

多段オンチップシリコン変調器を用いた光周波数コム発生

日大生産工(学部) ○大久保樹人 曾我隆英
 日大生産工(院) 谷口遼紀 北村大和
 日大生産工 野邑寿仁重 石澤淳

1. まえがき

現在、高度情報化社会の発展に伴うAIやビッグデータの発展によって情報通信量は膨大なものとなっており、今後も増大を続けることが見込まれる。そのため通信デバイスにおける大容量化、小型化、および、低消費電力化を実現することが課題となっている。また、次世代高速通信(6G)で使用される300 GHz帯の信号発生において、従来の水晶発振器を用いた電気的手法でのアプローチはノイズが増大する為大容量・高速無線通信が困難である。

本研究は、周波数軸上に等間隔に輝線スペクトルを持つ光源「光周波数コム」¹⁾を用いた光学的手法による6G通信用の低ノイズなテラヘルツ波の発生を目指す。これは光周波数コムによる超高精度な光電変換技術を用いることで、300 GHzの低ノイズな光信号を直接電気信号に変換する手法である。この実現には、光周波数コムの光路長を短尺化することと、スペクトルを広帯域化し、フィードバック制御による位相雑音を低減させることが必要条件となっている。²⁾

本報告では、オンチップ集積可能なシリコン変調器³⁾を用いて発生させた光周波数コムをシリコンナイトライド導波路(SiNW)に光結合し、非線形光学効果を用いることで、光路長の短尺化およびシステムの小型化を図り、広帯域な光周波数コムを発生させたので報告する。

2. 提案手法

3台のカスケード接続されたオンチップのシリコン変調器を用いて、25 GHz繰り返し電気光学変調(EO)コムを発生させる。従来のEOコム発生方法として、ポッケルス効果を使用したLiNbO₃(LN)変調器が用いられてきた。LN変調器筐体の長さは約80 mm程度である。一方、キャリアプラズマ効果⁴⁾を使用するシリコン変調器はオンチップ化されているため、作用長が約2 mmとなり大幅に光路長を短尺化できる。

3. 実験方法および測定方法

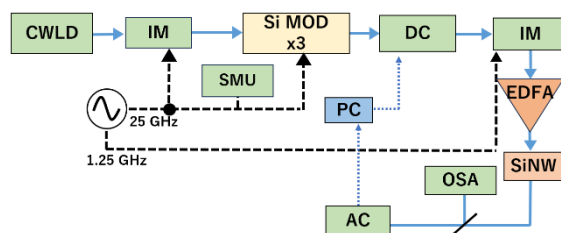


Fig.1 Experiment Setup. CWLD: Continuous wave laser diode. IM: Intensity modulator.

Si MOD: Silicon modulator. DC: Dispersion controller. SMU: Source measure units. EDFA: Erbium-doped fiber amplifier. OSA: Optical spectrum analyzer. AC: Auto correlator. SiNW: Silicon nitride waveguide.

実験方法をFig. 1に示す。種光源に波長1552.5 nmの狭線幅CWレーザーを用いた。LN強度変調器で変調された光を先球ファイバによってシリコン変調器（作用長: 2 mm×3台）に空間結合し、キャリアプラズマ効果を用いた位相変調を行うことによりEOコム発生を行った。LN強度変調器およびシリコン変調器には、ソースメジャーユニット(SMU)から6 Vの直流電源およびRF信号発生器から繰り返し周波数25 GHzの正弦波信号をシリコン変調器に印加した。非線形光学効果によるスペクトル帯域拡大には、パルスエネルギーの増加が必要となる。強度変調器ベースのパルスピッカーを用いて、EOコムの繰り返し周波数を25 GHzから1.25 GHzへ低減し、EDFAにより5 Wまで光増幅後、波形整形器による分散補償により短光パルス発生を行った。更に、1.25 GHz繰り返し短光パルスを導波路長5 mmの構造分散制御されたSiNW（導波路幅: 1.1-1.7 μm ）へ空間結合し、導波路の出力光の光スペクトルを光スペクトラムアナライザーで計測した。

Optical frequency comb generation using cascade on chip silicon modulator.

Tatsuto OHKUBO, Haruki YAGUCHI, Yamato KITAMURA, Takahide SOGA,
 Junia NOMURA, and Atsushi ISHIZAWA

4. 実験結果および考察

4.1 25 GHz周波数間隔EOコム発生

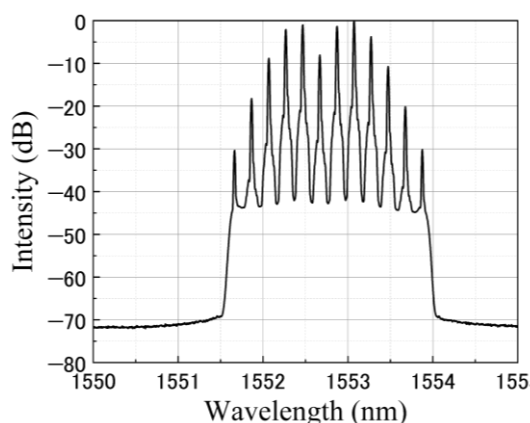


Fig.2 EO comb spectrum after dispersion controller

シリコン変調器にて発生させた繰り返し周波数25 GHzのEOコムを波形整形器に通過させた際に獲得された光スペクトルをFig. 2に示す. 設計通り, 25 GHz周波数間隔の縦モードが観測された. また, スペクトル帯域幅は275 GHz程度であることがわかる.

4.2 構造分散制御SiNWを用いたEOコムのスペクトル帯域拡大

導波路幅を1.1 μm から1.7 μm まで変えることでSiNWの構造分散を制御できる. 繰り返し周

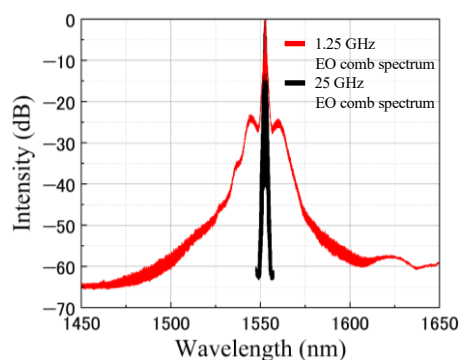


Fig.3 Silicon modulator based EO comb spectra

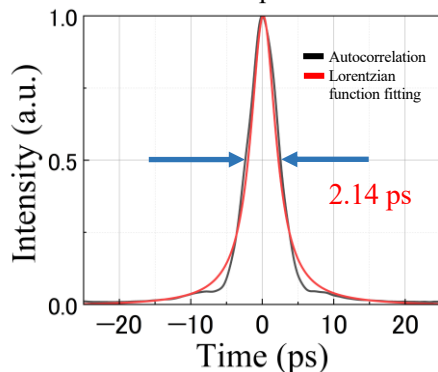


Fig.4 1.25-GHz pulse shape

波数1.25 GHzの短光パルスを導波路幅1.1 μm から1.7 μm のSiNWへ空間結合した. その結果, 導波路幅1.5 μm のSiNWに光結合した際, 最もスペクトル帯域が拡大することが分かった (Fig. 3). Fig. 2およびFig. 3の黒線で示される繰り返し周波数25 GHzのEOコムスペクトルに比べて, 帯域幅が大幅に拡大していることわかる. これは, SiNWによる自己位相変調効果による帯域幅の拡大であると考えられる.

また, 繰り返し周波数1.25 GHzのEOコムの自己相関波形をFig. 4に示す. ローレンツ関数でフィッティングした結果, 光パルスの半値全幅は2.14 psと見積もられる. また, DCオフセットを見ると自然放出光(ASE)も少ないことが分かる. 今回我々は, シリコン変調器ベースのEOコムとしては, 最も短いパルス発生に成功した.

5. まとめ

本研究は, オンチップシリコン変調器でのキャリアプラズマ効果およびSiNWでの非線形光学効果による光周波数コム発生を実現した. SiNWを用いることでパルス幅約2 psの超短光パルス発生および光スペクトル帯域幅の拡大に成功した. シリコンは集積化技術が発展しているため, シリコン変調器ベースのEOコムの発生は, 光周波数コムの小型化, 量産化, ロバスト化に貢献することが出来る. 今後の展望として, ファブリペローフィルタを導入することでASE雑音の低減し, EOコムのスペクトル帯域拡大および更なる短光パルス発生を目指す.

参考文献

- 1) 美濃島薫, 精密長さ計測のための光コムによる干渉計測, 光学, **37**, 10, (2008) pp.576-582.
- 2) Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa, Kenichi Hitachi, Tomoya Akatsuka & Katsuya Oguri "Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy" Scientific Reports. **13**, 8750, (2023)
- 3) Yugo Kikkawa, Atsushi Ishizawa, Rai Kou, Xuejun Xu, Koki Yoshida, Tai Tsuchizawa, Takuma Aihara, Tadashi Nishikawa, Guanwei Cong, Kenichi Hitachi, Noritsugu Yamamoto, Koji Yamada, Katsuya Oguri "Sub-30-fs fibre-coupled electro-optic modulation comb at 1.5 μm with a 25-GHz repetition rate" Electronics Letters. **59**, 11, (2023)
- 4) 馬場俊彦, シリコンフォトニクス"次世代光インタコネクション技術, エレクトロニクス実装学会誌, **12**, 5, (2009) pp.458-463.