

## 1.序論

ファイバーレーザーは固体レーザーに比べ様々な利点を持つ。現在ファイバーレーザーの高出力化が進んでいるが、様々なレーザー応用に用いるためには、偏光度の単一偏光化や、スペクトルの狭帯化などが必要である。特にファイバーレーザーの単一偏光化は高効率波長変換やコヒーレントビーム結合において重要な課題である。そこで、PANDA 型 Yb 添加ダブルクラッドファイバー (PM-YbDCF) 及びインライン偏光子を用いて、出力 10W で単一偏光、また後に述べる第二高調波発生も考慮に入れ、スペクトルのバンド幅 0.2nm 以下のファイバーレーザーの開発を行う。

また、次世代ディスプレイ用光源、あるいは高密度光記録用光源、固体レーザー励起用光源として短波長のレーザー光源の開発が盛んである。短波長を実現する一つの手段として、非線形光学結晶を用いて第二高調波を発生する方法がある。今回周期分極反転 MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgOLN) を用いて擬似位相整合を行う事により、1064nm の第二高調波である 532nm の緑色光を発生させる。

以上のことから本研究は、1064nm における単一偏光 Yb 添加ファイバーレーザーの開発を行い、またそれを利用して第二高調波である 532nm の緑色光への変換を目的としている。

## 2.原理

### 2.1 PANDA ファイバー

様々な偏波保持光ファイバーが提案されてきたが、PANDA ファイバーは、耐偏波ストローク特性に優れていることに加え、比較的 low 損失と言う特徴を有しており、偏波保持光ファイバーの主流となっている。PANDA ファイバーはコアの両側に円形の応力付与部が配置されている。PANDA ファイバーは基本的にはシングルモードファイバー (SMF) であるので通常の SMF と同様に伝送損失、カットオフ波長、モードフィールド径に加えて偏波保持光ファイバー特有の複屈折率と偏波クロストーク特性が重要な特性となる。また、光学部品として使用されるので融着特性が重要な特性である。PANDA ファイバーは温度変動や捻りや曲げなどの機械的外乱に対しても十分な偏波保持特性を有している。

### 2.2 インライン偏光子

今回使用したインライン偏光子は信光社との共同研究によって得られたもので、TiO<sub>2</sub>の複屈折性を利用しており、偏波消光非 (PER) は 6dB である。従来のインライン偏光子の耐久性が 300mW なのに対し、本実験で用いたインライン偏光子は 5W と非常に高い耐久性を示している。インライン偏光子温度上昇の出力特性を図 2.2-1 に示す。出力 10.65W 時にインライン偏光子にかかっているパワーは 2.03W であり、温度は 10 近く上昇したが、動作に不安定性は見られなかった。

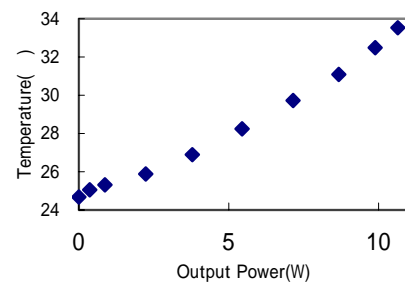


図 2.2-1 インライン偏光子の温度上昇

### 2.3 擬似位相整合

複屈折による位相整合法は等方性媒質では利用できない。また、媒質の最も大きな非線形光学定数要素を利用できることも限らないことや、ウォークオフなどの欠点もある。こうした複屈折位相整合の不自由さを回避する巧妙な方法が擬似位相整合である。図 2.3-1 に擬似位相整合の出力光強度の推移を示す。図に示すように、位相整合のとれていない媒質をコヒーレンス長ごとのセグメントに区切り、分極の符号を交互に反転させることによって、擬似位相整合が達成される。コヒーレンス長は

$$l_c = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\lambda}{4(n_2 - n_1)} \quad \dots (2.3-1)$$

と表される。また、擬似位相整合において非線形光学定数は、

$$d_{\text{eff}} = \frac{2d}{\pi} \quad \dots (2.3-2)$$

と最適化される。

基本波から第二高調波への変換効率は、

$$\eta = \frac{P(2\omega)}{P(\omega)} = \left( \frac{2\omega^2 d_{\text{eff}}^2}{\pi n_\omega n_{2\omega} \epsilon_0 c^3} \right) P_\omega L k_\omega h(B, \xi) \dots (2.3-3)$$

と表される。L は結晶の長さ、 $h(B, \xi)$  は Boyd and Kleinman 因子である。

また、位相整合をとるための最適ビーム径があり、図 (2.3-2) に示した Boyd and Kleinman 曲線によって表される。

横軸  $\xi$  は、

$$\xi = \frac{L}{b} = \frac{\lambda L}{2\pi n_e \omega_0^2} \dots (2.2-4)$$

であり、非線形結晶の長さ $L$ と波長 $\lambda$ を固定すると、ビーム半径  $b$  のみによって変化する。B は分子に複屈折角  $\theta$  をもち、擬位相整合の場合  $\theta = 0$  となる。

また位相整合のとれる基本波スペクトルのバンド幅は

$$\delta\lambda = \frac{0.4429\lambda}{L} \left| \frac{n_2 - n_1}{\lambda} + \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} \right|^{-1} \dots (2.3-5)$$

と表され、結晶の長さ $L$ が 10mm、20mm の場合のスペクトルの許容バンド幅は互いに 0.212nm、0.106nm である。

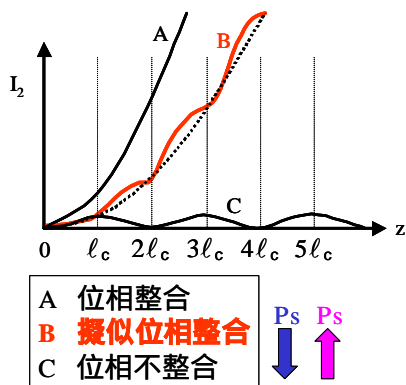


図 2.3-1 擬位相整合

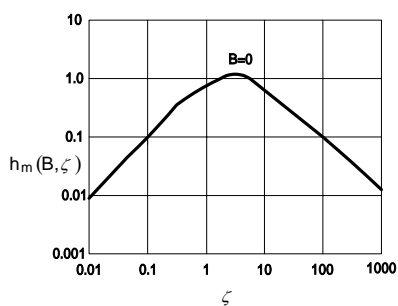


図 2.3-2 Boyd and Kleinman 曲線

### 3.単一偏光ファイバーレーザーの開発 (バルク偏光子)

バルク偏光子を用いた単一偏光 Yb 添加ファイバーレーザーの開発の実験装置を図 3-1 に示す。励起光源としてファイバー結合 LD を使用した。レンズは、ファイバー結合 LD からの出射光が、PM-YbDCF の第 1 クラッドに入るように、各ファイバーのコア径、クラッド径、NA (開口数) を考慮して設計した。ファイバー結合 LD からの出射光を一つ目のレンズでコリメートし、コリメー

トされた光を集光し PM-YbDCF に入射させるために二つ目のレンズを使用した。また、PM-YbDCF からの戻り光が、ファイバー結合 LD に入射されないように、ダイクロイックミラーを使用した。

このとき FBG とアウトプットカップラー (1° のウェッジ基板) によって共振器が組まれている。ダイクロイックミラーとアウトプットカップラーの間にバルク型の偏光子を配置した。

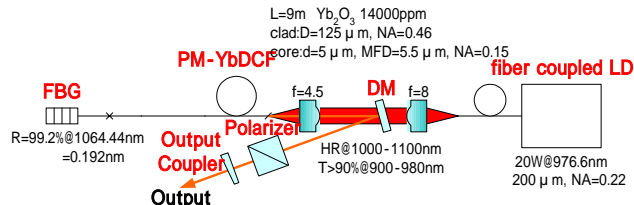


図 3-1 単一偏光ファイバーレーザー (バルク偏光子)

このときの出力特性を図 3-2 に示す。最大出力 9.42W で、目標としていた 10W には届かなかった。

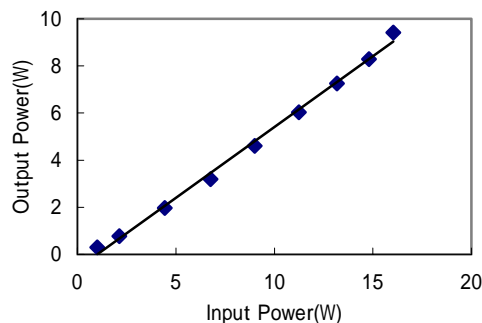


図 3-2 出力特性 (バルク偏光子)

また、このときのスペクトルと PER をそれぞれ図 3-3、3-4 に示す。スペクトルの半値全幅 (FWHM) は 0.078nm と非常に狭い値を示したが、絶対波長が不安定であった。PER は最大出力時 21.9dB と非常に高い値を示した。

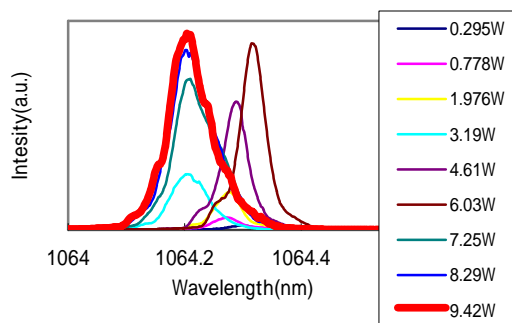


図 3-3 発振スペクトル (バルク偏光子)

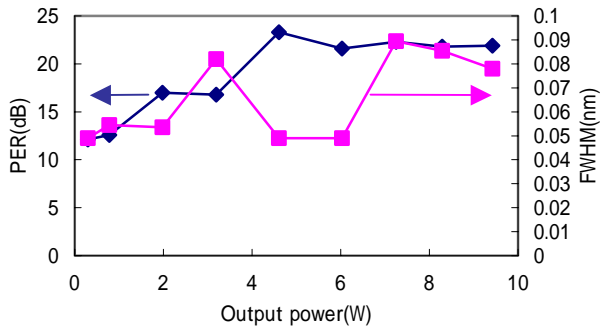


図 3-4 PER と FWHM の出力特性(バルク偏光子)

#### 4.単一偏光 Yb 添加ファイバーレーザーの開発 (インライン偏光子)

バルク偏光子を用いた実験では、出力が 10W には届かず、また発振スペクトルの絶対波長にも不安定性が見られた。そこで、次にインライン偏光子を用いて全ファイバー型単一偏光 Yb 添加ファイバーレーザーの開発を行った。実験装置を図 4-1 に示す。実験装置は先程とほぼ同じ物を使用しているが、バルク偏光子とアウトプットカップラーを外し、Yb-DCF と FBG の間には原理で述べたインライン偏光子 (信光社) を融着した。このとき、FBG と PM-YbDCF の端面とで共振器が組まれている。

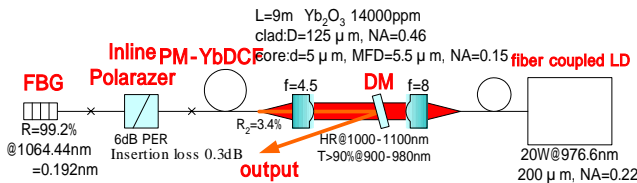


図 4-1 単一偏光ファイバーレーザー(インライン偏光子)

このときの出力特性を図 4-2 に示す。最大出力 11.97W と目標としていた 10W を上回ることに成功した。光光変換効率は 75%、スロープ効率 80% とどちらもバルク偏光子の場合を上回っている。

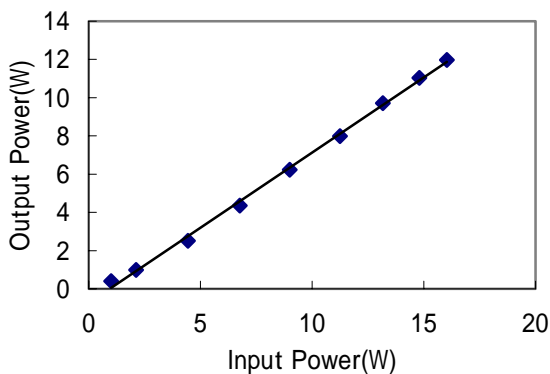


図 4-2 出力特性 (インライン偏光子)

次に、このときのスペクトルと PER をそれぞれ図 4-3、4-4 に示す。スペクトルの FWHM は 0.175nm と目標としていた 0.2nm よりも狭い値を実現することが出来た。また、バルク偏光子の場合と異なり、絶対波長も安定した。PER は最大出力時 16.7dB と非常に安定していた。出力が上がるに従いバンド幅が広がっているが最終的には FBG のバンド幅 0.192nm よりも狭い値で収まった。

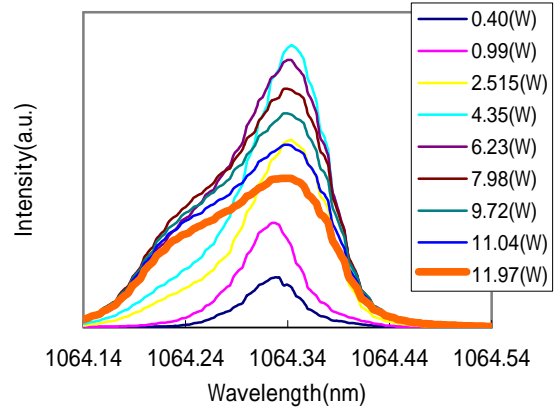


図 4-3 発振スペクトル (インライン偏光子)

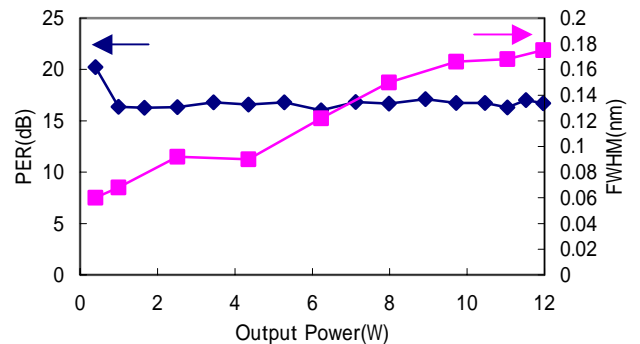


図 4-4 PER と FWHM の出力特性(インライン偏光子)

#### 5.第二高調波発生

第二高調波発生の実験装置を図 5-1 に示す。図 4-1 で開発したファイバーレーザーを用い、 $\lambda/2$  板で偏光を s 偏光に回転させ、レンズによりビーム径を 37.7  $\mu\text{m}$  に集光して PPMgOLN に入射させ波長変換を行った。PPMgOLN は光損傷耐久性に優れ、また非常に高い非線形光学定数を持っているのが特徴である。PPMgOLN はベルチエ素子を用いた温度調節器により位相整合に最適な温度に保たれており、PPMgOLN からの出射光は、HR@532nm、HT@1064nm のミラーによって基本波と第二高調波に分けられた。

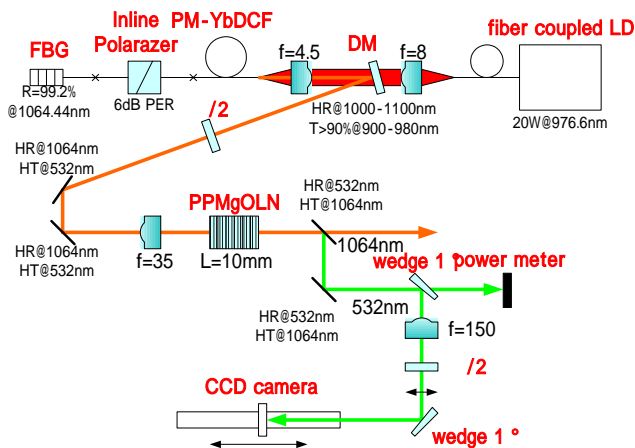


図 5-1 第二高調波発生

このときの第二高調波の出力と変換効率を図 5-2 に示す。基本波出力が 11.97W のとき第二高調波出力 2.155W、変換効率 18% であった。変換効率が約 10% のところまでは理論とよく一致しているが、基本波出力が上がるにしたがって、変換効率が頭打ちになってしまった。

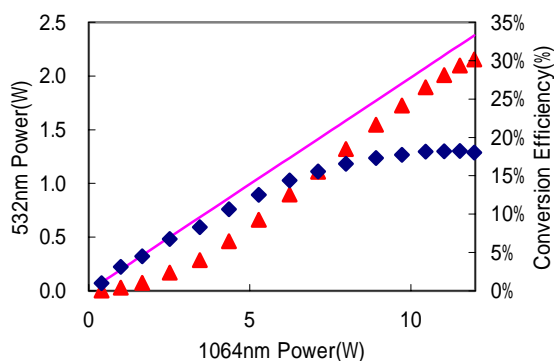


図 5-2 第二高調波出力と変換効率

このとき、PPMgOLN につけた温度調節器の温度変化を図 5-3 に示す。結晶に熱が加わることにより、結晶中で温度勾配ができてしまい、それによって出来た熱レンズにより変換効率が減少してしまっていると考えられる。

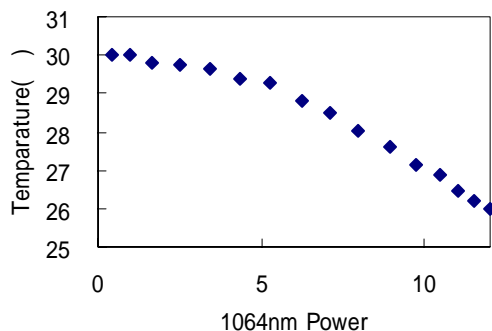


図 5-3 温度調節器の温度変化

次に、第二高調波を最大出力(2.155W)にした状態で、レンズによって集光し、CCD カメラでビーム径を測る。CCD カメラは可動区域内で最も PPMgOLN への距離が近い場所を  $z=0$  とし、 $z=100\text{mm}$  から  $z=440\text{mm}$  の範囲でビーム径の測定を行った。CCD カメラの距離に対するビーム径の変化を図 5-4 に示す。レーザービームの品質を示す量である  $M^2$  因子は 1.04 と非常に良い値であったため、ビーム径の変化による変換効率の減少はなかったと考えられる。

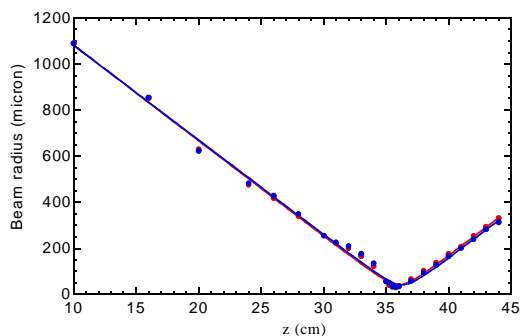


図 5-4 ビーム径の距離特性

## 6. 結論

今回インライン偏光子と PM-YbDCF を用いて全ファイバー型の単一偏光ファイバーレーザーの開発をした。基本波出力 11.97W、スペクトルのバンド幅 0.175nm と目標としていた値を上回り、想定した波長変換に十分な値となった。そして、これによって波長変換を行ったところ、第二高調波出力 2.155W、変換効率 18% の第二高調波を CW で得ることが出来た。

## 7. 今後の課題

今後、更なる変換効率の向上が望まれるが、その為の方法として、

1. 熱伝導率の高い金属を使用することにより、熱勾配の影響を緩和し、熱レンズを抑制する。
2. より結晶長の長い PPMgOLN を使用することにより変換効率の理論値を上げる

等の方法が考えられる。結晶長を 2 倍の 20mm とした場合、式 (2.3-3) に示すように、変換効率は現在の 2 倍となる。しかし式 (2.3-5) より、結晶の長さやスペクトルのバンド幅は反比例しているため、ファイバーレーザーのバンド幅のさらなる狭帯化が必要となる。例えば 2 倍の変換効率を目指すならばバンド幅を 0.1nm に狭めなければならない。そのためには FBG のバンド幅の狭帯化が必要であると考えられる。