

シリカ微小光共振器におけるラマンコムのコヒーレンス評価

曾田昇汰(B4) 藤井瞬(D2)

シリカは幅広いラマン利得を持っており、シリカ微小光共振器を用いることで光 Kerr コムとは別にラマンコムを発生させることでコム波長帯域を拡大できる可能性を秘めている。しかし、ラマンコム安定化の詳細については未だに明らかになっていない。そこで本研究では、ラマンコムをコヒーレンスの点から評価し、モードロックに必要な条件を検討した。

キーワード：微小光共振器，誘導ラマン散乱，コヒーレンス

1. 背景

微小光共振器はその微小なサイズと高 Q 値という特徴から比較的小きなパワーで非線形光学効果を観測することができる。特に、四光波混合による光コム（光 Kerr コム）は、WDM 通信やマイクロ波発生、天文応用など様々な応用が挙げられる。従来の光周波数コムに比べ、光 Kerr コムは低パワーで発生、集積化可能、入力光が連続光、周波数間隔が広いという特徴を持つため大きな注目を集めてきた。

光 Kerr コムの安定化は応用において必要となってくるが、すでに散逸性カーソリトンと呼ばれる長時間安定するコムが報告されている[1]。ソリトンの発生には分散制御に加え、熱光学効果を抑えるための入力光パワーの制御が必要となり、簡単ではない。

一方、四光波混合とは別の非線形光学効果として誘導ラマン散乱というものがある。これは四光波混合とは違い、位相整合条件を必要とせず、材料の持つ利得帯域にコムを広げることができる。そのため、コム発生には分散制御が必要でないという特徴を持つ。しかし、位相整合条件がないというのは、スペクトル同士がインコヒーレントに発生しているということであるため、コム安定化の方法がソリトン発生とは違ってくると考えられる。先行研究では、結晶共振器を用いてラマンコムモードロックを観測したという報告がなされているが、モードロックの条件は明確にはされていない[2]。

本研究では、未だにラマンコムモードロックの機構が解明されていないことから、ラマンコムビート信号を計測し、共振器分散およびラマンコムスペクトル 1 本のコヒーレンスの二つの影響を考慮することで、モードロックに必要な条件を検討する。

2. ビート信号の測定

直径 4 mm のシリカロッド微小共振器 ($Q > 10^8$) を用いて、ラマンコムを発生させた。4 mm のシリカロッドを用いているのは、フォトディテクタが 25GHz 程度までの信号しか取得できないためである。1563.9063 nm 付近にある共振モードに対し、レーザー光を長波長方向に掃引していったところラマンコムのみを発生させることができた (図 1(a))。このラマンコムビート信号を測定するために図 1(b) のような実験系を用いた。

このときのビート信号は図 1(c) のように得られた。この 3dB 線幅は 500 kHz 程度であった。

モードロックした際のビート信号の線幅は先行研究から 100 Hz 程度であるはずであるから[2]、このコムはモードロックしているとは言えない。

線幅がこのような広がる要因としては、共振器分散が強く周波数間隔が一定ではないこと、コムスペクトル 1 本のコヒーレンスが散乱の過程で悪くなっているということが考えられる。

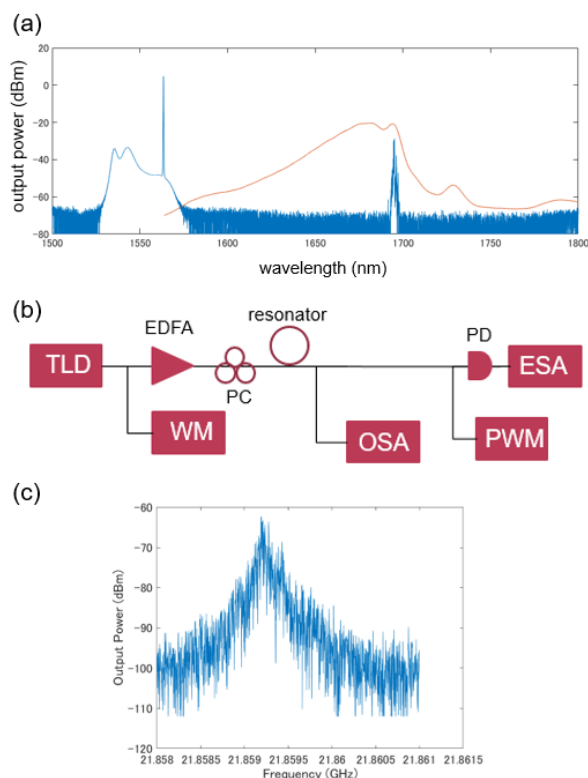


図 1(a)：入力光を掃引していくことで観測されたラマンコム（赤線は入力光に対するラマン利得を表す）。(b)：ラマンコムビート信号を測定するための実験セットアップ。(c)：ラマンコムビート信号。

3. 共振器分散の計算

COMSOL を用いて、直径 4 mm のシリカロッドの共振器分散を計算したところ図 2 のようになった。

5. 結論

モードロックしていないラマンコムでのビート信号の線幅は、分散の影響を大きく受けており、誘導ラマン散乱の過程におけるスペクトル自体のコヒーレンス変化による影響はわずかなものと考えられる。

異常分散による周波数間隔の広がりに対して、今回のビート信号の線幅が小さかったことから発生したラマンコムのスペクトルの一部は四光波混合によるものであると考えられる。

モードロックに必要な条件としては、ラマンコムが発生する波長帯域において、共振器分散がゼロに近い異常分散とすることで、誘導ラマン散乱によって発生したスペクトルから四光波混合を介してコムを広げる必要があると考えられる。

共振器の構造分散によって共振器分散を弱い異常分散にするには共振器形状を三角形に近づける必要がある[3]。そのため、今後の課題としては共振器形状が三角形のものを作製し、ラマンコムを評価することが挙げられる。

参考文献

- [1] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, *Nature Photonics* **8**, 145-152 (2014).
- [2] W. Liang, V. Ilchenko, A. Savchenkov, A. Matsko, D. Seidel, and L. Maleki, *Physical review letters* **105**, 43903 (2010).
- [3] S. Fujii, M. Fuchida, H. Amano, S. Tanaka, R. Suzuki, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, *Conference on Lasers and Electro-Optics – European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe – EQEC 2019)*, CK-5.6, Munich, 23-27 June (2019).

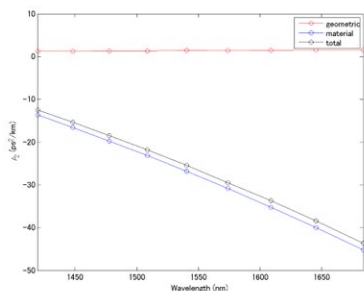


図 2：直径 4 mm，曲率半径 50 μm シリカロッド共振器の分散。

ラマンコムが発生した波長帯域は 1690-1700 nm で強い異常分散を持っていることがわかる。分散による共振周波数のずれは約 5.5 MHz と計算された。

4. スペクトル 1 本のコヒーレンス測定

誘導ラマン散乱によりレーザ線幅がどれほど変化するかを測定するために、シリカトロイド共振器でラマンコムを発生させ、図 3(a)のような実験セットアップで回折格子を用いた空間系で 1 本取り出した後、自己ヘテロダイン法で線幅を測定した。

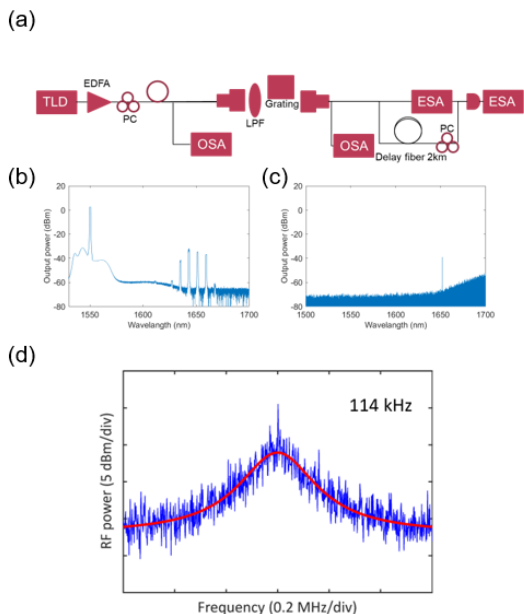


図 3(a)：線幅測定用実験セットアップ。(b)：1550.7 nm 付近で入力光を掃引したとき発生したラマンコム。(c)：ラマンコムのスペクトル 1 本 (1651.89 nm)。(d)：(c)のスペクトルの 3 dB 線幅。

図 3(b)がスペクトル 1 本の線幅で 3 dB 線幅は 114 kHz と計測された。元のレーザの線幅は 70 kHz 程度であったことから、わずかにコヒーレンスが悪くなっていることがわかる。しかし、ビート信号の線幅 500 kHz に比べて小さく、分散に比べて大きな影響を及ぼしているとは言えない。