

Tm 添加分散設計シリカファイバーを用いた 波長 2 μm 帯モード同期発振器の開発とその高出力化

戸倉川研究室 佐藤匠

1 はじめに

波長 2 μm 帯レーザーは多くの対象に対して現在主流の波長 1~1.5 μm 帯レーザーとは異なる光学特性(吸収、散乱)を示し、加工や医療など様々な分野での応用が期待されている。それら応用ではサブ ps の短パルス性や μJ 程度のパルスエネルギーが望まれるが、波長 2 μm 帯サブ ps ファイバー発振器から得られるパルスエネルギーはシリカガラスの異常分散により波長 1 μm 帯に比べ 2 桁以上小さい数 nJ 程度に制限されている。そのため上記のような応用には多段階の増幅が必要であり、実用上の制限となっている。そこで増幅の段数を減らし、1 段階の増幅で μJ 程度のパルスエネルギーが得られるよう、波長 2 μm 帯で正常分散を示す利得ファイバーを用いた発振器出力のスケールアップを行い、10 nJ 程度の出力を目指した。

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。光パルスは多数の波長の光で構成されているため、分散の影響を受けるとパルス内で各波長の位相速度が変化する。そのためパルス形状の変化、パルスの拡がりを起こしてしまう。

2.2 材料分散

材料分散は光ファイバーに使用されているシリカガラスなどの材料固有の性質で屈折率の波長依存性が生じるものである。この材料分散の

値はセルマイヤーの式にシリカガラスのセルマイヤー係数を代入することで求められる。図 1 にシリカガラスの屈折率波長依存性を示す。

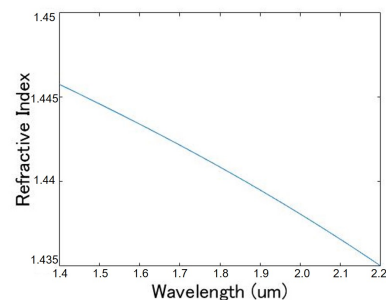


図 1 シリカガラスの屈折率波長依存性

2.3 導波路分散

光ファイバー中では光は屈折率の高いコアと屈折率の低いクラッドの境界面で全反射を繰り返しながら伝搬する。その際コアからクラッドへ光は染み出しながら伝搬する。そのため光が感じる屈折率、実効屈折率は光が伝搬するコアの屈折率 $n(\lambda)$ よりも小さくなる。そのため光ファイバーの全分散は材料分散に加えて導波路構造による影響である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コアとクラッドの屈折率差 Δ (比屈折率差) などの値によって決まる。導波路分散によって分散値はシフトし、通常のステップインデックスシリカガラスファイバーでは、分散の値がゼロになる波長であるゼロ分散波長 λ_D が材料分散のものよりも長波長側へシフトし $\lambda_D = 1.31 \mu\text{m}$ となる。

またこの性質を利用して、コアの半径や比屈折率差を調整することにより λ_D をさらに長波長へシフトさせた分散シフトファイバーや、特

殊な屈折率分布により分散曲線中の所望の波長にディップを出現させ分散値の制御を行う分散制御ファイバーなどがある。

2.4 群速度分散

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 [1]。

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

ただし $m = 0, 1, 2, \dots$ とし、

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

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 [1]。

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

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

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 [1]。

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

この群速度分散 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。 $D < 0$ を満たす場合、正常分散 (GVD は β_2 で定義され、 β_2 と D の符号は異符号であるため $D < 0$ のとき $\beta_2 > 0$ となるから) となる。正常分散では、パルスの低周波数 (長波長) 成分は高周波数 (短波長) 成分よりも早く伝わる。また $D > 0$ の場合、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。図 2 にステップインデックス (SI) シリカガラスファイバー (コア径: $\sim 8 \mu\text{m}$ 、NA: ~ 0.14) の屈折率波長依存性を示す。 $\lambda_D = 1.31 \mu\text{m}$ であり、それより長波長では異常分散となっている。

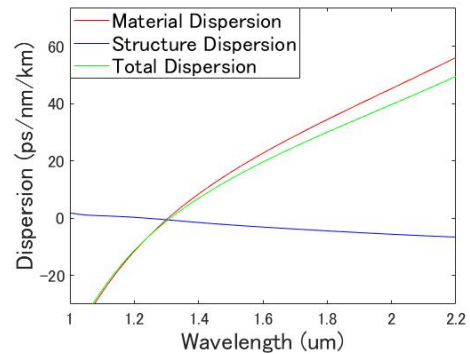


図 2 SI 型シリカファイバーの分散値波長依存性

2.5 W 型屈折率分布による分散制御

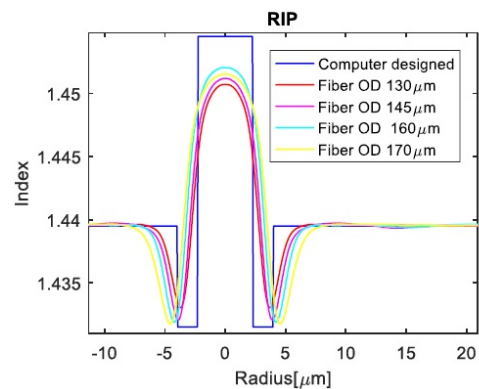


図 3 W 型屈折率分布 [2]

本研究で使用した Tm ファイバーの屈折率分布を図 3 に、分散曲線を図 4 に示す。この光ファイバーは信号光が伝搬するコアとシリ

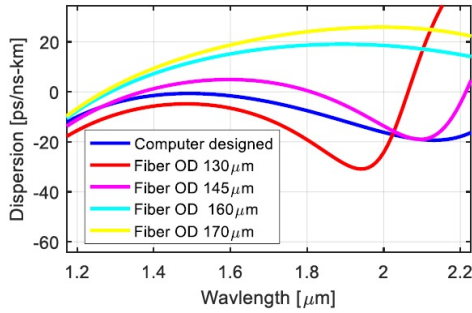


図 4 W 型屈折率分布をファイバーの分散曲線 [2]

カガラスの屈折率よりも低い屈折率をもつトレ
ンチクラッド、シリカガラスのクラッドで構成
されている。2.3 節で説明した通り、光ファイ
バー中コアを伝搬する光はクラッドに染み出し
ながら伝搬している。その際コアの周りにトレ
ンチクラッドがあることにより、染み出した光
は実効屈折率の低下を受ける。長波長の光ほど
染み出しは大きいため、より実効屈折率の低下
を受けやすくなる。しかし染み出しが大きくな
りすぎるとクラッドにまで到達してしまい、実
効屈折率はわずかに大きくなる。そのためコア
やトレンチクラッド、クラッドの径、比屈折率
差を設計することにより導波路分散値の制御が
可能になる。これにより、所望の波長において
導波路分散の影響を大きくすることができる。
図 4 では分散曲線中にディップが生じ、本研
究で使用した光ファイバー (Fiber OD 145 μm)
では波長 2 μm 帯において、コア径約 5.5 μm
の大きさで正常分散が得られていることが分
かる。

このファイバーを利得ファイバーとして用い
ることで、共振器内の増幅動作時におけるソリ
トン圧縮を抑制することができるため、パルス
の分裂等を抑制し高エネルギー化を図ることが
できる。

3 実験構成

実験構成を図 5 に示す。利得ファイバーと
して W 型屈折率分布により分散制御を行っ
た正常分散シリカファイバー (Normal Dis-

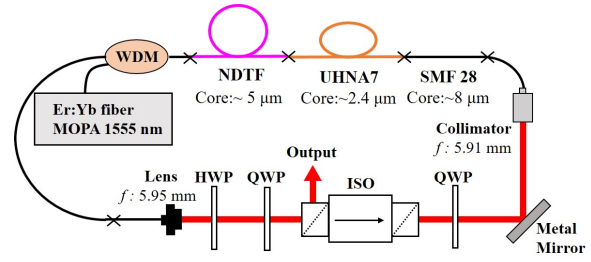


図 5 実験構成

ersion Thulium silica Fiber : NDTF) を使
用した。この NDTF を波長 1.55 μm の Er:Yb
fiber MOPA で Wavelength Division Multi-
plexer (WDM) を通し後方励起した。ファイ
バー部両終端に APC が先に付いた SMF28 を
融着し、寄生発振を抑制した。共振器長を長く
し、非線形光学効果による CW とパルスの偏
光の回転量の差を大きくするため、SMF28 を
追加で融着している。また WDM や APC に付
随するファイバーも SMF28 であり、2 μm 帯
では異常分散を有している。その分散値を補償
し共振器の分散値を正常分散とするため、コア
径を約 3 μm と小さくすることで 2 μm で正常
分散を示す、Ultra High NA 7 (UHNA7) ファ
イバーを融着した。表 1 にそれぞれのファイ
バーの波長 1950 nm における分散値を示す。
実験では SMF28 の長さを短くし共振器の分
散量を大きくしながら行った。共振器中の光
は Isolator (ISO) により反時計回り方向に伝搬
し、ISO 中前方の PBS により反射される光を
取り出しとしている。この構成で励起パワー
を上げ各波長板 (Half Wave Plate : HWP ,
Quarter Wave Plate : QWP) を回し、モード
同期動作を試みた。

表 1 各ファイバーの分散量

Fiber Name	Dispersion (ps^2/m)
NDTF	0.02
UHNA7	0.04 [3]
SMF28	-0.07

4 実験結果

4.1 分散量 0.027 ps^2 時

表 2 各ファイバーの長さ

Fiber Name	Length (m)
NDTF	4.6
UHNA7	3.8
SMF28	3.2
Total	~12.0

共振器中の各ファイバーの長さを表 2 のようにし、共振器の分散値を 0.027 ps^2 として実験を行った。励起パワーを上げ 3 枚の波長板を調整したところ、モード同期動作が得られた。その時の出力特性を図 6 に示す。モード同期動作は励起パワー 550 mW 時に得られており、これより励起を大きくするとマルチパルス動作へと移行した。

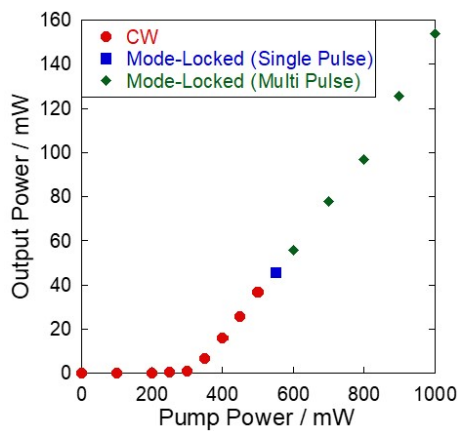


図 6 出力特性

励起パワー 550 mW 時の結果を図 7~9 に示す。図 7 の RF スペクトルから変調の載っていないモード同期動作が確認された。図 8 のスペクトルは 2 つのピークが存在するスペクトル形状となっている。また図 9 の自己相関波形からはパルスの裾部分に高次分散の影響と見られる拡がりの確認ができるが、中心部分の形状をガウシアンと仮定すると、パルス幅は 231 fs と

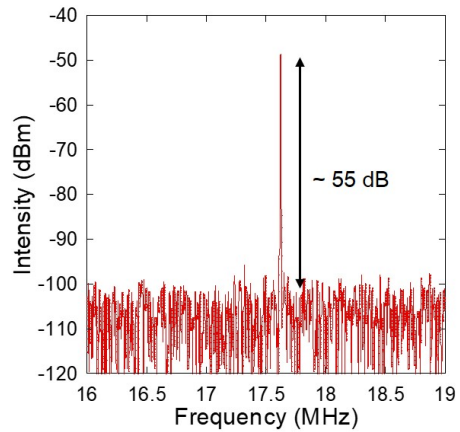


図 7 RF スペクトル

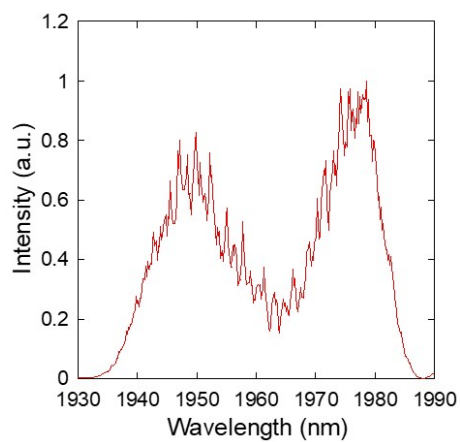


図 8 スペクトル

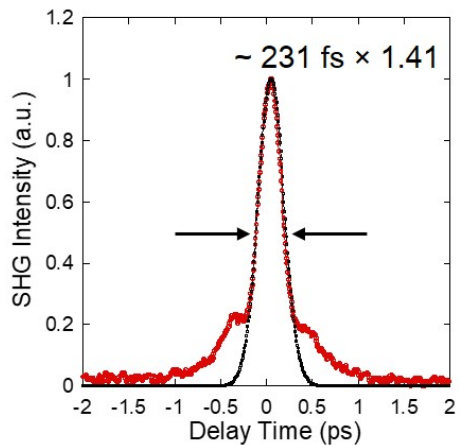


図 9 自己相関波形

推定される。この時の平均出力が 46 mW で繰り返しが 17.6 MHz だったため、パルスエネルギーは約 2.6 nJ と見積もられる。

励起パワーを上げた際のパルスの分裂は、

共振器中に存在する異常分散ファイバーでパルス圧縮が起き、ピーク強度が大きくなることで非線形光学効果が大きくなることで発生していると考えられる。利得ファイバー前後にSMF28がそれぞれ ~1.6m ずつ存在するため次の実験では追加で挿入している増幅前のSMF28の長さを短くし、共振器の分散値を大きくして実験を行った。

4.2 分散量 0.057 ps^2 時

表 3 各ファイバーの長さ

Fiber Name	Length (m)
NDTF	4.6
UHNA7	3.8
SMF28	2.8
Total	~11.5

共振器中の各ファイバーの長さを表 3 のようにし、共振器の分散値を 0.057 ps^2 として実験を行った。励起パワーを上げ 3 枚の波長板を調整したところ、モード同期動作が得られた。その時の出力特性を図 10 に示す。モード同期動作は励起パワー 400 mW 時に得られており、励起パワーを 800 mW より大きくするとマルチパルス動作へと移行した。

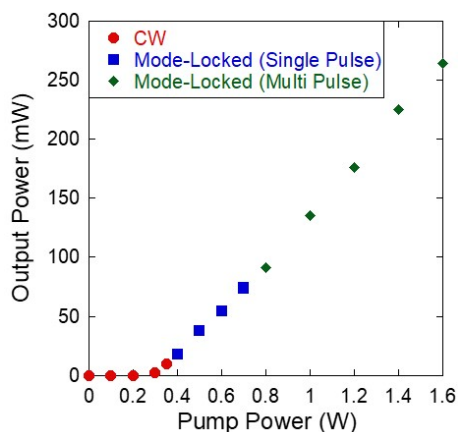


図 10 出力特性

励起パワー 550 mW 時の結果を図 11~13 に示す。図 11 の RF スペクトルではメインの信

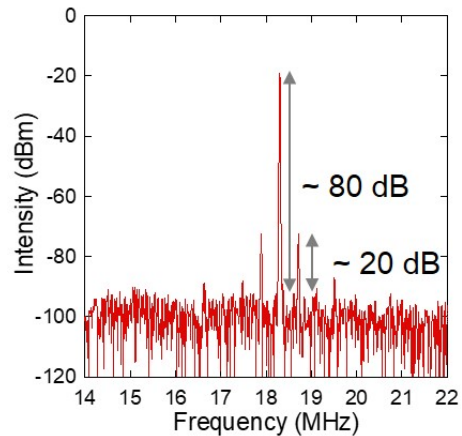


図 11 RF スペクトル

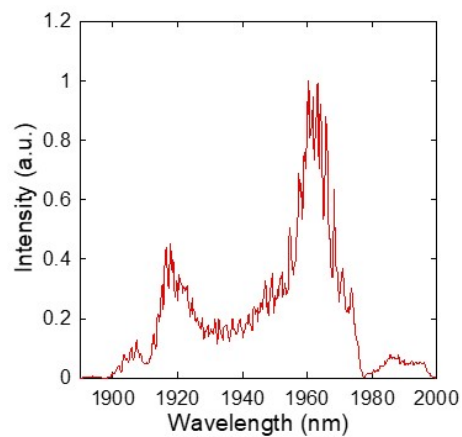


図 12 スペクトル

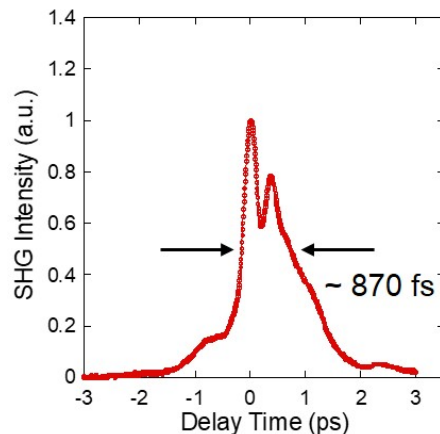


図 13 自己相関波形

号の信号に比べ約 60 dB ほど小さいサイドローブが確認された。励起光からはこのような変調成分は確認されなかったため、レーザー共振器内で発生していると考えられ、現在原因を究明中である。図 12 のスペクトルは 2 つのピーク

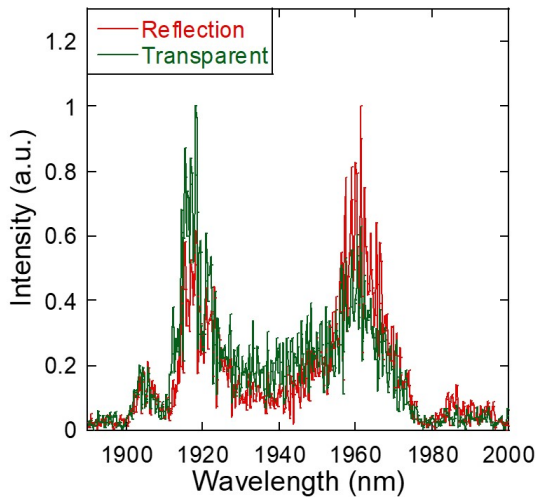


図 14 ビームスプリッタ分岐後のスペクトル
(赤：反射、緑：透過)

が存在し、長波長側のピークが大きく出た形状となっている。また図 13 の自己相関波形は非対称に観測されている。通常左右対称に観測される自己相関波形がこのように非対称に観測される原因としては、パルスがチャープしていることと自己相関計に使用しているビームスプリッタの波長依存性に因るものと考えられる。図 14 にビームスプリッタ反射・透過後のスペクトルを示す。このように反射側では長波長側のピークが強く出ているのに対し、透過側のスペクトルでは短波長側のピークが強く出ている。自己相関計に入射したパルスがチャープしており、ビームスプリッタに波長依存性があることにより、このような現象が起きパルスが均等に分割できていないため、自己相関波形が非対称に観測されると考えられる。自己相関幅は約 870 fs であったため、パルス幅も数百 fs であると考えられる。このときの平均出力が 74 mW であり、繰り返しが 18.3 MHz であったため、パルスエネルギーは約 4.0 nJ と見積もられる。

5 まとめ

本研究では 2 μm 帯ファイバーレーザー発振器の出力スケールングを目指し、W 型屈折率

分布をもつ分散設計 Tm 添加シリカファイバーを用い非線形偏波回転モード同期レーザーの開発を行った。共振器の分散値が 0.027 ps² 時にはシングルパルスでパルスエネルギー約 2.6 nJ となる動作を実証した。また共振器の分散値が 0.057 ps² 時にはシングルパルスでパルスエネルギー約 4.0 nJ となる動作を実証した。卒研時には共振器の分散値が異常分散領域のソリトンモード同期において、パルスエネルギー約 1.0 nJ となる動作を実証していたが、今回の実験では共振器の分散値を大きくすることでエネルギースケールングに成功している。

今後はさらに分散値を大きくし、一層のエネルギースケールングを目指す。そして共振器外部でパルス圧縮を行い、数百 fs オーダーのパルス幅で 10 nJ 程度のパルスエネルギーを目指す。

参考文献

- [1] 住村和彦、西浦匡則 著、"解説 ファイバーレーザー基礎編一"、オプトロニクス社
- [2] Yuhao Chen, et al, "Normal dispersion thulium fiber for ultrafast near-2 μm fiber laser," CLEO 2018, AM2M2, 2018
- [3] Piotr Ciałćka, et al, "Dispersion measurement of ultra-high numerical aperture fibers covering thulium, holmium, and erbium emission wavelengths", Journal of the Optical Society of America B, Vol.35, 1301-1307, 2018
- [4] 國分泰雄 著、光波工学、共立出版
- [5] ヤリーヴ-イェー 著、多田邦雄、神谷武志 監訳、石川拓哉、板谷太郎、伊藤文彦、岡田至崇、鎌田憲彦、土屋昌弘、中野義昭、中林隆志、林秀樹 共訳、"光エレクトロニクス 基礎編"、丸善出版
- [6] Lars Grüner-Nielsen, et. al. "Dispersion-Compensating Fibers," Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, 3566-3579, 2005