今回さらに実用的な波長変換モジュールの設計を行い、波長変換用の単一偏波ファイバレーザを基本波とした可視および紫外域の高出力連続波レーザ光源を開発したので、その成果を報告する。

2. 波長変換用単一偏波ファイバレーザ

図1に波長変換用単一偏波ファイバレーザの基本構成を示す。励起用半導体レーザは、コンバイナによって偏波保持ファイバで構成された共振器に接続される。共振器は高反射ファイバブラッググレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) と低反射FBGにより増幅媒体であるイッテルビウム (Yb: Ytterbium) 添加ファイバとファイバ型偏光子を挟むように構成されている。ファイバ型偏光子は、通常の偏波保持ファイバに比べ応力付与部とコアとの間隔を狭くすることで、直交する2つの偏波間の曲げ損失の差が大きくなるように設計されている。これによりファイバに最適な曲げを加えることで、損失の小さい片側の偏波成分のみ発振させることが可能となり、偏波消光比 20 dB以上を達成している⁵⁾。また低反射FBGの反射スペクトルを狭帯域に設計することで、最大出力における半値幅は 0.08 nm以下に制御されており、さらに低反射FBGの反射率とYb添加ファイバの長さを最適化することにより出力 40 W以上、励起光-出力光変換効率 60 %以上の波長変換用単一偏波ファイバレーザを実現している。

3. 波長変換モジュール

3.1 基本構成

図2に波長変換モジュールの基本構成を示す。波長変換モジュールは、QPM波長変換素子と、基本波をQPM波長変換素子に集光し、発生した高調波を出力用ファイバに結合するための光学系、基本波と高調波を分離する波長分割フィルタで構成される。

変換効率は、波長変換素子内部における基本波のパワー密度に依存しており、ファイバレーザから入力された基本波を集光させパワー密度を高くすることで効率を向上させている。しかし、過度に集光角を大きくするとビ

ームウエストでのパワー密度は高くなるが波長変換素子の入出力端面でのパワー密度は低くなるため、結果的に長手方向全体での変換効率は低下してしまう。そのため高い変換効率を得るためには、波長変換素子の長さに応じて集光角を最適化する必要がある。

また、高い変換効率の実現には位相整合が必要不可欠である。QPM波長変換素子による位相整合条件は、波長変換素子の温度によって変動するため、ペルチェ素子により 0.01 °C単位で温度制御を行っている。しかし、出力が高くなるにしたがって、波長変換素子の光吸収による発熱が大きくなり、波長変換素子内部の温度が位相整合温度からずれることで変換効率が低下してしまう。よって高出力時の発熱を考慮した温度設定が必要となる。さらに高調波の強度分布は波長変換素子長手方向に勾配をもつため、熱分布も同様の勾配となり、変換効率が低下する要因となる。これに対し波長変換素子内のビームウエスト位置を調整し、熱勾配を抑制することで変換効率の低下を最小としている。

波長変換素子の光吸収は、変換効率の低下だけではなく素子自体の破壊も引き起こすため、高調波の最大出力は波長変換素子の耐光特性によって制限を受ける。波長変換素子の耐光性向上のための開発は多く行われているが、数十ワットクラスの高出力化を考えた場合、十分な特性のものは確立されていない。よって高出力化を進めるためには、基本波の入力に合わせてビーム径を調整することで、パワー密度を波長変換素子の損傷閾値以下に維持する必要があり、最大出力と変換効率はトレードオフの関係となっている。

図3に緑色レーザ光源試作機の外観を示す。基本構成における緑色レーザ光源の実績としては、基本波

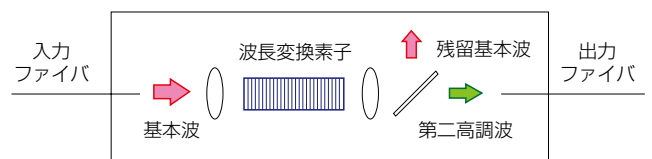


図2 波長変換モジュールの基本構成
Fig. 2. Basic configuration of wavelength conversion module.

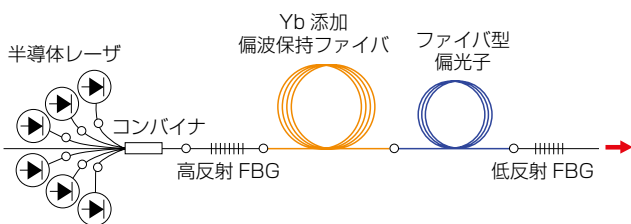


図1 波長変換用単一偏波ファイバレーザ基本構成
Fig. 1. Basic configuration of Linearly-Polarized Fiber Laser for wavelength conversion.

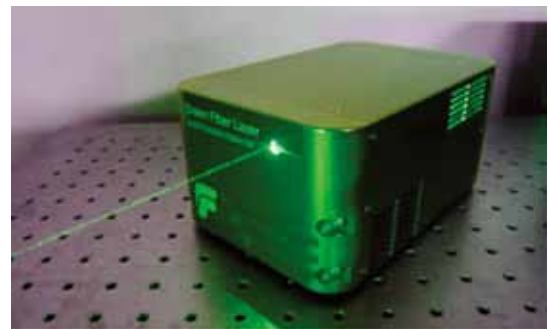


図3 空間出力緑色レーザ光源
Fig. 3. Space output green light source.

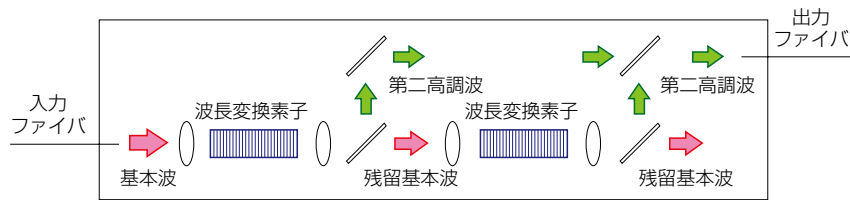


図4 直列二段型波長変換モジュール構成

Fig. 4. Configuration of two steps of series type wavelength conversion module.

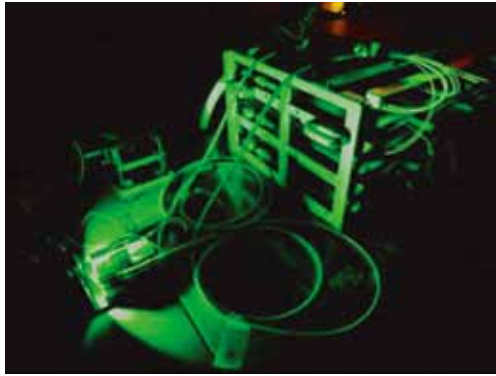


図5 高出力緑色レーザ光源試作機外観

Fig. 5. Appearance of developed high-power green laser light source.

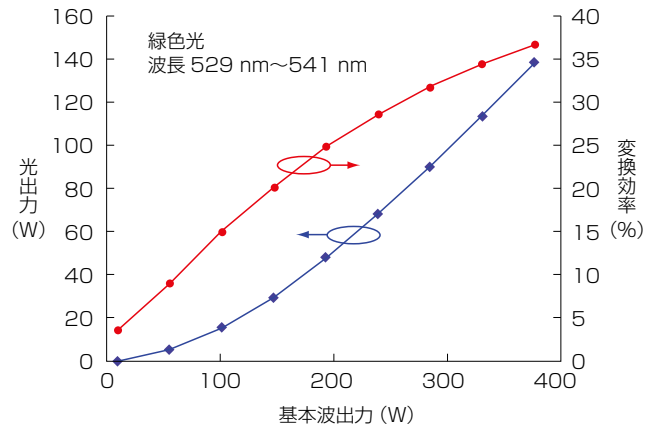


図6 高出力緑色レーザ光源試作機の実出力特性

Fig. 6. Output property of developed high-power green laser light source.

1064 nmをSHGによって高調波 532 nmに変換することで、最大空間出力 8.5 W、変換効率 25 %以上を達成している。

3. 2 直列二段構成

高出力と高効率を両立させるため、QPM波長変換素子2個を直列に配置した波長変換モジュールの開発を行った。図4に直列二段型波長変換モジュールの構成を示す。一段目の波長変換素子で変換されなかった残留基本波を、二段目の波長変換素子に入射させて再度波長変換を行うことにより、高出力かつ高効率な波長変換モジュールを実現した。一段目の波長変換素子から出射される残留基本波の強度分布は、高調波の発生にともない変化するため、二段目の波長変換素子への集光角と集光位置はその変化を考慮し最適化を行っている。さらに各波長変換素子の長さを調整し、各パワー密度をほぼ同等にすることで、各波長変換素子の光損傷に対する負荷を均等にでき、その結果最大出力の向上が可能となっている。また各QPM波長変換素子から発生する高調波は単一偏波であるため、偏波合成することで1本のファイバに結合して出力することが可能となる。

4. 波長変換レーザ光源の適用例

4. 1 ディスプレイ用緑色レーザ光源

波長 530 nm~540 nm帯の高出力緑色レーザ光源は、高輝度、高コントラスト、高色再現性、低消費電力などの利点から、ディスプレイ分野において注目されている。特に3Dデジタルシネマやプロジェクションマッ

ピングなどで使用されるプロジェクタ用光源は高出力化が求められており、現在主流のランプ光源に代わる次世代光源として非常に期待されている^{6) 7)}。しかし、レーザ光源は可干渉性が高く、スペックルと呼ばれる干渉模様が発生するため、画質が低下するという問題があることが知られており、その対策が大きな課題となっている⁸⁾。

スペックル低減技術の開発は盛んに行われ種々提案されているが^{9) 10)}、そのひとつにレーザ光源のスペクトル幅を広げることで可干渉性を抑制する手法がある¹¹⁾。高調波出力のスペクトル幅は、基本波に依存するため、基本波のスペクトル幅を広げることで広帯域化が可能である。しかし基本波のスペクトル幅を広げることは、ファイバレーザの発振効率および波長変換モジュールの変換効率の低下を招くため実用的ではない。そこでファイバレーザの広い利得帯域を利用し、波長の異なる複数の高調波により疑似的な広帯域光源を形成することでスペックルの低減を実現させた。

図5に多波長高出力緑色レーザ光源試作機の外観を示す。反射波長の異なる複数のFBGを用い、波長1058 nm~1082 nm帯のファイバレーザ13台を組み立て、SHGにより波長529 nm~541 nm帯に1 nm間隔13波長の広帯域緑色レーザ光源を製作した。図6に出力と変換効率の特性、図7に波長スペクトルを示す。各々の波長変換には直列二段型波長変換モジュールを用いており、1波長あたり最大ファイバ出力10 W、13波長で総出力130 Wを達成した。最大出力時の電気-光

変換効率は 10 % 以上を達成しており、十分に実用的なレベルとなっている。

各波長変換モジュールからの出力ファイバは、当社保有のファイババンドル技術により束ねられ、1 つの出力ポートから照射される。ファイババンドルを用いることで、照射光は各波長 13 個の出射点から発生する独立したスペックルの総和として平均化されるため、より高いスペックル低減効果を得ることが可能となる。

4. 2 バイオ分析機器用紫外レーザー光源

細胞などの解析ターゲットにレーザー光を照射し、散乱光や蛍光を測定することで各種情報の検出および分取を行うフローサイトメータやセルソータ、DNA シーケンサなどのバイオ分析機器は、1 台に対して紫外から可視域で異なる波長の固体およびガスレーザー光源が 3~7 台搭載されるため装置が大型となる。複数のレーザー光をターゲットまで導光するための光学系の光軸調整は非常に困難であり、外乱による光軸ずれが起こるため、校正が頻繁に必要となる。よって小型でデリバリ性の良いレーザー光源が求められており、特に現状高価な紫外レーザー光源の低コスト化が期待されている¹²⁾。

ファイバレーザはビーム品質が高いため、基本波に用いたときに発生する高調波のビームも高品質となる。よってファイバへの結合が容易であり、ファイバによる伝送が可能となるメリットがある。また固体レーザに比べ

高効率で発熱が小さく、冷却装置等がシンプルになるため、光源全体として低コストでコンパクトな設計が可能となる。また一般的に高出力の紫外光をファイバで導光すると、ガラス中に生成された欠陥によって透過率が低下する問題があるが、当社保有技術である耐紫外線ファイバを利用することで、高い信頼性をもつ紫外レーザー光源を実現している。

図 8 に紫外レーザー光源用の波長変換モジュール構成を示す。直列二段型構成を基本とし、新たに和周波発生(SFG: Sum Frequency Generation)を応用することで紫外光の発生を試みた。一段目の波長変換素子に波長 1064 nm の基本波を入力し、SHG によって発生した緑色光 532 nm と変換されなかった残留基本波 1064 nm を合わせて、二段目の波長変換素子に入力することで SFG が起こり、基本波の約 3 分の 1 となる波長 354.6 nm の紫外レーザー光を実現している。

図 9 に紫外レーザー試作機の外観、図 10 に出力特性を示す。集光角やビームウエスト位置、変換素子長の最適化により、偏波保持シングルモードファイバへの結合効率は 45 % 以上となり、ファイバ出力 20 mW 以上という高出力を達成した。

4. 3 医療機器用レーザー光源

眼科治療などの医療分野において、波長 570 nm ~ 600 nm 帯である黄色および橙色の固体レーザー光源が多く実用化されている。さらに高出力かつ高ビーム品質なレーザー光源が期待されており、高出力黄色レーザー光源の試作を行った。

Yb 添加ファイバを用いたファイバレーザの利得帯域は、波長 1000 nm ~ 1200 nm と非常に広く、黄色から橙色までのレーザー光源を作製するために必要な波長 1140 nm ~ 1200 nm での発振が可能である。しかし、波長 1140 nm ~ 1200 nm 帯で発振させた場合、より利得が大きい波長 1030 nm ~ 1100 nm 帯において寄生発振が起こり、発振状態が不安定になるため高出力化が非常に困難となる。そこで当社ではフォトニックバンドギャップファイバを用いることで寄生発振を抑制し、波長 1160 nm ~ 1200 nm での高出力発振を実現してきた¹³⁾。

今回は実用化を見据え、基本構成の波長変換用単一偏波ファイバレーザを利用して黄色レーザー光源の作製を試みた。低反射 FBG の反射率を高くして共振器内の利得を上げることで、発振効率が多少低下するものの、寄生発振を抑制することができ、波長 1140 nm ~ 1160 nm

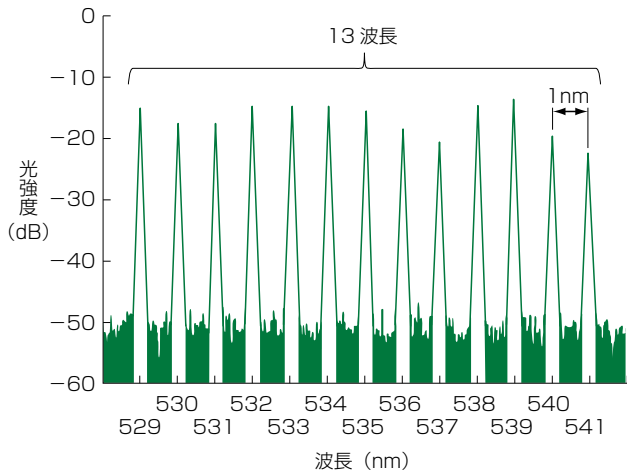


図7 ディスプレイ用高出力緑色レーザー光源試作機のスペクトル
Fig. 7. Spectra of developed high-power green laser light source for display.

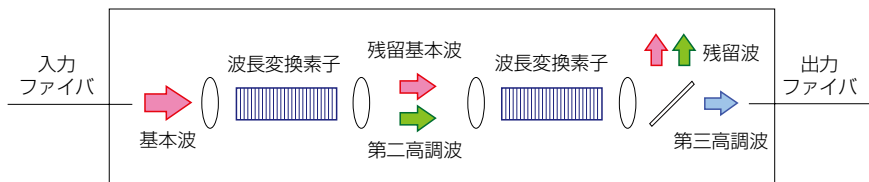
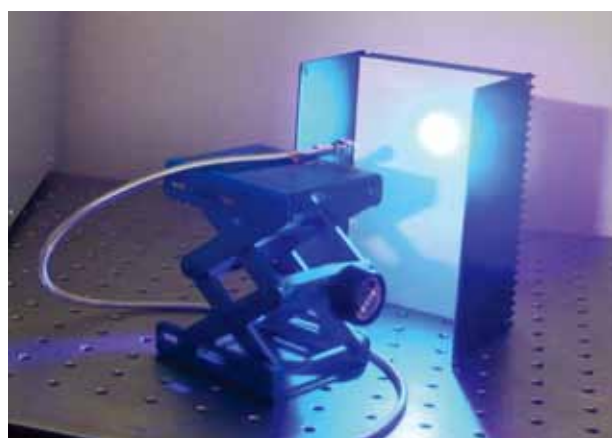


図8 紫外レーザー光源における波長変換モジュール構成
Fig. 8. Configuration of wavelength conversion module for ultraviolet laser light source.



(a) 本体外観
(a) Appearance of ultraviolet laser light source.



(b) 照射試験
(b) Ultraviolet light generation.

図9 紫外レーザ光源試作機
Fig. 9. Prototype of ultraviolet laser light source.

帯において高出力で発振できることを確認した。図 11 に高出力黄色レーザ光源の出力特性を示す。基本波 1144 nm を用い SHG により高調波 572 nm を発生させた。空間出力は 4.5 W 以上を達成しており、実用化を考えても十分な出力が得られている。

さらに誘導ラマン散乱 (SRS: Stimulated Raman Scattering)¹⁴⁾ を利用することで、波長 1200 nm 以上のレーザ発振を試みた。波長 1144 nm のファイバレーザを励起光源としてラマン共振器を構成することで、ラマンシフト 68 nm となる波長 1212 nm での発振に成功し、SHG により波長 606 nm の赤色レーザ光源を実現することができた。

5. む す び

当社設計の波長変換用単一偏波ファイバレーザを基本波とする波長変換レーザ光源の開発成果について報告した。波長変換用単一偏波ファイバレーザには、偏波保持

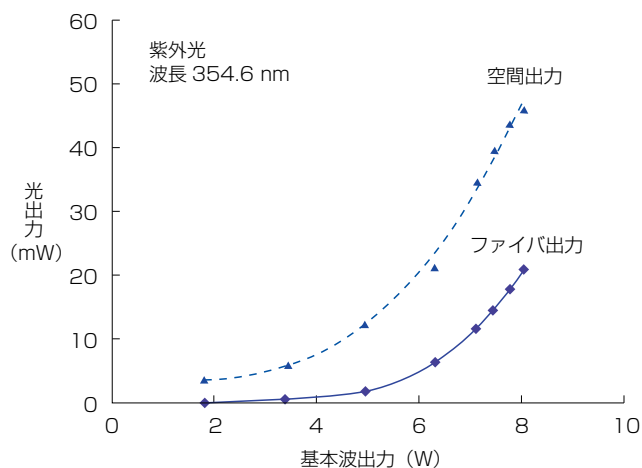


図10 紫外レーザ光源試作機における出力特性
Fig. 10. Output property of ultraviolet laser light source.

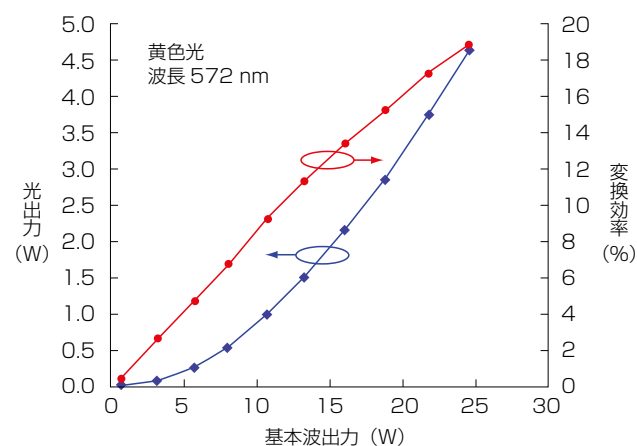


図11 高出力黄色レーザ光源試作機の出力特性
Fig. 11. Output property of developed high-power yellow laser light source.

ファイバ、ファイバ型偏光子、FBG等、当社が保有する独自の技術が多く用いられており、波長変換モジュールと組み合わせることで、さらに独自性をもった高付加価値製品の実現が可能であることを確認した。

今後もさらにレーザ光源の波長多様化に関する開発を進め、新規分野において積極的に応用することで、社会に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) S. V. Tovstonog, et al.: "Thermal effects in high-power CW second harmonic generation in Mg-doped stoichiometric lithium tantalate," Optics Express, Vol.16, No.15, 21 July 2008
- 2) 宮澤信太郎ほか：分極反転デバイスの基礎と応用，オプトロニクス社
- 3) 佐藤正純ほか：「非コングレント組成 LiNbO₃ 単結晶と LiTaO₃ 単結晶の耐光損傷特性」, 日本結晶成長学会誌

- 20 (3) , 273-280, 1993-09-25
- 4) G. K. Samanta, et al.: "Stable, 9.6W, continuous-wave, single-frequency, fiber-based green source at 532 nm," *Optics Letters*, Vol.34, No.10, May 15, 2009
 - 5) 柏木正浩ほか:「高効率単一偏波ファイバレーザ」, フジクラ技報, Vol.2, No.117, 2009
 - 6) 川上一郎:「Digital Cinema Now! 第64回 “もっと明かりを!”」, *Full Digital Innovation*, Vol.154, pp.44-46, 2012.7
 - 7) 井上憲人:「レーザーシアターを射程内に収めた緑色光源」, *Laser Focus World Japan*, pp.44-46, 2008.9
 - 8) 久保田重夫:「スペckル測定とその低減デバイス」, 応用物理学会分科会日本光学会, *光学*, Vol.39, No.3, pp.149-158, 2010.3
 - 9) Victor Yurlov, et al.: "Speckle suppression in scanning laser display," *Applied Optics*, Vol.47, Issue2, pp.179-187, 2008
 - 10) Zhaomin Tong, et al.: "Speckle reduction by angle diversity using a translucent spatial light modulator," *Optica Applicata*, Vol.42, No.3, pp.651-658, 2012
 - 11) Dmitri V. Kuksenkov, et al.: "Multiple-wavelength synthetic green laser source for speckle reduction," *Proc. SPIE*, Vol.7917, pp.79170B-1-79170B-12, 2011
 - 12) Kiminori Mizuuchi, et al.: "Efficient Second-Harmonic Generation of 340-nm Light in a 1.4- μ m Periodically Poled Bulk MgO:LiNbO₃," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, pp. 90- 91, February 2003
 - 13) 柏木正浩ほか:「偏波保持フォトリックバンドギャップファイバを用いた1180 nmファイバレーザ」, フジクラ技報, Vol.1, No.120, 2011
 - 14) R. H. Stolen, et al.: "Raman response function of silica-core fibers," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol.6, Issue6, pp.1159-1166, 1989