

25 GHz 繰り返し電気光学変調コムを用いた広帯域光発生

日大生産工(院) ○中野 晶博 佐野 直哉
黒岩 芽生 阿部 紘大
日大生産工 野邑 寿仁亜 石澤 淳

1. 背景

光周波数コム(Optical Frequency combs: OFCs)は、テラヘルツ無線通信や光周波数計測、宇宙利用など様々な応用分野に用いられている。特に、キャリアエンベロープオフセット周波数(f_{ceo})にて周波数をロックしたOFCsは、デュアルコム分光法や宇宙計測での成分分析の精度向上、光格子時計の長期安定化などの応用に期待されている。このCEOロックOFCsはファイバーコムやチタンサファイヤレーザーを用いて実現してきた。しかし、これらの光周波数間隔(f_{rep})は数十～数百 MHzであり、コムモードを個別に制御し光通信やテラヘルツ無線通信に応用することは困難である。この課題に対し、我々は電気光学変調(EO)コムを使用した周波数安定化を行うことで低ノイズマイクロ波を発生させた。本手法はEOコムの特徴である数十GHzの周波数間隔と周波数軸上で種光源から離れるにつれてマイクロ波のノイズが増大することを利用し、信号発生器(SG)の位相雑音を低減する。SGの位相雑音を更に低減するためには、EOコムの光路長を短尺化する必要がある。今回、SiN導波路(SiNW)を用い、低ノイズマイクロ波発生に必要な25 GHz繰り返しEOコムの2/3オクターブ光発生を行った。

2. SiN導波路の構造分散制御

我々は25 GHz繰り返しEOコムを2/3オクターブ以上を広帯域に拡大するため、Fig. 1に示した構造のSiNWを用いた。SiNWは1種類以上の原料ガスを基板上に供給し、気相または基板表面での化学反応により薄膜を生成するChemical Vapor Deposition法で生成されている。本導波路は低温の電子サイクロトロン共鳴プラズマを用いた低温(473 K)で形成され、他のアクティブ素子に熱ダメージを与えることなく一体集積が可能なことから、複数の導波路幅を並列させることで最適な値に構造分散を可変である。成膜に使用したガスは水素を含まない重水素化シランを用いた。これは本実験にて使

用するレーザーの1.5 μm波長帯域での光吸収を抑制するためである。

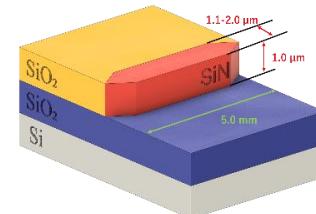


Fig. 1 SiNW configuration design

励起光波長帯域に対応する分散を制御するため、導波路長5.0 mm、幅1.1-2.0 μmで選択が可能とした。厚さは異常分散領域を拡大し最適な分散制御が可能となる1.0 μmで構成され、導波路両端にはスポットサイズコンバータを付与することで高効率な導波路への結合が可能とした。導波路幅ごとの波長分散関係を示した図をFig. 2に示す。

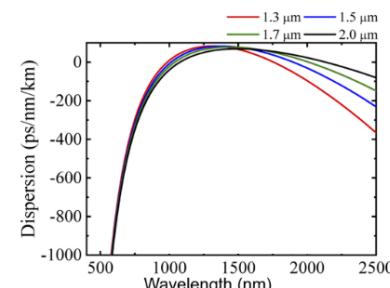


Fig. 2 SiNW dispersion curve

3. 実験方法および測定方法

下記に実験配置図Fig. 3を示す。中心波長1552.5 nmの狭線幅半導体レーザーを種光源として用い、25 GHz正弦波のRF信号にて駆動する強度変調器と位相変調器4台を用い、スペクトル帯域幅20 nm、周波数間隔25 GHzのEOコムを生成した(Fig. 3 Blue modules)。その後、Free Spectral Rangeが25 GHz、フィネス1000のファブリ・ペロー共振器フィルター(FPC)により、自然放出增幅光(ASE)雑音を低減する。この共振器はPound-Drever-Hall法を用い25 GHzのEO

Broadband light generation using a 25 GHz repetition rate electro-optic modulation comb

Akihiro NAKANO, Naoya SANO, Mei KUROIWA, Kodai ABE
Junia NOMURA and Atsushi ISHIZAWA

コムのみが透過するように制御する事で、ASE雑音低減が可能である(Fig. 3 Orange modules).

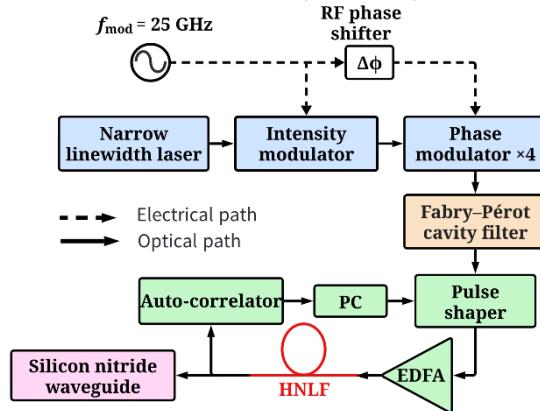


Fig. 3 Experimental setup

エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)にて光を平均5 Wまで増幅、高非線形ファイバ(HNLF)と波形成形機による2次と3次の分散を高精度することにより、自己位相変調を利用しパルス幅約30 fs(ローレンツ関数フィット)に短パルス化を行う(Fig. 3 Green modules). 次に25 GHz繰り返し短パルス光を非球面レンズにてSiNWに空間結合(結合効率56 %)し、光スペクトラムアナライザにて広帯域光のスペクトル計測を行った(Fig. 3 Pink modules).

4. 実験結果および検討

FPCでASE雑音を22 dB低減したEOコムスペクトルをFig. 4に示す。EOコムの25 GHz繰り返し間隔は維持されている。低ASE雑音な光をHNLF 0.78 mと波形整形器で自己位相変調を起こし、パルス圧縮を行った結果、自己相關波形32 fs(ローレンツ関数フィット)の短パルス発生に成功した。自己相關波形をFig. 5(a)に示す。

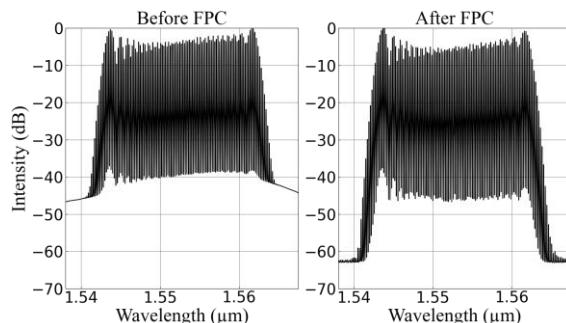


Fig. 4 EO comb spectrum before (left) and after (right) the Fabry-Perot cavity filter

Fig. 5に自己位相変調にて短パルス化した際のスペクトル(a)と、TEモードで112 pJの結合パルスエネルギーを光結合した結果、1.3 μm 導波路幅の時に1200-1700 nmでの広帯域光発生

(@ -60 dB基準)に成功したスペクトル(b)を示す。この結果はFig. 2での1500 nm周波数帯における異常分散領域に対応していることを示している。なお、1700 nm以上のスペクトルが測定できていないのは光スペクトラムアナライザの測定限界であるが、長波長側は1800 nm程度までスペクトル拡大されていると考えられる。

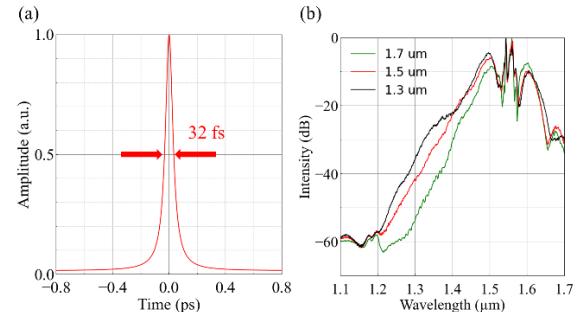


Fig. 5 (a) Lorentzian-fitted 32 fs pulse generation using self-phase modulation and (b) 2/3 octave broadband EO comb using SiNW

5. 結論および今後の展望

我々はHNLFと波形成形機による2次と3次の分散の高精度制御により、32 fsの短光パルス発生に成功した。その時の2次と3次の分散値はそれぞれ-1.205 ps^2/nm と-0.017 ps^3/nm であった。また、この平均5 Wの短光パルスを構造分散制御したSiNWに光結合することにより2/3オクターブ帯域光発生に成功した。この実験セットアップの光路長は10 m未満であり、 f_{ceo} 信号測定を行うに必要な $2f-3f$ 自己参照干渉を用いた周波数間隔25 GHzのEOコムが可能となった。今後、更なる広帯域光発生を目指すとともに、 $2f-3f$ 自己参照干渉計を用いた f_{ceo} の観測と周波数安定化を行う。

参考文献

- 1) A. Ishizawa, et al., “Direct f-3f self-referencing using an integrated silicon-nitride waveguide,” Opt. Express **30**, 5265-5273 (2022).
- 2) Y. Kikkawa, et al., “Sub-30-fs fibre-coupled electro-optic modulation comb at 1.5 μm with a 25-GHz repetition rate,” Electron. Lett., **59**: e12830 (2023).
- 3) A. Ishizawa, et al., “Phase-noise characteristics of a 25-GHz-spaced optical frequency comb based on a phase-and intensity-modulated laser,” Opt. Express **21**, 29186-29194 (2013).