

W 型屈折率分布 T_m ファイバーを用いた モード同期レーザーの開発

戸倉川研究室 佐藤匠

1 はじめに

近年、高エネルギーな 100 fs 以下の超短パルス光を得る方法として、散逸ソリトンモード同期や全正常分散 (ANDi) ファイバーレーザーが大きな注目を集めている。これはソリトンやストレッチパルスなどの状態に比べ、よりファイバー中、特に利得ファイバー中での非線形光学効果の抑制、制御が可能であり、より高いエネルギーのパルスが得やすい [1]。しかし、一般的に用いられるシリカファイバーは波長 2 μm 帯において異常分散を示すため、正常分散を有する利得ファイバーを用いたモード同期レーザーの開発は困難であった。我々はシリカファイバーの代わりにフッ化物ファイバーを用いることによって波長 2 μm 帯で初めての ANDi レーザーを実現することに成功している [2]。しかし ZBLAN ファイバーは低機械強度、潮解性といった扱いづらい点も有している。そこで本研究では ZBLAN ファイバーの代わりに、波長 2 μm 帯において正常分散を示す W 型屈折率分布による分散制御シリカガラスファイバー [3] を使用した、非線形偏波回転によるソリトンモード同期レーザーの開発を行った。

2 原理

2.1 波長分散

波長分散とは、光波の位相速度が波長に依存することをいう。光パルスが分散の影響を受けるとパルス形状の変化、パルスの広がりを起こしてしまう。

光ファイバーの分散性を説明するために、モードの伝搬定数 β を中心周波数 ω_0 のまわりでテイラー展開すると次式のようになる [4]。

$$\begin{aligned}\beta(\omega) &= n(\omega) \frac{\omega}{c} \\ &= \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) \\ &\quad + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 \\ &\quad + \frac{1}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots\end{aligned}\quad (1)$$

ただし $m = 0, 1, 2, \dots$ として、

$$\beta_m = \left[\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0} \quad (2)$$

である。パラメータ β_1, β_2 は屈折率 n とその導関数に関連付けられる [4]。

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \left[n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right] = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\beta_2 &= \frac{1}{c} \left[2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right] \\ &\simeq \frac{\omega}{c} \frac{d^2n}{d\omega^2} \simeq \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2n}{d\lambda^2}\end{aligned}\quad (4)$$

ここで n_g は群屈折率、 v_g は群速度である。 β_1 は群速度の逆数になっており、単位長当たりの伝搬遅延時間を表すため、群遅延時間と呼ばれる。 β_2 はパルスの広がりを決めるもので、群速度分散 (GVD) である。

光ファイバーの分散を表すために一般に用いられるのは、分散パラメータ D ps/nm/km であり、群速度分散 β_2 と D の間には次の関係がある [4]。

$$\begin{aligned}D &= \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \\ &\simeq -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n(\omega)}{d\lambda^2}\end{aligned}\quad (5)$$

2.1.1 材料分散

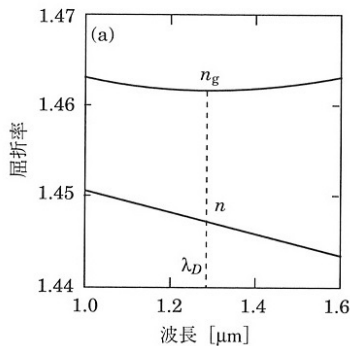


図 1 シリカガラスにおける屈折率の波長依存性 [4]

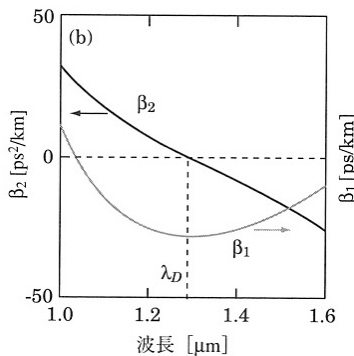


図 2 シリカガラスの材料分散による群速度分散 β_2 の波長依存性 [4]

図 1、2 にシリカガラスの屈折率 n 、群屈折率 n_g 、群速度分散 β_2 の波長 λ に対する依存性を示す。図 2 の λ_D において分散が 0 になっている。シリカガラスでは $\lambda_D = 1.27 \mu\text{m}$ 付近であり、ゼロ分散波長と呼ばれる。このように媒質の屈折率から導かれる分散は材料分散と呼ばれる。ただし、 $\lambda = \lambda_D$ で分散がなくなるわけではなく、(1) 式で 3 次の項を考慮する必要がある。この高次の分散により超短パルス光は歪んでしまうが、高次の分散を考慮しなければならないのは、パルス幅が狭い場合である。

2.1.2 導波路分散

光ファイバーは誘電性のある導波路のため、モード屈折率の有効値が物質の屈折率 $n(\omega)$ よ

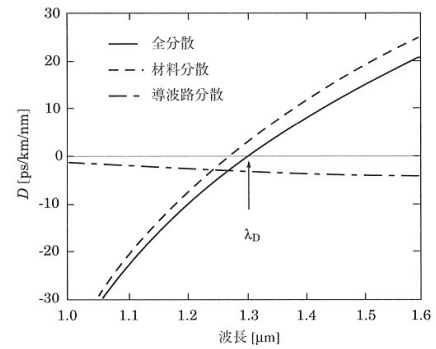


図 3 シリカ系光ファイバーの全分散波長依存性 [4]

り小さくなるため、光ファイバーの全分散は材料分散に加えて導波路からの影響、導波路分散も付加する必要がある。導波路分散はコアの半径や比屈折率差 Δ などの値によって決まる。図 3 に全分散の波長依存性を示す。

この図からわかるように、導波路分散の影響で全分散は材料分散よりも長波長側にシフトしている。これによりゼロ分散波長は、典型的な光ファイバーで $\lambda_D = 1.31 \mu\text{m}$ となる。

2.1.3 群速度分散

一般的な光ファイバーにおいては、群速度分散 β_2 または分散パラメータ D の符号によって分散の効果は異なる。 $\beta_2 > 0$ を満たす場合、波長 λ は $\lambda < \lambda_D$ であり、正常分散となる。正常分散では、光パルスの低周波数(長波長)成分は高周波数(短波長)成分よりも速く伝わる。また $\beta_2 < 0$ を満たす場合、波長 λ は $\lambda > \lambda_D$ であり、異常分散となる。異常分散では、光パルスの低周波数成分は高周波数成分よりも遅く伝わる。

2.2 W 型屈折率分布による分散制御

本研究で使用した Tm ファイバーの屈折率分布を図 4 に、分散曲線を図 5 に示す。一般的なステップインデックスに比べ、コアサイドに低屈折率のディップが存在している。ここへコアを伝搬する光が染み出すことで、実効屈折率が低下する。この際長波長の光ほど染み出しが

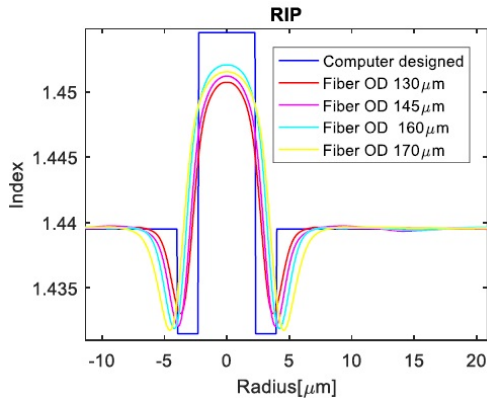


図 4 W 型屈折率分布 [3]

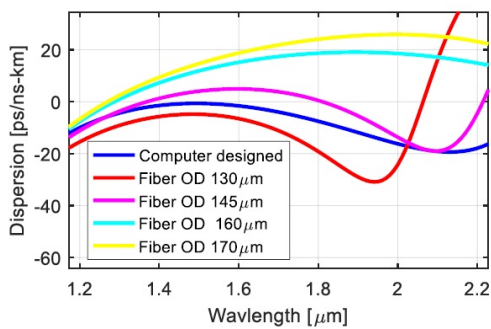


図 5 W 型屈折率分布をもつファイバーの分散曲線 [3]

大きく、より実効屈折率が低下する。これにより正常分散効果が得られる。シリカガラスファイバーにおいても正常分散を得ることは可能だが、コア径を $3\mu\text{m}$ 程度にしなければならず、これは高エネルギー動作には向かない。しかしこの Tm ファイバーではコア径が約 $6\mu\text{m}$ と倍程度の大きさで正常分散が可能となっている。分散値は線引き後の径に強く依存し、本研究では OD 値 (クラッド径) が $145\mu\text{m}$ のものを使用した。また ZBLAN ファイバーとは異なりシリカガラスファイバーであるため、機械強度が高く、融着が容易で全ファイバー化も可能であると考えられる。

2.3 非線形偏波回転

パルスが光ファイバー中を伝搬すると、自己位相変調と相互位相変調により偏光成分の直交

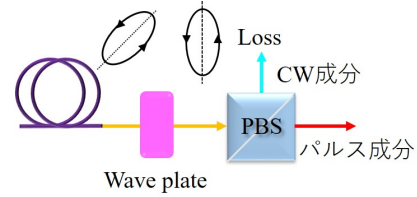


図 6 非線形偏波回転によるモード同期概念図

する 2 成分に位相の変化が生じる。この偏光状態の強度依存性を利用してモード同期を得るのが、非線形偏波回転である。図 6 に非線形偏波回転を用いてモード同期を得る概念図を示す。光ファイバーを伝搬したパルス光は自己位相変調により、光強度の強いパルス成分と光強度の弱い CW 成分の偏光回転量が異なった状態で出射される。このパルス光を波長板と PBS を透過させる。このとき波長板を調整することで、PBS において CW 成分にパルス成分よりも大きな損失を与える。これにより疑似的な高速可飽和吸収体効果が得られる。したがって、CW 成分の発振は抑制されパルス成分でのみ発振が起こりモード同期動作を得ることができる。

3 非線形偏波回転によるモード同期

3.1 実験構成

実験構成を図 7 に示す。前述の Tm ファイバーを波長 $1.55\mu\text{m}$ の Er:Yb fiber MOPA で WDM を通した後方励起している。より大きな非線形光学効果を得るために Tm ファイバーの前方に SMF28 を 10m 融着した。ファイバー

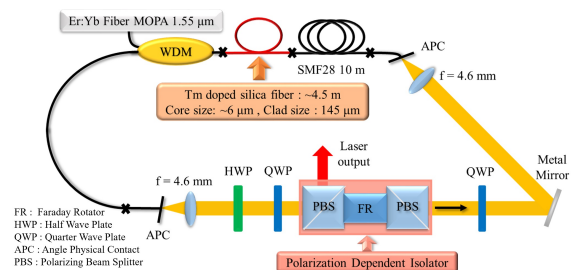


図 7 非線形偏波回転モード同期実験図

部両端にはアングル研磨の SMF28 を融着し寄生発振を抑制している。偏光依存性アイソレータを入れることによって、反時計回りのリング共振器とし、出力はアイソレータ中の PBS から取り出される。上述の共振器構成のもと、波長板を調整することによって非線形偏波回転によるモード同期動作を試みた。

3.2 実験結果

励起パワーを上げ波長板を調整したところ、平均出力が 37.5 mW 時にマルチパルス状態のモード同期が得られた。その状態で励起パワーを下げたところ、平均出力が 12.3 mW 時にシングルパルスでのモード同期動作を得ることに成功した。モード同期動作時のパルストレインを図 8、9 に示す。シングルパルス時の繰り返し数は ~ 11.9 MHz、パルスエネルギーは ~ 1 nJ と推定される図 10 にスペクトルを示す。中心波長は 1953 nm、スペクトル幅は ~ 5 nm、スペクトル幅から推定されるパルス幅は、Sech² 型

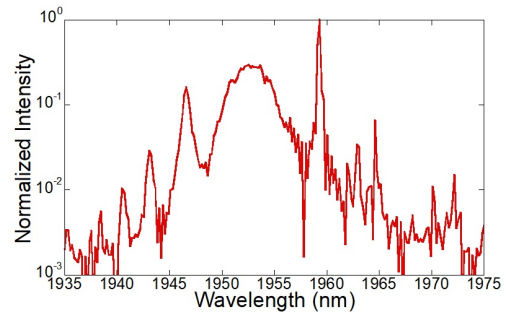


図 10 シングルパルス動作時のスペクトル

を仮定した場合 ~ 800 fs と考えられる。またスペクトル中にソリトンモード同期の特徴であるケリーサイドバンドが確認できた。これによって短パルス化が制限されていると考えられ、共振器長と分散値を減らすことにより、さらなる短パルス動作が得られると考えられる。

4 まとめ

W 型屈折率分布分散制御 Tm ファイバーを用いたモード同期レーザーの開発に成功した。今後は SMF28 の長さを減らし 0 分散に近づくことによって、スペクトル幅の広帯域化、短パルス化を目指す予定である。

参考文献

- [1] Andy Chong, et al, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ", Opt, Lett 2408-2411 **32**, 2007
- [2] H. Sagara, A. Suzuki, and M. Tokurakawa, "Two micron All-normal-dispersion NPR mode-locked Tm:ZBLAN fiber laser," ASSL2018 Boston, USA, ATu2A.25
- [3] Yuhao Chen, et al, "Normal dispersion thulium fiber for ultrafast near-2 μ m fiber laser," CLEO 2018 © OSA 2018
- [4] 住村和彦、西浦匡則 著、"解説 ファイバーレーザー基礎編"、オプトロニクス社

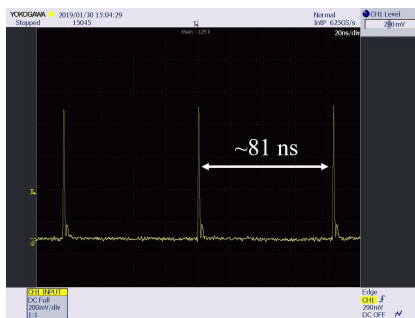


図 8 パルストレイン (20 μ s/div)

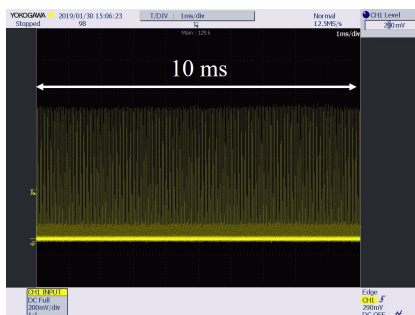


図 9 パルストレイン (1 ms/div)