

Er 添加マイクロトロイドの作製と CW レーザ発振

今村 陸(M1)

微小光共振器は光を微小領域に閉じ込めることができ、共振器内では光と物質の相互作用を極限まで高めることができる。本研究では通信波長帯域で動作し、かつ小型なモード同期レーザの開発に向けて、エルビウムを添加した微小光共振器の作製を行った。また作製したエルビウム添加共振器の光学特性について評価を行った。

キーワード: 微小光共振器, エルビウム添加デバイス, モード同期レーザ

1. 背景

モード同期レーザには Ti:サファイアレーザなどの固体レーザや、近年高い性能を示すことが報告された MIXSEL などの半導体レーザなどが存在し様々な応用先が知られている。ここで特に通信応用を考えると、通信波長帯域である 1550 nm 付近で動作し、それ自体が光ファイバで構成されている点からファイバレーザによるモード同期が優れている。しかしファイバレーザによるモード同期レーザの欠点として繰り返し周波数が数 100 MHz 程度と低いことが挙げられる。ファイバレーザが低繰り返しである理由は繰り返し周波数が共振器長に制限されるからである。この点から着想を得たのが本研究であり、より共振器長の短い ($\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 程度) 微小光共振器を用い、ファイバリング系を再現することで、通信波長帯で動作する高繰り返しなモード同期レーザを実現できるのではないかと考えた (Fig. 1)。さらにシリコンチップ上に作製可能なため集積化の向上や、高 Q 値による省エネルギー化も期待される。

再現を行うファイバリング系としては利得媒質としてエルビウム添加ファイバを用い、またモード同期素子としてカーボンナノチューブ (CNT) をファイバフェルルルに用いたモード同期レーザである。エルビウム添加ファイバにより 980 nm もしくは 1480 nm での励起で 1550 nm 帯で利得を持つことができる。また強度の低い光ほど強い吸収を受けるといふ可飽和吸収特性を持つ CNT によって受動的なモード同期が実現している。したがって通信波長帯域でパルス光を得るためには、利得媒質としてのエルビウムと、安定したモード同期素子である CNT を共振器へ付与しなければならない。当研究室では以前 CNT を CVD 法によってトロイド共振器へ付与することで、微小光共振器での可飽和吸収特性を確認した[1]。そこで本研究では利得媒質であるエルビウムイオンを添加したトロイド共振器を、ゾルゲル法という化学的手法を用いることで作製した。また実際に 1550 nm 付近でのシングル/マルチモードでの誘導放出 (レージング) も観測された。

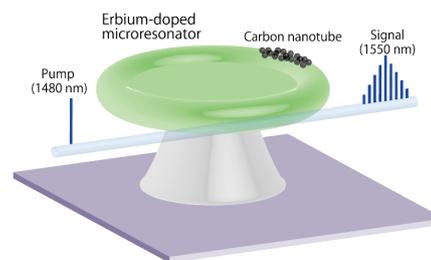


Fig. 1. エルビウム添加微小光共振器と CNT によるモード同期レーザの概略図。

2. エルビウム添加マイクロトロイド

通常のシリカトロイド共振器は熱酸化法によってシリコン基板上にシリカ層を形成し、フォトリソグラフィや BHF エッチング, XeF_2 気相エッチング, レーザリフローによって作製される[2]。しかしエルビウムを添加したシリカ層は熱酸化法では作製できないため、ゾルゲル法を用いてエルビウムを添加したシリカ膜を作製する必要がある。これには 2 つの手法が存在し、それぞれについて述べる。

1 つ目はシリコン基板上にエルビウム添加シリカ膜を成膜し、その後一般的なトロイド共振器の作製方法を用いて共振器を形成する手法である[3]。1 層ごとの膜厚が約 300 nm のゾルゲルシリカ膜を成膜することが可能なため、本研究では 8 層積層することで約 2.4 μm のゾルゲルシリカ膜を作製した。この手法によって直径 70 μm のエルビウム添加トロイド共振器を作製し、エルビウム添加濃度は $1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 Q 値は 1480 nm 帯で 2.0×10^6 であった。1480 nm 帯の共振波長で励起を行うと Fig. 2(a)に示すように、1550 nm 付近においてマルチモード発振を確認した。発振波長の間隔は FSR 間隔と等しい約 10 nm 間隔であり、発振しきい値は約 2.0 μW で発振効率は 1.5% であった。次に添加濃度を変化させた場合の LL カーブは Fig. 2(b)のようになった。濃度を $0.85 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ へ変化させると、発振効率も約 0.6% から約 1.0% へと上昇した。

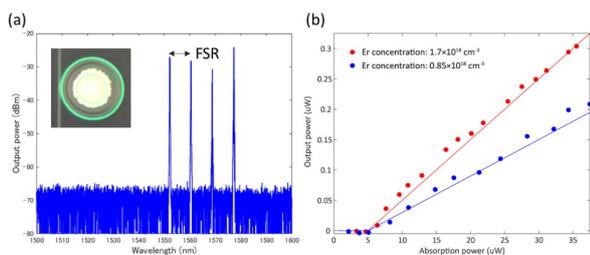


Fig. 2. (a) エルビウム添加共振器の発振スペクトル. 1550 nm 付近において約 10 nm の FSR 間隔マルチモード発振を確認した. (b) エルビウム添加濃度を変化させた場合の LL カーブ.

2 つ目のエルビウム添加トロイド共振器の作製方法は、ゾルゲル法を成膜ではなくコーティングの手法として利用する方法がある. ここではシリコン基板上に熱酸化法によって厚さ 8 μm のシリカ膜を用いて、一般的なディスク共振器を作製した. そこにエルビウムを添加したゾルゲル溶液をスピコートし、その後 CO_2 レーザによるリフローを行いトロイド型の共振器を形成した. この手法ではエルビウム添加濃度を精密に制御することは難しい一方で、前者の手法では作製プロセス上困難な比較的大きな共振器 ($> 300 \mu\text{m}$) を作製することが可能である. 後者の方法で作製を行った共振器は直径約 400 μm で 1480 nm 帯で 3.0×10^6 であった. 1480 nm 帯の共振波長で励起を行うとシングル/マルチモードでの発振を確認した. また 1540 nm 付近で励起強度を増加させるとシングルモード発振から、Fig. 3 のようにマルチモード発振に推移することが確認された.

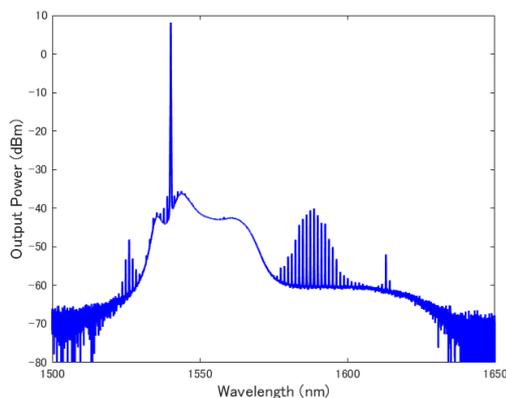


Fig. 3. 共振波長 (約 1540 nm) において励起強度を増加した場合のマルチモード発振スペクトル (1590 nm 付近).

さらに EDFA を用いて 1540 nm 付近での励起強度を増加させた場合について述べる. 大きく 2 つのスペクトルが観測された. 1 つ目は 1540 nm 付近の励起でレーザ発振するようなモードを強励起した場合で、その条件では Fig. 4(a) のようなスペクトルが得られた. ここでは励起光を中心とした縮退四光波混合によるスペクトル, 1600 nm 付近ではエルビウムイオンによるマルチモードレーザ発振, 1700 nm 付近にはラマン利得によるスペクトルが確認された.

また、1540 nm 帯の励起でレーザ発振を起こさないようなモードを励起すると、Fig. 4(b) のような MI コム状のスペクトルが得られた. この条件では Fig. 4(a) のようなレーザ発振やラマンによるスペクトルは確認されなかった.

以上のように、高繰り返しモード同期レーザの開発に向けて、エルビウム添加微小光共振器の作製とその光学特性について評価を行った. エルビウム添加によるマイクロレーザは低しきい値でマルチモード動作を行うことが判明した. 一方で非線形効果に関してはまだ不明な点が残っており、モード同期達成に向けて、計算モデルの作成と合わせて調査を行う必要がある.

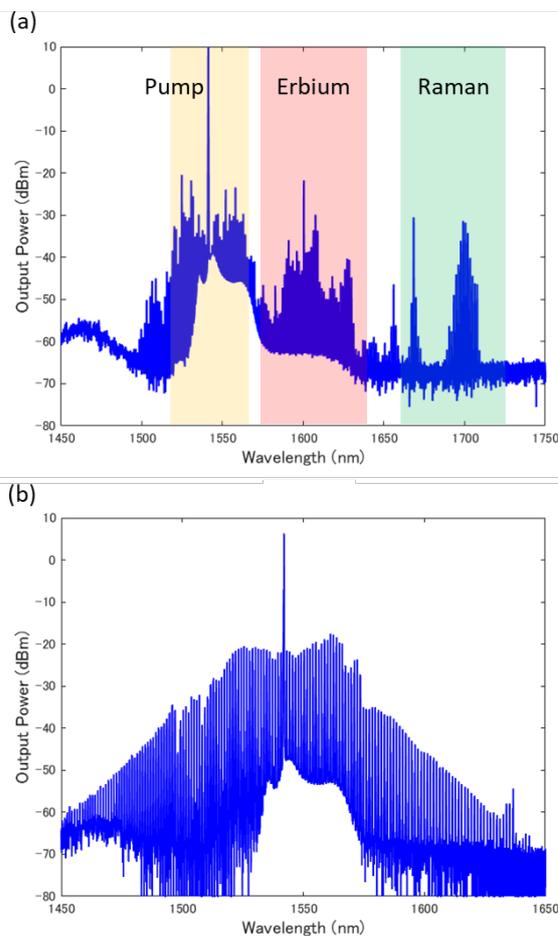


Fig. 4. エルビウム添加共振器を 1540 nm 付近の共振波長で強励起した場合のスペクトル. (a) レーザ発振を起こすモードを励起した場合. (b) レーザ発振が確認されないモードを励起した場合.

参考文献

[1] T. Kumagai, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **123**, 233104 (2018).
 [2] D. K. Armani, *et al.*, *Nature* . **421**, 925 (2003).
 [3] L. Yang, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **86**, 091114 (2005).