

光ゲート法を用いた 1.25 GHz 繰り返しフェムト秒光パルス

日大生産工（学部）

○原竹 幸輝

林 志桜

日大生産工（院）

佐野 直哉

黒岩 芽生

阿部 紘大

中野 晶博

日大生産工

野邑 寿仁亜

石澤 淳

1. まえがき

光周波数コムは周波数軸上の「光の物差し」として、光周波数計測、分光、光通信、さらには低位相雑音マイクロ波の生成など、幅広い分野での応用が期待されている。光周波数コムのなかで、電気光学変調（EO）コムは、周波数間隔が数十GHz程度と大きく、周波数間隔を精密かつ容易に制御できるという特徴がある。一方で、EOコムには、周波数軸上で中心波長からモードナンバー N が離れるにつれ、マイクロ信号発生器に由来する位相雑音成分が N^2 増大する。我々は、コムモード次数7,200程度のキャリアエンベロープオフセット（CEO）信号を検出し、基準RF信号を用いて、EOコムを駆動している信号発生器へフィードバック制御することで低位相雑音マイクロ波発生を目指している。CEO信号の検出には、 $2f-3f$ 自己参照干渉法を用いるため、 $2/3$ オクターブ以上の帯域幅をもつ広帯域光が求められるが、25 GHz繰り返しEOコムはその周波数間隔の広さから1パルスあたりのエネルギーが低く、非線形光学効果を用いた広帯域光発生が困難である。

我々は、光ゲート法を用いてEOコムの繰り返し周波数を25 GHzから1.25 GHzへ低減し、分散補償器、および高非線形光ファイバ（HNLF）を組み合わせることで、1パルス当たりのパルスエネルギーを増大させて、HNLFを用いて $2/3$ オクターブ以上の帯域幅を有する広帯域光の発生に成功した。

2. 提案手法

本研究では、EOコムのCEO信号を検出することを目的として、光ゲート法、分散補償器、およびHNLFを組み合わせ、EOコムの短パルス化および広帯域光化を行った。

光ゲート法とは、RF信号発生器から生成される正弦波信号と同期した電気パルスジェネレータのRFインパルス信号を用いて強度変調器を駆動し、光パルス列から特定の時間間隔のパルスを抽出する手法である。この手法により、25 GHz繰り返し周波数をもつEOコムか

ら20パルスに1パルスの割合で光パルスを抽出し、1.25 GHz繰り返し周波数のEOコムを生成することができる。このように繰り返し周波数を25 GHzから1.25 GHzへと $1/20$ に低減することで、1パルスあたりのエネルギーは約20倍に集中する。これにより、高いパルスエネルギーが必要となる非線形光学効果をより効率的に利用でき、高効率に帯域幅を拡大することが可能となる。次に、分散補償器（ODC）を用いて光パルスに適切な分散補償を施すことで、パルス圧縮する。短光パルスをHNLFに結合し、非線形光学効果によるスペクトル帯域幅を拡大する。

3. 実験方法および測定方法

実験配置図をFig. 1 に示す。まず、中心波長1552.5 nm、線幅7 Hz の連続波レーザを種光源として用いた。RF信号発生器から出力される25 GHzの正弦波信号を、強度変調器（IM）1台および位相変調器（PM）4台に印加することで、スペクトル帯域幅約18 nmの平坦な25 GHz繰り返しEOコムを生成した（Fig. 2）。

次に、光ゲート法を用いてEOコムの繰り返し周波数を25 GHzから1.25 GHzに低減した（Fig. 3）。続いて、分散補償器により高精度な分散補償を施し、波長成分の到達時間を揃えてパルスを時間的に圧縮した後、ファブリペローフィルタ（FPF）を通過させることで自然放増幅光雑音を抑圧した。さらに、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）によって平均出力1 Wまで光パルスを増幅し、HNLFに結合することで、非線形光学効果によるスペクトル拡張を行った。その後、光スペクトルアナライザ（OSA）とオートコリレータ（AC）を用いてこの光信号を測定した。

Generation of 1.25 GHz Repetition Rate Femtosecond Optical Pulses Using the Optical Gate Method

Koki HARATAKE, Shion HAYASHI, Naoya SANO, Mei KUROIWA,
Kodai ABE, Akihiro NAKANO, Junia NOMURA and Atsushi ISHIZAWA

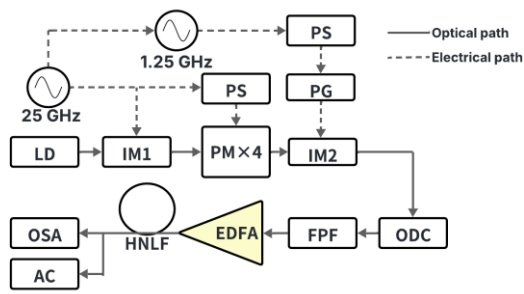


Fig. 1 Experiment setup

LD: Laser Diode, IM: Intensity Modulator,
PM: Phase Modulator, PG: Pulse Generator,
FPF: Fabry-Pérot Filter, PS: Phase Shifter,
ODC: Optical dispersion compensator,
EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier,
HNLF: Highly Nonlinear Fiber,
SA: Spectrum Analyzer, AC: Autocorrelator,

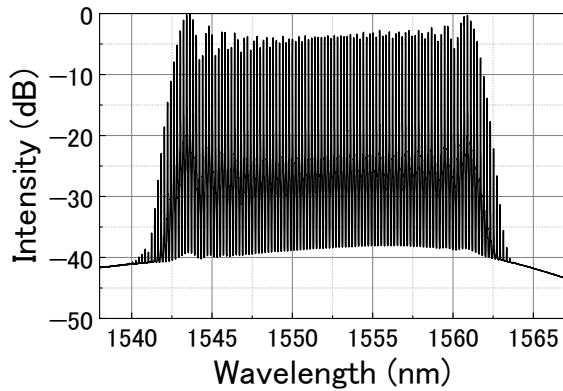


Fig. 2 Optical spectrum of the EO comb with 25-GHz mode spacing

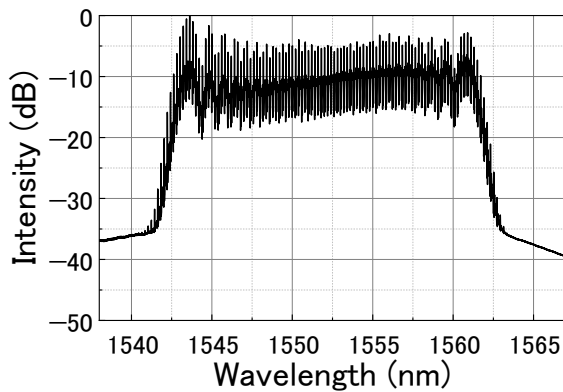


Fig. 3 Optical spectrum of the EO comb with 1.25-GHz mode spacing

4. 実験結果及び検討

分散補償器により高精度な分散補償を施し、HNLFに結合することでパルス幅を58 fsまで圧縮した短光パルスの波形をFig. 4に示す。

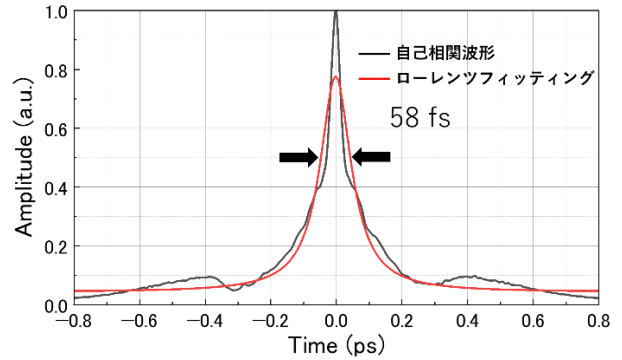


Fig. 4 Optical pulse waveform at 1.25-GHz repetition rate

Fig. 5に、得られた広帯域光スペクトルを示す。光ゲート法を用いて繰り返し周波数を25 GHz繰り返しから1.25 GHz繰り返しに低減し単一パルス当たりのエネルギーを約20倍まで増加させることで、 $2f$ - $3f$ 自己参照干渉法を用いるために必要な $2/3$ オクターブ帯域以上の1.25 GHz繰り返しの広帯域光発生に成功した。

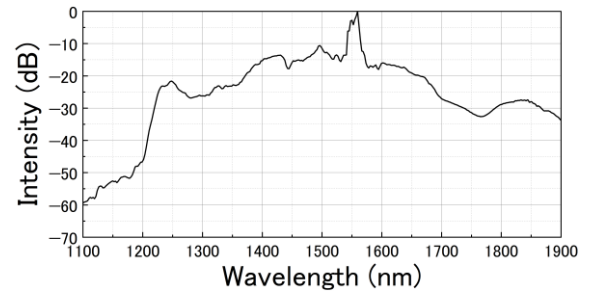


Fig. 5 The supercontinuum spectrum with 78-cm HNLF

5. まとめ

本研究では、光ゲート法を用いることで、EOコムの繰り返し周波数を25 GHzから1.25 GHzへと低減することに成功した。また、HNLFと分散補償器による高精度な分散制御により、パルス幅を58 fsまで短パルス化するとともに、 $2f$ - $3f$ 自己参照干渉法を用いるために必要な $2/3$ オクターブ帯域以上の1.25 GHz繰り返しの広帯域光発生に成功した。

今後は、繰り返し周波数のさらなる低減による更なる高効率な広帯域光発生を目指すとともに、 $2f$ - $3f$ 自己参照干渉を用いたEOコムのCEO信号検出および周波数安定化を目指す。

参考文献

- 1) A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hitachi, T. Akatsuka, and K. Oguri, "Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy" scientific reports 13, 8750, (2023) .