

フッ化マグネシウム微小光共振器による散逸性カーソリトンの発生

和田 幸四郎 (B4)

光周波数コムは精密に等間隔な周波数スペクトルを持つ光源である。微小光共振器内部で四光波混合を用いて発生させたものはマイクロコムと呼ばれ、コム各成分を位相同期することで超高繰り返しパルスレーザー光源を得ることができ、これは散逸性カーソリトンと呼ばれる。位相同期のためには共振器が異常分散である必要があるためフッ化マグネシウムを用いており、ポンプ波長帯付近での強い横モード結合はソリトン形成を阻害するので形状を工夫する必要がある。本研究では共振器の作製方法を最適化し、フッ化マグネシウム微小光共振器を用いた散逸性カーソリトンの発生を達成した。

キーワード: 微小光共振器, マイクロコム, 散逸性カーソリトン

1. 序論

光周波数コム(光コム)は精密に等間隔な周波数スペクトルを持つ光源である。微小光共振器を用いて発生させた光コムはマイクロコムと呼ばれ、その繰り返し周波数はGHz帯域からTHz帯域の広範囲に渡る。マイクロコムは微小共振器内部で光カー効果の一種である四光波混合を用いるので光カーコムとも呼ばれ、ポンプ波長を中心として共振器のFSR間隔に対応した光コムをカスケード的に生成する。これらの光コム各成分を位相同期することで共振器内部に超高繰り返し周波数を持つ光パルスを生成することができる[1]。これを散逸性カーソリトン(カーソリトン)と呼び、その発生のためには微小光共振器が様々な条件を満たす必要がある。

カーソリトンの発生には二つの必要条件がある。一つ目は、共振器の分散特性が異常分散であることである。二つ目は、カーソリトン発生を狙う共振モードに対してポンプレーザーの波長が長波長側に存在することである。これらの必要条件はマイクロコムのダイナミクスを記述するLugiato-Lefever Equation (LLE)から導くことができるが、簡単な理解として異常分散特性によるパルス拡大と光カー効果によるパルス圧縮が釣り合うため共振器内部でパルス形状が安定化する、カーソリトンの安定解が共振モードの長波長側にのみ存在する、と理解するとよい。またカーソリトン発生を狙う共振モード付近に強い横モード結合や強い高次分散が存在するとカーソリトンが発生しないことが知られている[2]。これらの影響を小さくする簡単な方法として共振器の導波路部分の形状(マイナー直径)をなるべく鋭利にすることがあげられる。感覚的に高次モードが共振器の裾側に追いやられ、共振器を結合させる際に基本モードのみを取得しやすくなるためである。

フッ化マグネシウム(MgF₂)は異常分散特性を持ち熱や衝撃に強い結晶材料のため、カーソリトンの発生によく用いられる材料である。従来の田邊研究室の共振器はマイナー直径が大きい(600 μm~)ため、横モード結合が強くカーソリトンを発生させることができなかった。本研究では共振器の製作工程を最適化することでカーソリトンの発生が見込める共振器を確実に製作する方法を確立し、実際にカーソリトンを数秒間安定化させることに成功した。

2. 共振器の製作

共振器の製作工程を簡単に説明する。円柱状のMgF₂試料を真鍮棒にUV硬化剤を用いて接着し、真鍮棒部分をスピンドルに挿入して全体を高速回転させる。次にダイヤモンドペーパーを擦り付けて共振器の概形を切削する。最後にダイヤモンドペーストの粒度を小さくしながら共振器の表面を研磨する。

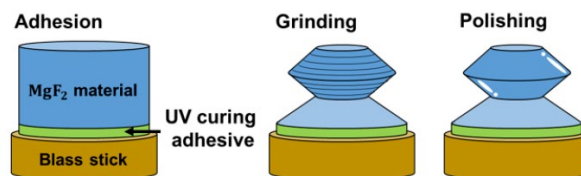


Fig. 1: 共振器の製作工程。

カーソリトンの発生にはカーコムの発生が大前提なので $Q=10^9$ 程度が必要である。ここで重要なトレードオフが生じる。 Q 値は共振器表面の滑らかさと同義なので高めるためには長時間の研磨が必要である。それに対して共振器のマイナー直径を小さく抑えるために研磨の時間は短い方がよい。この問題を解決するために、ダイヤモンドペーストの粒度ごとに研磨時間を変えた共振器に対して逐一 Q 値を測定して最適なパラメータを導出した。その結果、マイナー直径が $\sim 200 \mu\text{m}$ で $Q=10^9$ 程度の共振器を安定して製作できるようになった。分散測定を行った結果、異常分散特性が確認できたことに加えて、従来の共振器と比べて高次モードの数が減っており横モード結合もそのほとんどが弱いものであることがわかった。

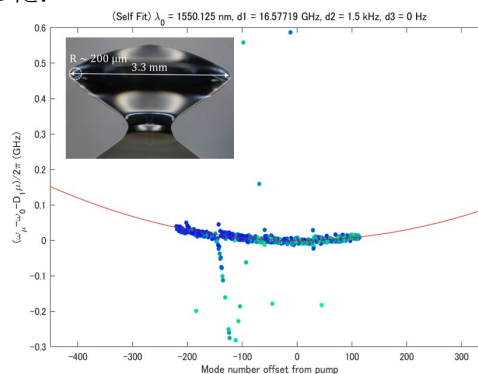


Fig. 2: 共振器の概形と分散特性。各点は対象のモードファミリーの共振スペクトルであり、青色に近いほど共振が強いことを表す。

3. 散逸性カーソリトンの発生

共振器への入力パワーが 300 mW 程度となるようにポンプレーザを増幅し、1550.4511 nm 付近にある共振モードに対して短波長側から長波長側に向かって波長掃引を行うと、カーコムが盛んに発生していることが確認できた。そのカーコムの内部パワー波形をクローズアップすると、内部パワーが階段状に離散的に減少する過程が確認できた。これはソリトンステップと呼ばれ、共振器内部に存在するパルスの個数に応じて離散的な値を取るカーソリトン発生の証拠である。ソリトンステップの持続時間はポンプレーザの強度・偏波とテーパファイバの結合状態を微調整することで、初期段階では 50 μ s 程度であったのを 1 ms まで伸ばすことができた。ソリトンステップの長さはカーソリトンを維持できるポンプレーザのデチューニング許容範囲に対応しているため、カーソリトンの安定化のためにはその範囲内で波長掃引を停止する必要がある。十分伸ばしたソリトンステップにおいて波長掃引を停止するとカーソリトンを 100 ms 程度維持することができた。

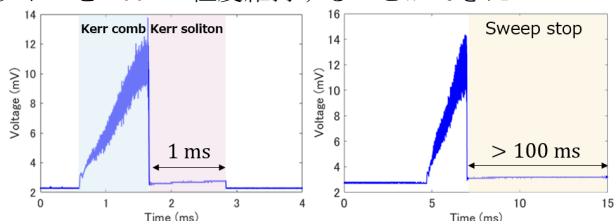


Fig. 3: ソリトンステップ. (左図)ソリトンステップは光カー効果と非線形周波数シフトによる内部パワー増加と急落によって構成される。(右図)内部パワー急落後即座に波長掃引を停止するとソリトンステップが飛躍的に長くなる。

カーソリトンを数秒間安定化させるためには波長掃引速度も微調整しなければならない。ソリトンステップの内部パワー減少による共振器の冷却とカーコムの内部パワー上昇による熱拡散の遅延に由来する共振器の加熱の熱平衡を取らなければ、デチューニング許容範囲が不安定になりカーソリトンが維持できなくなる。そのために熱拡散の遅延を波長掃引速度によって微調整する必要が生じる。微調整を終えて更に 2 ms 程度まで伸びたソリトンステップにおいて波長掃引を停止するとカーソリトン状態を 10 秒程度まで維持することができ、その周波数スペクトルを取得することができた。

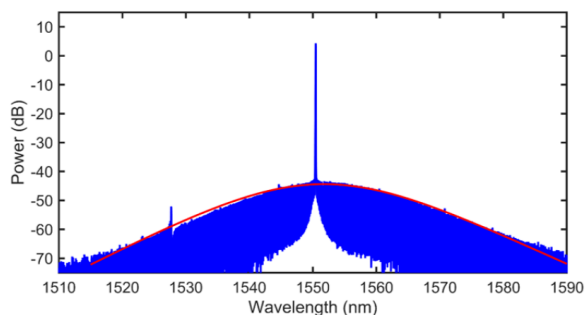


Fig. 4: ソリトンスペクトル. FWHM は 2.05 THz, FSR は 16 GHz, ポンプパワーは 24.3 dBm, ポンプ周辺のコムパワーは -24 dBm であった。

4. フィードバック

外乱によりデチューニング許容範囲が不安定になる、ポンプレーザが波長掃引停止後にも揺らぐ等の問題からカーソリトンが自律的に長時間安定化することは見込めない。先行研究[3]からポンプレーザの波長に対するアクティブなフィードバック系を構築することとした。具体的には、カーソリトンの発生実験に用いたセットアップに共振モードに対するサイドバンドを立てるセットアップを組み込み、ソリトンステップ内にサイドバンドのエラーシグナルのゼロクロスポイントを得るところから始めた。

カーソリトンの発生実験と同様にソリトンステップを 1 ms 程度まで伸ばしたら、EOM によって変調を加えることでサイドバンドを立てた。それに対してエラーシグナルを取得すると、ソリトンステップ内にサイドバンドのエラーシグナルのゼロクロスポイントを得ることができた。

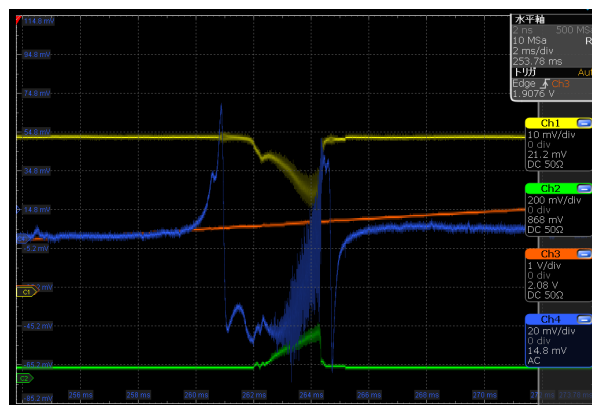


Fig. 5: ソリトンステップと立てたサイドバンドに対するエラーシグナル。

今後はこのゼロクロスポイントに合うようにポンプレーザの波長に対してフィードバックを行うことでカーソリトンを安定化しなくてはならない。そのために次の段階としてサーボを用いたフィードバック系を構築する必要がある。

5. 結論

本研究では、フッ化マグネシウム微小光共振器の製作工程を最適化することでカーソリトンの発生が見込める共振器の量産体制を確立した。諸条件を微調整することでカーソリトンを数秒間安定化させることに成功した。またソリトンステップに対してサイドバンドを立てたエラーシグナルを取得した。

今後はサーボを用いたフィードバック系を構築してカーソリトンを長時間安定化させることを目指す。

参考文献

- [1] T. Herr, *et al*, Nature Photonics **8**, 145(2014)
- [2] T. Herr, *et al*, Physical Review Letters **7**, 123901(2013)
- [3] W. Weng, *et al*, Physical Review Letters **122**, 013902(2019)