

低繰り返し短光パルスを用いた広帯域光発生

○日大生産工(院) ○黒岩 芽生 佐野 直哉
 中野 晶博 阿部 紘大
 日大生産工(学部) 原竹 幸輝 林 志桜
 日大生産工 野邑 寿仁重 石澤 淳

1. 概要

光周波数コムは、光周波数測定や精密分光などの多様な分野で利用されており、さらなる高性能化が望まれている。その中でも電気光学変調(EO)コムは、変調器を駆動する信号発生器の周波数設定により、繰り返し周波数(f_{rep})を柔軟に制御できる特徴を持ち、デュアルコム分光において利点を有する。しかし、EOコムの f_{rep} は一般的に数十GHzと高いため、得られるデュアルコム分光の分解能は十分ではない。本研究では、EOコムベースデュアルコム分光の高分解能化を目的として、EOコムの f_{rep} を光ゲート法を用い625 MHzまで低減することを試みた。さらに、キャリアエンベロープオフセット(CEO)信号の検出に向け、精密な分散補償によるフェムト秒パルス発生を実現し、高非線形ファイバ(HNLF)を用いることで約2/3オクターブ帯域にわたる広帯域光発生にも成功した。本報告では、25 GHzから625 MHzへの繰り返し低減から、発生させたEOコムを用いた広帯域光発生について報告を行う。

2. 提案手法

2.1 CEO信号検出

光周波数コムとは、周波数軸上に等間隔に並んだ輝線スペクトルのことである。EOコムとは、電気光学効果を用いて発生させた光周波数コムである。光周波数コムがゼロ周波数までの輝線スペクトルをもつと仮定したとき、ゼロに最も近い輝線スペクトル周波数はCEO周波数 f_{CEO} と呼ばれる。CEO周波数と繰り返し周波数 f_{rep} を用いて、光周波数コムのN番目のモード周波数 f_N は

$$f_N = f_{CEO} + N \cdot f_{rep} \quad (2.1.1)$$

で与えられる。CEO周波数と繰り返し周波数を同時に安定化することで光周波数コムの安定化が実現される。CEO信号の検出には自己参照

干渉計を用いた自己参照法を用いる必要がある。光周波数コムの広帯域化が必須となる。自己参照法において2次高調波を用いる場合、N番目のモード周波数の2次高調波 $2f_N$ は式(2.1.2)のように記述できる。一方、2N番目のモード周波数 f_{2N} は式(2.1.3)のように記述できる。2次高調波 $2f_N$ と2N番目のモード周波数 f_{2N} を干渉させ検出器で受光した際に検出される差周波は式(2.1.4)のように記述でき、 f_{CEO} に他ならない。

$$2f_N = 2(f_{CEO} + Nf_{rep}) \quad (2.1.2)$$

$$f_{2N} = f_{CEO} + 2N \cdot f_{rep} \quad (2.1.3)$$

$$2f_N - f_{2N} = f_{CEO} \quad (2.1.4)$$

2.2 光ゲート法

RF信号発生器からRF正弦波信号と同期した電気パルスジェネレータから生成されるRFインパルス信号により強度変調器を駆動することによってパルス間隔を間引く。光ゲート法を用いることによって、25 GHzの光パルス列から40パルスに1パルスの割合で光パルスの選択が可能である。

3. 実験方法及び測定方法

実験配置図を Fig.3 に示す。CW レーザ(中心波長：1552.52 nm，線幅：7 Hz)を種光源とし、25 GHz の正弦波信号を1台の強度変調器(IM)と4台の位相変調器(PM)へ印加することで、約18 nmの平坦なスペクトル帯域幅を持つEOコムを発生させた。このEOコムを、625 MHz 間隔の電気パルスで駆動するIMに入射することでEOコムのスペクトル帯域幅を維持したまま、繰り返し周波数を25 GHzから625 MHzに低減できる。得られた625MHz 繰り返しEOコムを光検出器(PD)で受光し、サンプリングオシロスコープで観測を行う。さらに、625 MHz 繰り返しEOコムをエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)により平均138 mWまで増幅し、分散補償器

Supercontinuum Generation using Low-Repetition-Rate Short Optical Pulses

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

と HNLF を用いて短パルス化および広帯域化を行った。

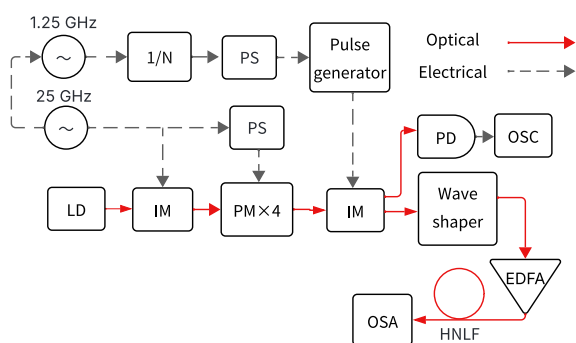


Fig.3 実験配置図

LD: レーザダイオード, PS: Phase Shifter, IM: 強度変調器, PM: 位相変調器, FP: Fabry-Pérot フィルタ, PD: 光検出器, OSC: オシロスコープ, OSA: 光スペクトラムアナライザ, HNLF: 高非線形ファイバ, EDFA: エルビウム添加光ファイバ増幅器.

4. 実験結果

4.1 光ゲート法を用いた繰り返し低減

CWレーザをIM1台とPM4台のよって変調させた際の光スペクトルをスペクトルアナライザ(OSA)で観測した[Fig.4.1.1(a)]. 25 GHz周波数間隔の輝線スペクトルが信号対雑音比40 dB程度で観測された. 次に, 電気パルスジェネレータからの電気パルスで駆動させたIMを用い, 1/40(=625 MHz)に繰り返し周波数が低減された光スペクトルをOSAで観測した[Fig.4.1.1(b)]. OSAの周波数分解能(4 GHz)以下である625MHz繰り返しの輝線スペクトルは25 GHzの場合と異なり各スペクトルが分離されず一つなぎで表示されている. 625 MHz繰り返しEOコムをPDで受光し, 光パルスをサンプリングオシロスコープで観測した. Fig.4.1.2より, 1.6 ns(625 MHz)間隔の光パルス列が発生していることが分かる.

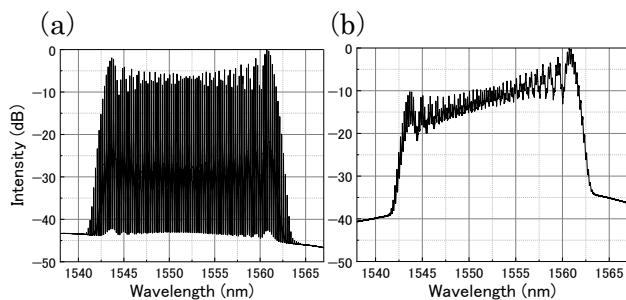


Fig.4.1(a)25 GHz繰り返しEOコムスペクトル

(b)625 MHz繰り返しEOコムスペクトル

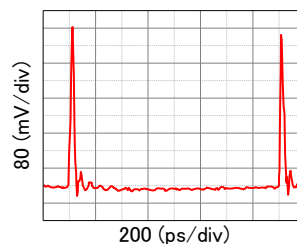


Fig.4.1.2 625 MHz繰り返しの光パルス

4.2 EOコムの短パルス化および広帯域化

発生させた EO コムを EDFA により平均 138mW まで増幅し, 分散補償器と HNLF を用いた分散制御を行い, HNLF 後の光パルスと光スペクトルをそれぞれオートコリレータと OSA で観測した. Fig.4.2.1 より, パルス幅約 30 fs の短パルス化, Fig.4.2.2 より, 約 2/3 オクターブ帯域(@ -55 dB level)の広帯域光発生に成功した.

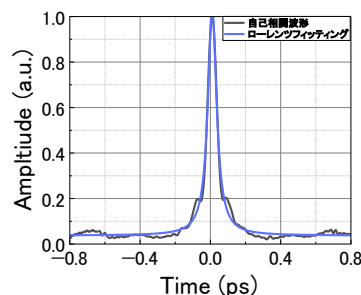


Fig.4.2.1 625 MHz繰り返し自己相関波形

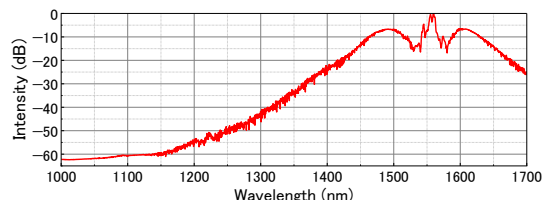


Fig.4.2.2 625 MHz繰り返しEOコム光スペクトル

5. 結論及び今後の展望

本研究では, 分散補償器とHNLFを用いた2次および3次分散の高精度制御により, 625 MHz繰り返しでパルス幅約30 fsの短パルスと, 約2/3オクターブにわたる広帯域光の発生に成功した. 今後, 得られた広帯域光を用いたCEO信号の検出を進めるとともに, 繰り返し周波数のさらなる低減により, デュアルコム分光の高分解能化の実現を目指す.

参考文献

- 1) A. Ishizawa, T. Nishikawa, T. Goto, K. Hitachi, T. Sogawa & H. Gotoh, Scientific Reports **6**, (2016), 1-6, (doi: 10.1038/srep24621)