

# 導波路型光周波数コム発生器とその応用に関する研究

Studies of Waveguide-Type Optical Frequency Comb Generator and its Applications

斉藤 崇記

(研究所・工学博士)

この論文は工学博士の論文審査のために東京工業大学に提出した申請論文を要約したものである。

## Abstract

This doctoral thesis discusses the modulation characteristics of a waveguide-type optical frequency comb generator (WG-OFCG). It has the advantages of compactness, high modulation index and low driving power, and is characterized by generation of an optical frequency comb (OFC) when the modulation index exceeds 2. To expand the OFC generation span, three methods are proposed and validated: the multiplex OFC generation system, the higher harmonic wave modulation method, and the optical loop method. I developed an optical frequency synthesizer for the 1.5- $\mu$ m wavelength region by using the WG-OFCG.

## 1 まえがき

平成10年(1998年)7月30日に東京工業大学大学院総合理工学研究科 大津元一教授に論文を申請し、平成10年11月30日に工学博士の学位を取得した。

レーザー光とマイクロ波を入力すると、レーザー周波数を中心にマイクロ波周波数間隔に多数の側帯波を発生させる光周波数コム発生器(OFCG)が開発された<sup>1)</sup>。周波数軸上に等間隔に並んだ側帯波は、光の櫛のように見えるため光周波数コム(OFC)と呼ばれる。OFCは周波数軸上の目印となる周波数グリッドとして利用可能であり、波長多重伝送(WDM: Wavelength Division Multiplexing)用周波数基準として応用が期待できる<sup>2)</sup>。

OFCGは、位相変調器を光共振器内部に納めた構造をしており、入射されたレーザー光は、光共振器中を往復する際に強い位相変調を受け、出射レーザー光は、位相変調周波数間隔に多数の側帯波を含む。

本研究では、導波路構造を持ったOFCG(WG-OFCG)を

開発し、その特性評価を行った<sup>3)-5)</sup>。また、WG-OFCGの特徴を生かしたOFC発生範囲拡大方法を考案し、その有効性を確認した。さらに、WG-OFCGを利用した光周波数センチサイズの開発を行った。以下にその研究概要を示す。

## 2 導波路型光周波数コム発生器の開発

OFCの発生範囲を広げるためには、レーザー光に、より強い位相変調を与える必要がある。そのためには、レーザー光がOFCG内を往復する回数(フィネス)と一回の往復で受ける位相変調量(変調指数)を共に高めなければならない。従来のOFCGは位相変調器としてLiNbO<sub>3</sub>等の結晶を用い、これにマイクロ波を印加させることにより位相変調を行っていた。しかしながら、変調指数がマイクロ波の電場勾配に比例するため、電場勾配方向の結晶のサイズが1~2mm程度ある従来のOFCGでは、結晶内に強い電場勾配を与えることが困難であった。そのため、結晶をマイクロ波共振器内部に置き、マイクロ波の共振により、強い電場勾配を発生させていた。しかしこの方法では、構造が複雑となり、また変調周波

数をマイクロ波共振器の共振周波数に一致させる必要があることから側帯波間隔の設定に制限があった。

これらの困難を克服するために、導波路構造を持つOFCG (WG-OFCG)を開発した<sup>3)-5)</sup>。WG-OFCGでは、レーザ光が伝播する部分のLiNbO<sub>3</sub>の厚みは数 $\mu\text{m}$ となり、強い電場勾配を印加できることから、変調指数を向上させることができる。図1にWG-OFCGの写真を示した。このWG-OFCGは、アンリツ製導波路型光位相変調器 (SCB05A) の導波路端面に反射膜を蒸着し、光共振器を構成させることにより作製した。

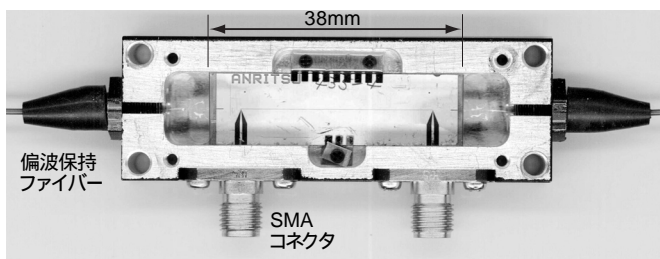


図1 WG-OFCG  
Top view of WG-OFCG

作製されたWG-OFCGの性能評価を行った。周波数3.81GHz、パワー1Wのマイクロ波入力時の変調指数は2.2であった。従来のOFCGでは、パワー10W時においても0.1~0.2程度であったが、導波路構造としたことにより、変調指数が飛躍的に向上したことが確認できた。ただし、フィネスについては、導波路伝播損失が大きいため30に止まり、従来のもの(200~300)と比較して1/10程度となった。WG-OFCGは、従来のOFCGと比較して、フィネスは1/10であるが、変調指数は10倍であり、OFC発生に関しては両者はほぼ同等であると言える。WG-OFCGにより発生されたOFCの幅は約20nmであり、従来のOFCGによる発生範囲とほぼ同じとなった。2を超る変調指数でのOFC発生は、小変調指数時には見られないさまざまな振る舞いが観測され、その結果を理論的に解析した。また、WG-OFCGには、変調指数をFSRの整数倍で任意に設定できる、位相変調器の屈折率分散の影響を受け難い、等の従来のOFCGに無い利点があることが確認できた。

### 3 OFC発生範囲拡大

周波数グリッドとして利用されるOFCは、発生範囲が広

いほど使いやすく価値も高い。そこで、本研究ではWG-OFCGの特徴を生かした以下の3つのOFC拡大方法を提案し、それぞれの有効性を実証した。

#### 3.1 多重OFC

従来は、一つのOFCGには一つのレーザ光源からの光のみを入射していた。しかしながら、OFCGは入射レーザ光に対して重ね合わせが可能であることから、複数のレーザ光を一度に入射しても問題はない。そこで側帯波発生範囲を拡大するために、一つのコム発生器と複数の光源から構成される多重光周波数コム発生システムを提案した<sup>6)</sup>。

5台の光源から出射されたレーザ光を合波し、それをWG-OFCGに入力して多重OFCを発生させた。一つ当たり20nmの幅を持つOFCを5つ並べることにより、100nmの幅を持つOFCを発生させることに成功した。導波路の屈折率分散を測定し、一つのWG-OFCGで多重化できる波長範囲の限界は、約200nmであることを見積もった。屈折率分散の値から、OFCの多重化が行えるのは、フィネスが低いWG-OFCGのみであることを導き出した。2つのOFC間のヘテロダイン検波を行い、その検波信号を一方の光源に負帰還させることにより、OFC間周波数オフセットロッキングに成功した<sup>7)</sup>。このときの2つの光源間の差周波数は0.23THz、差周波数安定度は、 $3 \times 10^{-12}$  ( $\tau = 20$ 秒)であった。近年のファイバーアンプの高性能化は著しく、そのゲイン帯域は100nmに及び、またWDMで使用が考えられている波長帯域もそれに伴って拡大した。WG-OFCGで発生できるOFCの幅は、一つ当たり数十nmであるが、この多重化によって、WDMの波長帯域全域にわたって側帯波を発生させることが可能となった。

#### 3.2 高調波重畳変調法

従来のOFCGの変調周波数は、そのマイクロ波共振器の共振周波数に限定されていた。WG-OFCGの場合、マイクロ波共振器構造を持たず、変調周波数は光共振器のFSRの整数倍であれば任意に選択できる。このことは、変調信号は単色である必要はなく、FSRの整数倍の周波数のマイクロ波を重畳させて印加させることが可能であることを示している。このWG-OFCG独自の特徴を生かして、従来正弦波であった変調信号を高調波重畳波に換え、OFC発生範囲の拡大を行った<sup>8)</sup>。

基本波に第3高調波を重畳させた変調信号において、最も効率良く、しかも安定に側帯波を発生できる条件は、基本波と第3高調波のパワー比を1:1にしたときであると理論的

に導き出した。同様に基本波，第3高調波，第5高調波の重量における条件はそれぞれのパワー比を1：1：1としたときであった。

低出力アンプの出力飽和を利用して第3高調波を発生させ，基本波と第3高調波のパワーが1：1の変調信号を作り，この信号によるOFC発生実験を行った。その結果，基本波のみのときと比較してOFC発生範囲を約3倍の72 nmに拡大できた。この発生範囲は，一つのレーザ光から発生させたOFCの幅としては当時世界最大であった。

### 3.3 光帰還ループコム法

発生したOFCをファイバーアンプで増幅後，再びWG-OFCGに帰還させることにより，OFCの発生範囲を拡大させる光帰還ループコム法を提案し，実験でその有効性を実証した<sup>9)</sup>。OFCは，時間軸上で観測すればパルス列である。このパルス列をファイバーアンプで増幅し，光遅延器，光減衰器を通した後，再びWG-OFCGに帰還させた。光遅延器により，WG-OFCG内部を伝播しているパルス列と，帰還するパルス列の位相をそろえた。

WG-OFCGを10 GHz以上の高周波で変調させる場合，マイクロ波の伝送損失が大きくなり，変調指数は低下する。変調周波数19.05 GHz，パワー1 Wのマイクロ波で駆動した場合の変調指数は，0.5である。しかし，光帰還ループコム発生法により，変調指数をまで増大させることができ，OFC発生範囲を2倍に拡大させることに成功した。

## 4 光周波数シンセサイザの開発

WG-OFCGに光周波数基準光源と波長可変光源を組み合わせれば，任意の光周波数に設定可能で周波数確度の高い波長可変光源が実現できる。この高確度波長可変光源は，マイクロ波領域におけるシンセサイザに相当するものであり，光周波数シンセサイザと呼ぶことができる。実際に光周波数シンセサイザを構築し<sup>10)-12)</sup>，その性能を評価した。

図2に構築した光周波数シンセサイザの概略図を示した。周波数基準光源のレーザ光をWG-OFCGに入射してOFCを発生させ，そのOFCと波長可変光源間のヘテロダイン検波を行う。この際，ヘテロダイン検波を行うOFCの次数を選択し，ヘテロダイン信号周波数を任意の値に安定化させれば，波長可変光源の出力レーザ光は所望の光周波数において光周波数基準光源と同等の周波数安定度，周波数確度を持つことができる。これが光周波数シンセサイザの原理である。

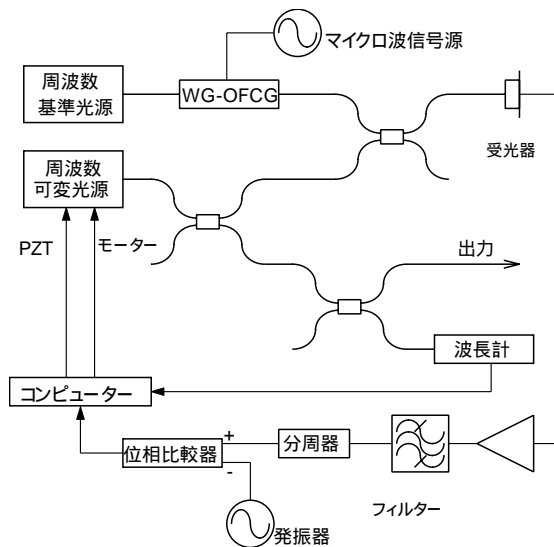


図2 光周波数シンセサイザの構成図  
Schematic explanation of optical frequency synthesizer

構築した光周波数シンセサイザの性能評価を行ったところ，周波数確度100 MHz，周波数安定度 $4.5 \times 10^{-10}$  ( $\tau = 10$  秒)，周波数設定範囲1.5408  $\mu\text{m}$ を中心に $\pm 0.5$  THzとなった。100 MHzの確度を保ちながら1 THzにわたって周波数を設定できる光源は，今回構築した光周波数シンセサイザのみである。

## 5 むすび

本論文は，導波路構造を持った実用レベルの光周波数コム発生器の研究を目的としている。このため本研究は，前期ではWG-OFCGの基本性能の測定と理論解析，中期では側帯波発生範囲拡大方法の考案と実証，後期ではWG-OFCGを利用したシステムの開発を行った。本研究によって得られた成果は，WDM用の周波数グリッドやレーザの周波数制御等に，多大に貢献できるものと期待される。特に，WG-OFCGを用いた光周波数シンセサイザは，文字通り周波数の組み合わせにより，約1THzの範囲で高確度に発振周波数が制御された光源であり，他に類を見ない物である。WG-OFCGは，光周波数シンセサイザのみならず，高確度光スペクトラムアナライザ，光ネットワークアナライザ等の実現のためのキーデバイスとなり得，今後の応用が期待できる。

## 謝 辞

本研究をまとめるに当たり，格別なる御指導と御鞭撻を賜りました東京工業大学大学院総合理工学研究科 大津元一教



授に深く感謝申し上げます。

また、本論文に関し、御指導と御助言を賜りました東京工業大学量子効果エレクトロニクスセンター 荒井滋久教授、東京工業大学電子システム専攻 関根松夫助教授、東京工業大学精密工学研究所 小山二三夫助教授、中村健太郎助教授に深く感謝申し上げます。東京工業大学大学院総合理工学研究科 興相元伸助手には非常に有益な御討論、御助言を頂き、厚く御礼申し上げます。

本論文は、著者が神奈川科学技術アカデミー大津「フォトン制御」プロジェクトと、アンリツ株式会社研究所で行った研究をまとめたものである。

### 参考文献

- 1) M. Kourogi, N. Nakagawa, C.H. Shin, M. Teshima, and M. Ohtsu, "Accurate Frequency Measurement System for 1.5- $\mu\text{m}$  Wavelength Laser Diodes," in Proc. Conf. on Lasers and Electro-Opt., Baltimore, paper number CThR57, May 1991.
- 2) S. Okamoto and K. Sato, "Optical Path Cross-Connect Systems for Photonic Transport Networks." in Proc. IEEE Global Telecommun. Conf., pp.474-480, November. 1993.
- 3) T. Saitoh, M. Kourogi and M. Ohtsu, "A Waveguide-Type Optical-Frequency Comb Generator," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.7, No.2, pp197-199, February 1995.
- 4) T. Saitoh, E. Durand, M. Kourogi and M. Ohtsu, "Waveguide type optical frequency comb generator," Proc. SPIE 2378, 212 (1995).
- 5) T. Saitoh, S. Mattori, S. Kinugawa, K. Miyagi, A. Taniguchi, M. Kourogi and M. Ohtsu, "Modulation Characteristic of Waveguide-Type Optical Frequency Comb Generator," IEEE J. of Lightwave Technol., vol.16, No.5, pp.824-832, May 1998.
- 6) T. Saitoh, E. Durand, M. Kourogi and M. Ohtsu, "Proposal of a Multiplex Optical Frequency Comb Generation System," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.8, No.2, pp.287-289, February 1996.
- 7) E. Durand, T. Saitoh, M. Kourogi and M. Ohtsu, "0.4-THz Frequency Offset Locking Between Two Optical Frequency Combs," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.8, No.1, pp.163-165, January 1996.
- 8) T. Saitoh, M. Kourogi and M. Ohtsu, "Expansion of Span-Width of an Optical Frequency Comb Using a Higher Harmonic Wave Modulation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.8, No.10, pp.1379-1381, October 1996.
- 9) T. Saitoh, S. Mattori, S. Kinugawa, K. Miyagi, "Optical Frequency

Comb Generation with an Optical Loop," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, pp.L927-L929, August 1998.

- 10) T. Saitoh, M. Kourogi and M. Ohtsu, "An Optical Frequency Synthesizer Using a Waveguide-Type Optical Frequency Comb Generator at 1.5- $\mu\text{m}$  Wavelength," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.8, No.11, pp.1543-1545, November 1996.
- 11) T. Saitoh, E. Durand, M. Kourogi and M. Ohtsu, "A frequency resettable semiconductor laser system for 1.2THz frequency span at 1.5 micron wavelength," CLEO/Pacific Rim '95, P17, 1995.
- 12) S. Mattori, T. Saitoh, S. Kinugawa, K. Miyagi and A. Taniguchi, "Optical frequency synthesizer for 0.6THz span at 1.5 $\mu\text{m}$  wavelength," CLEO/Pacific Rim '97 Tech. Digest, WD3, 73 (1997).

### 著者紹介

#### 斉藤 崇記 (さいとうたかのり)



1986年：日本大学・文理・物理卒。1988年東京  
都立大学大学院修士課程修了。  
1988年：アンリツ入社。以来、同社研究所でレ  
ーザ制御に関する研究に従事。  
1993年：同年より、神奈川科学技術アカデミー  
大津「フォトン制御」プロジェクト派  
遣研究員。  
1996年：アンリツ研究所に復帰。  
1998年：東京工業大学から博士（工学）の学位  
を取得。現在、研究所で半導体レーザ  
の周波数制御の研究に従事。

