

# 省エネルギーな超高速光パルス列の発生素子に関する研究開発 (122103009)

## 研究代表者

田邊孝純 慶應義塾大学理工学部電子工学科

Takasumi TANABE Department of Electronics and Electrical Engineering, Keio University

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

## 概要

シリカは優れた光学材料であり、シリカトロイド微小光共振器を利用すると極めて高い性能の光閉じ込めが得られる。すると弱い連続光を入射しただけでも効率的に光学非線形効果が得られ四光波混合波を発生できる。共振器の自由スペクトル領域 (FSR) の波長間隔で発生する四光波混合波の各波長成分の位相はお互いに揃うので、時間領域では FSR の逆数に等しい繰り返しパルスが得られる。これは一種のパッシブモードロックであるが、シリカトロイド微小光共振器はサイズが小さいため、集積可能、省エネルギー、高繰り返しという特徴が得られる。本研究ではそれらの実証に加えて、機械的安定性に優れた光ファイバ接触させた状態でのパッケージング技術を開発した。

## 1. まえがき

光ファイバや PLC (平面光波回路) 等のシリカからなる光デバイスは通信波長帯の光に対して低損失であり、フォトニックネットワークの構築には欠かせない。しかしこれまでは、これらのデバイスはパッシブな利用に限られてきた。光の機能性の利用につながるアクティブな光操作を行うためには光学非線形現象の利用が欠かせないが、光学非線形定数は極めて小さく、現実的なパワーでその効果を得ることは難しかった。

高ビットレートな繰り返しパルスを発生する光源として、商用でも手に入るような安価な半導体レーザーを用いたが、そのような素子は比較的微弱な連続光しか発生できない。そこで、半導体レーザーからの出力を、シリカの非線形光学効果を利用して、チップを透過させただけで、高い繰り返しを持つ短光パルス列に変換することを目指した。これは一種のパッシブモードロックであるが、従来は大型な固体レーザーや光ファイバレーザーが必要だった。しかしそれではサイズもコストも、そして何よりも消費電力が大きすぎる。

信号処理に要する消費電力の低減は重要な課題であり、高速処理に必要な高レート光パルスが半導体レーザーの微弱な光から直接得られれば、高速光信号処理の省電力化にブレークスルーをもたらすと期待される。

そこで、そこで本研究では、極めて高い光閉じ込め能力 (高 Q 値) を持つシリカトロイド微小光共振器を利用して、小さな入力パワーで 3 次非線形効果の一つである四光波混合を得て高繰り返し短パルスを発生させることを目的とした。

研究開発をスタート時点において、微小光共振器を利用したパルス光源の開発に関する関連研究は、国内では皆無であったものの、欧米においてはスタートしていた。その中で本研究の独自性は、本素子の機械的安定性を飛躍的に向上させて、素子を実験室外に持ち出すための基盤技術を開発した点にある。

## 2. 研究開発内容及び成果

短パルスを発生させるためには、微小光共振器のたてモード間隔に一致した複数のスペクトル線を発生させる必要がある。これはいわゆる光周波数コムに類似する光源である。キャリアエンベロープ位相までの制御は目指していないものの、各縦モード間の相対的な位相をロックすることで、時間領域では短パルスが得られる。我々はこれを光カーコムと呼ぶ。

トロイド微小光共振器が等間隔なたてモード間隔を有するためには、高精度なレーザーリフトを行う必要がある。レーザーリフトとは、プロセスの最終段階で、炭酸ガスレーザーを用いて、表面を溶融して表面張力で凝固させることで、シリカ微小光共振器における光の散乱を最小にして光の閉じ込め性能を向上させるために必要不可欠なプロセスである。その結果、強い光の閉じ込めと、自由スペクトル領域 (Free spectral range: FSR) の等間隔性に大幅な改善が見られ、効率的に光カーコムを発生できるようになる。当該研究において、光カーコムを発生した結果を図 1 に示す。

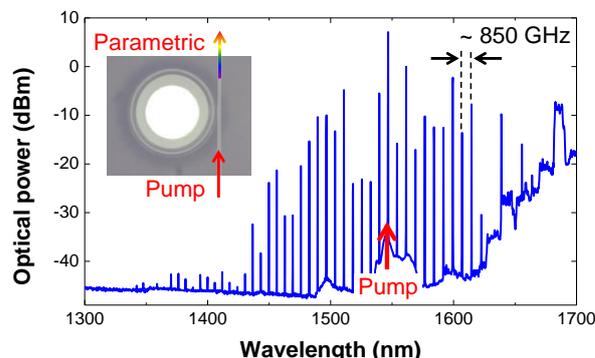


図 1 発生した光カーコム

1550 nm 付近の単一波長のレーザー光で励起すると、C 帯から L 帯にかけてスペクトルが広がり、コムが発生することが確認できる。用いたシリカトロイド微小光共振器の Q 値は約  $10^6$ 、直径約 100  $\mu\text{m}$  である。直径から計算される、自由スペクトル間隔が約 850 GHz であり、得られた光カーコムの縦モード間隔と一致する。入力は 1550 nm の波長で約 200 mW のパワーの連続光 (CW 光) を用いた。

スペクトル領域で光カーコムが発生しても、各たてモードの位相がロックされているかどうかは、時間波形を測定しなくてはわからない。我々は、光ファイバの非線形伝搬で用いられるスプリットステップフーリエ法を応用して、解析を行い、パルス化するための条件を明らかにした後に、実際に時間波形を測定した。その一例を図 2 に示す。たてモード間隔は 1.76 THz の条件でモードロックを実現させた。時間波形を観測すると、確かに 1.76 THz 間隔の超高速繰り返し光パルスが得られていることが確認できる。共振器は連続光で励起していることを思い出せば、すなわち連続光をパッシブな共振器に通すだけで超高速繰り返し光

パルスに変換する素子の開発という目的が達成できた。

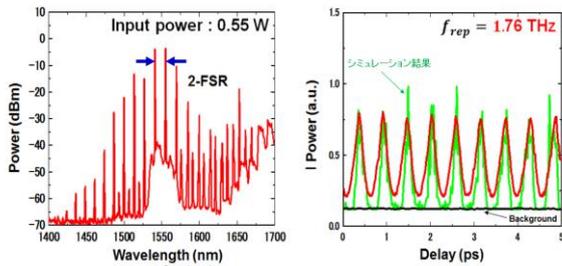


図 2 (左) 得られた光カーコム。2-FSR 間隔は 1.76 THz である。(右) 赤線は測定した時間波形。緑線は左図をフーリエ限界と仮定して計算した SHG 自己相関波形。

最後に本素子のパッケージングに取り組んだので報告する。素子が小型であっても大規模な調芯装置が必要であれば、小型という特徴を活用できない。応用に用いるためには微小光共振器をパッケージングして実験室外に持ち出せなくてはならない。そこで、微小光共振器をテーパ光ファイバと結合させた状態でパッケージングした。

シリカトロイド微小光共振器の両側テーパ光ファイバの支えを作製し、テーパ光ファイバを支えに UV 硬化剤にて接着する。こうすることで、UV 硬化剤の収縮による高さずれを最小に抑えることができる。

このようにして入出力光ファイバと共振器素子をパッケージングした素子を図 3 に示す。簡易的なパッケージングであるので、外箱が大きいですが、本質的には mm サイズのチップであるため、mm 程度に小型化することも可能はずである。



図 3 テーパ光ファイバとシリカトロイド微小光共振器をパッケージングした素子の写真。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発を通じて、シリカチップで 850 GHz を超える光パルス列の発生を実現した。得られた成果のうち、パッケージングする技術に関するものは、本素子を実験室外に持ち出すことを可能にするために、実用化への波及効果は大きいと期待される。

今後は実際の伝送実験に本素子を適用し、性能評価を行うことが求められている。既に EO 変調器を用いて発生した狭帯域な光コム光源を伝送実験に用いた例があるので、同様の伝送実験を本素子に置き換えてシステム評価を行うことで、その性能評価が可能になる。応用技術における波及効果はその延長線上にある。

ただし、本課題で開発した素子が直ちに光サブシステム

に導入されて商用に給する可能性は高くないので、引き続き研究開発を継続する必要がある。改善が必要な要素技術は 2 つあげられる。一つが温度特性の改善である。Q 値が高いためわずかな温度変化 (0.01 K オーダー) が光学特性に大きな変化をもたらす。フィールドに持ち出すためには温度特性の改善または、省エネ温度安定回路の実装が求められる。2 つ目が、光コム発生に必要な励起光パワーが安定でないといけないという点である。

このように、システムそのものの実装レベルに向けてはまだ実用化への研究開発項目が存在するが、サブプロダクトとしての成果の実用化はもっと早い可能性がある。例えば、研究レベルで用いられる伝送実験のための波長確度の高い WDM 用の光源や、TDM 用の超高速繰り返し光源としての用途。さらには超高速繰り返し性を活用した、THz 発生のための光源、さらには複数の素子を連結して実現が期待できる、ポンププローブ用光源が挙げられる。特に THz 電磁波発生のための光源開発は応用技術を広げるものとして、引き続き研究開発を継続する予定である。

### 4. むすび

本研究で取り組んだ光カーコム光源の開発を通じて、微小光共振器における低パワー非線形光学効果の深化が図られた。特に、単純な光パルス列光源として用いるのではなく、周波数成分の高い波長確度を積極的に利用する、光周波数コム光源としての展開が期待され、それは研究開発要素がまだ多く残っており、工学的にも物理学的に興味深い領域である。例えば、光周波数コム光源を開発するためには、微小光共振器特有の現象である光フォノン結合を制御して抑える必要がある。こうした非線形光学効果の理解と制御は学術的にも価値が高い。

#### 【誌上发表リスト】

- [1] R. Suzuki, T. Kato, T. Tetsumoto, and T. Tanabe, "Octagonal toroid microcavity for mechanically robust optical coupling," AIP Advances, Vol. 5, No. 5, 057127 (2015).
- [2] W. Yoshiki and T. Tanabe, "Analysis of bistable memory in silica toroid microcavity," J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 29, No. 12, pp. 3335-3343 (2012).
- [3] H. Kudo, R. Suzuki and T. Tanabe, "Whispering gallery modes in hexagonal microcavities," Phys. Rev. A Vol. 88, 023807 (2013).

#### 【申請特許リスト】

- [1] 田邊孝純、「シリカトロイド型光共振器及びシリカトロイド型光共振器の製造方法」特願 2012-041565、出願日 2012/02/28 (2015 年 3 月 3 日 審査請求)

#### 【受賞リスト】

- [1] 加藤巧己、レーザー学会第 34 回年次大会優秀論文発表賞、「微小光共振器光カーコム —超高速繰り返し光パルス列の繰り返し周波数の能動制御—」, 2015 年 5 月 30 日。

#### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.phot.elec.keio.ac.jp/>