

分散制御した高 Q 値 MgF₂ 微小光共振器による 超広帯域光パラメトリック発振

Shun Fujii (D2)

分散制御した高 Q 値 MgF₂ 結晶微小光共振器を用いて、1 オクターブ以上離れた超広帯域光パラメトリック発振を実証した。1.55 μm 連続光の励起により、1.1 μm および 2.4 μm の波長帯域において四光波混合によるアイドラ/シングル光を観測した。本研究に用いた MgF₂ 結晶共振器はコンピュータ制御された超精密加工によって作製され、分散制御性と高 Q 値を両立することに成功した。

Key word: 微小光共振器, 四光波混合, 分散制御

1. 背景

微小光共振器を用いたカー非線形効果による光パラメトリック発振(Optical parametric oscillation, OPO)に関する大きな注目が集まっている [1]. 従来の OPO に対して、高 Q 値微小光共振器は連続光入力によって発振するという特徴がある。高 Q 値かつ低モード体積であるという利点を生かし、強い光と物質の相互作用を引き起こすことで共振器内部で位相整合を満たす四光波混合 (Four-wave mixing, FWM) の発生を可能とする。特に、異常分散条件を満たすとき、変調不安定性によるパラメトリック利得を種として、共振器内部で四光波混合が連鎖的に発生することで光カーコムとよばれる光周波数コムを形成する。また、光カーコムの光スペクトルは分散プロファイルに依存することから、分散制御 (Dispersion engineering) が光カーコムにおける重要な技術として知られている。

近年、高次分散の光カーコムに与える影響に関して大きな注目が集まっている。通常、変調不安定性利得が作用しない正常分散領域においてはパラメトリック発振を得ることは容易でない。しかしながら、高次分散 (三次分散以上) を利用することで励起光から遠く離れた場所で縮退四光波混合の位相整合条件を満たす特別な条件が存在する。このような現象が光ファイバシステムにおいて最初に観測されたが、近年の研究で微小光共振器系においても実験的に実証された [2-4].

本報では 1 オクターブ以上離れた超広帯域光パラメトリック発振を分散制御した結晶微小光共振器を用いて観測したので報告する [5]. 我々の実験結果は理論解析の結果と非常によく一致しており、本手法が決定論的に光パラメトリック発振を実現するために有効な手法となることを実証した。

2. 高次分散を利用した分散制御手法

共振器分散は微小光共振器の共振周波数の相対的な位置関係として理解することができる。モードナンバー μ に対して、すべての共振角周波数は次のように与えられる。

$$\omega_{\mu} = \omega_0 + \sum (D_j \mu^j) / (j!) \quad (j \geq 1). \quad (1)$$

ここで二次以降の実効的な分散 D_{int} についても μ を用いて同様に表すことができ、以下のように与えら

れる。

$$D_{\text{int}} = (1/2)D_2\mu^2 + (1/6)D_3\mu^3 + (1/24)D_4\mu^4 + \dots, \quad (2)$$

ここで D_1 は共振器の自由スペクトル領域(FSR), D_2 は二次分散, D_3 および D_4 は高次分散である。ここでは五次以降の分散は無視できる。

異常分散は正の D_2 に対応し、モード同期状態である光ソリトン実現する条件としても知られる。その一方で、本研究で用いるパラメトリック発振過程は異常分散を必要とする従来の光カーコムの発生機構とは異なっている。最初のサイドバンド光はポンプ、シグナル、アイドラという三つの光の位相整合から発生するが、そのときの位相整合条件は負の D_2 (正常分散) と四次分散の関係から以下のように与えられる。

$$\mu_{\text{PS}} = \pm \sqrt{\frac{-12D_2}{D_4}}. \quad (3)$$

この関係は四次分散が実効的にポンプ光周辺の弱い正常分散を補償することで、ポンプから遠く離れた帯域において四光波混合の位相整合を満たすことを示している。一般的にゼロ分散付近では二次分散の値は四次分散の三桁から四桁ほど大きいため、広帯域な周波数サイドバンド光を発生することができる。

四光波混合によって発生した最初のサイドバンド光が再び四光波混合を引き起こすことによって、最終的に三つのコムクラスターが生成される場合がある。図 1(a) に概略図と実験セットアップを示した。増幅した連続光をテーパファイバを介して共振器へ入力し、発生した光スペクトルは光スペクトルアナライザーを用いて観測された。

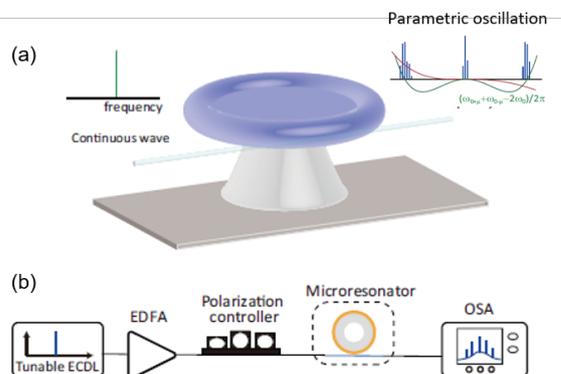


図 1: (a) (b) 微小光共振器における光パラメトリック発振の概略図と実験セットアップ。

3. 微小光共振器の作製手法および1オクターブ離れた四光波混合の実験実証

本研究ではフッ化マグネシウム(MgF₂) 結晶共振器を作製した。直径は 508 μm , 曲率半径は 36 μm , であり, 中心周波数における FSR は 137 GHz である。結晶微小光共振器は研磨加工によって作製されることが一般的であるが, 本研究ではコンピュータ制御による超精密加工を採用した[6]。コンピュータ制御による精密機械加工の大きな利点は構造分散による分散制御性であり, その点で従来の研磨加工と大きな違いがある。切削加工のみで高 Q 値を達成するために, 結晶異方性をはじめとする様々な切削条件を最適化することによって機械加工のみで 10^8 を超える超高 Q 値を実現した。

図 2(a) に超精密機械加工による結晶共振器作製のセットアップを示す。広帯域パラメトリック発振を実現する分散を有する共振器を作製するために, 切削工程はプログラムによって完全に制御されている。図 2(b) には共振器分散 D_{int} の測定結果を示す。設計値 (計算値) は赤線で示されており, 実験結果と非常によく一致していることが確かめられた。

図 2(c)-2(e) に分散測定結果をもとに基本 TE モードを励起したときの実験結果を示す。まずはじめに, 波長 1550.56 nm, 入力パワー 350 mW で共振モードを励起した。励起波長をチューニングすることによって, 1140 nm および 2425 nm にパラメトリックサイドバンド光の発振を確認した[図 2(c), (d)]. このとき, 図 2(d)左に示すように, 高周波数側では 1-FSR 間隔でコムクラスターが発生していることが分かる。一方で, 低周波数付近においては二次サイドバンド光の生成は確認されなかった。この理由として 2.4 μm 波長帯におけるシリカファイバの強い光吸収が考えられる。フッ化物材料自体は可視域から中赤外域まで広く透過するため, 共振器内部では高周波側でも高いパワーが得られていると考えられる。次に, 励起波長を 1549.47 nm にある隣の共振モードに調整することで波長 1137 nm および 2433 nm にパラメトリック発振を観測した[Fig. 2(e)].

ここで得られた実験結果は図 2(f) に示す理論値と非常に一致している。赤および青い円は測定値を示しており, 二つの基本モードを励起した場合の理論的な位相整合周波数は実線で示されている。観測された FWM サイドバンドの周波数シフトは 1 オクターブを超えており, 最大で 140 THz に達している。またここで得られた結果は, 励起波長を変化させるだけでさらなる波長可変性があることを示している。本実験における励起波長は, 使用した励起レーザーの波長可変帯域に制限されているが, 将来的にはさらなる拡張が期待できる。

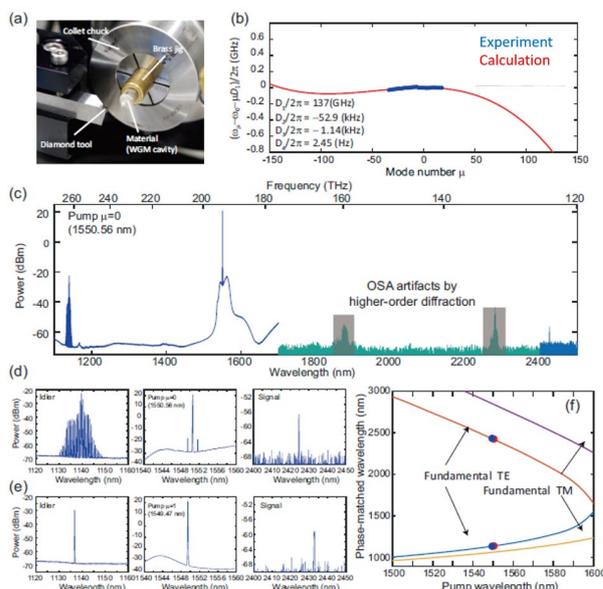


図 2: (a) 超精密加工による結晶共振器作製の実験セットアップ。 (b) 励起モードの分散の計算値 (赤線) および測定値 (青円)。 (c) 励起波長 1550.56 nm における観測された光スペクトル。 (d) (e) パラメトリック発振の拡大図。 (f) 励起波長に対する基本モードの位相整合波長の理論値 (実線) および実験結果 (円)。

4. 結論

分散制御した結晶微小光共振器を用いて, 1 オクターブ以上に広がる超広帯域な位相整合光パラメトリック発振を実現した。高 Q 値および精密な分散制御が, パラメトリック発振およびクラスターコムの生成に重要な役割を果たしており, さらなる波長可変性の可能性も同時に示した。我々の結果は, コンパクトで広いチューニング範囲をもつ微小光共振器型のパラメトリック発振器を実現するだけでなく, これまでほとんど調査されてこなかった T バンド (1.0–1.26 μm) や O バンド (1.26–1.36 μm), さらに中赤外域における光カーコムの可能性を示すものである。

References

- [1] P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg, *Nature* **450**, 1214 (2007).
- [2] A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, S.-W. Huang, and L. Maleki, *Opt. Lett.* **41**, 5102 (2016).
- [3] S. Fujii, T. Kato, R. Suzuki, and T. Tanabe, *Opt. Lett.* **42**, 2010 (2017).
- [4] N. L. B. Sayson, H. Pham, K. E. Webb, V. Ng, L. S. Trainor, H. G. L. Schwefel, S. Coen, M. Erkintalo, and S. G. Murdoch, *Opt. Lett.* **43**, 4180 (2018).
- [5] S. Fujii, S. Tanaka, M. Fuchida, H. Amano, Y. Hayama, R. Suzuki, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, *Opt. Lett.* **44**, 3146 (2019).
- [6] S. Fujii, M. Fuchida, H. Amano, R. Suzuki, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, *Conference on Lasers and Electro-Optics (2019)*, paper STh4J.