

オンチップシリコン電気光学変調コムを利用した 300 GHz 搬送波の生成および位相雑音特性

日大生産工(院) ○中村 海稀 吉田 靖典 谷口 遼紀 大久保 樹人
 日大生産工(学部) 井上 雄太 堤 陽人 恩田 健生
 日大生産工 野邑 寿仁亜 石澤 淳

1. まえがき

次世代無線通信（6G）では300 GHz帯のテラヘルツ信号が検討されている。しかし、この周波数帯域は目的の周波数まで倍倍していくエレクトロニクス技術による手法では技術的限界が近く、低出力化、伝送損失、位相雑音増大、といった課題が顕在化している。近年、光周波数コムと光電変換技術を用いたフォトニクス技術による低雑音テラヘルツ波発生が注目されている。

我々は、オンチップシリコン(Si)変調器¹⁾による電気光学変調(EO)コム(シリコンEOコム)発生に着目している。EOコムを用いた300 GHz搬送波信号の位相雑音は、変調器を駆動する信号発生器の位相雑音に依存するため、その低雑音化が鍵となる。我々は、EOコムのキャリアエンベロープオフセット周波数信号を用いたフィードバック制御により信号発生器の位相雑音低減に成功した²⁾。さらなる低減には光路長の短縮が必要であり、ニオブ酸リチウム(LN)変調器より1桁短い光路長を実現できるシリコンEOコムによる300 GHz信号発生を目指している。

本研究では、シリコンEOコムとLN変調器ベースEOコムを用いた300 GHz搬送波信号の位相雑音特性を比較し、キャリアプラズマ効果と電気光学効果の違いが信号特性に与える影響を議論する。

2. 実験概要

本実験の実験配置図をFig. 1に示す。連続波半導体レーザー(線幅: 7 Hz, 波長: 1552.5 nm)を種光源としてファイバーアレイを介してTE偏波を5台カスケード接続したSi変調器(作用長: 2 mm × 5台)に導入した。信号発生器から出力した25 GHz正弦波信号をRFプローブでSi変調器に印加し、繰り返し周波数25 GHzのシリコンEOコムを発生させた。得られた光はエルビウム添加光ファイバー増幅器(EDFA)で

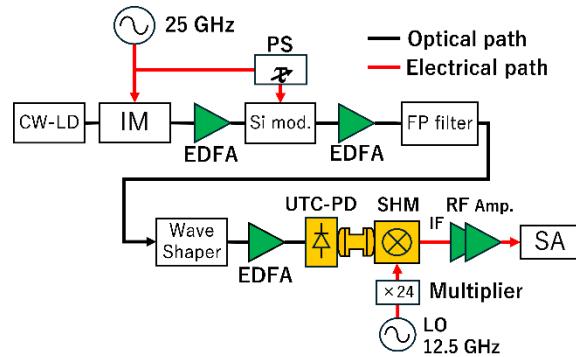


Fig. 1 実験配置図

CW-LD : Continuous wave laser diode.
 IM : Intensity modulator. EDFA : Erbium-doped fiber amplifier. PS : Phase shifter. Si-mod. : Silicon modulator. FP filter : Fabry-Pérot filter.
 WaveShaper : Ability Waveform Generator.
 UTC-PD : Uni-Traveling-carrier photodiode.
 SHM : Sub harmonic mixer. LO : Local oscillator.
 RF Amp. : Radio Frequency Amplifier. SA : Signal analyzer.

増幅した後、Fabry-Pérotフィルターにより自然放出増幅光(ASE)雑音を抑制し、波形成形器により300 GHz間隔の2本の輝線スペクトルを抽出した。さらに、単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)を用いて光差周波発生による300 GHz搬送波信号を生成した。生成した300 GHz搬送波信号はサブハーモニックミキサ(SHM)により中間周波数(IF) 100 MHz程度にダウンコンバートする。その際に用いる局部発振器(LO)の周波数は、12.5 GHz程度として24倍することで300 GHz付近となり、IFを調整することができる。ダウンコンバートしたIFを位相雑音測定器により測定を行った。シリコンEOコムとLN変調器ベースEOコムの比較のためFig. 1に示すSi変調器をLN変調器に置き換え、LN変調器ベースEOコムを発生させ、同様に位相雑音測定を行いそれぞれの位相雑音特性の比較を行った。

Phase Noise Characteristics of a 300 GHz Carrier Wave Using an On-Chip Silicon Electro-Optic-Modulation Comb

Mitsuki NAKAMURA, Yasunori YOSHIDA, Haruki YAGUCHI, Tatsuto OKUBO,
 Yuta INOUE, Haruto TSUTSUMI, Takeru ONDA, Junia NOMURA and
 Atsushi ISHIZAWA

3. 実験結果および考察

Si変調器を利用して繰り返し周波数25 GHz 帯域幅352 GHz (@-30 dB) のシリコンEOコムを発生させた (Fig. 2) .

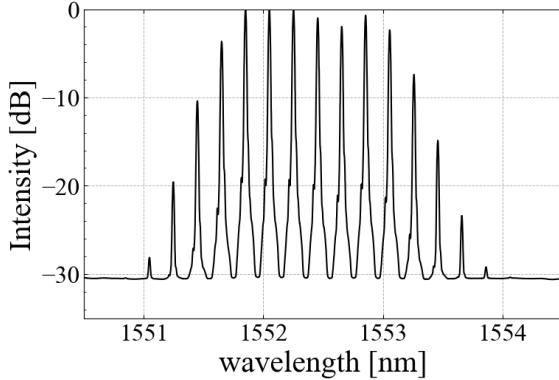


Fig. 2 シリコンEOコムスペクトル

波形成形器を用いて抽出した300 GHz間隔の輝線スペクトルをFig. 3に示す。300 GHz間隔の輝線スペクトルに他の信号が残っているが、この信号成分は波形成形器の消光比の問題により残った信号成分である。本実験で使用したUTC-PDは280 GHz以上の差周波でしか反応しないため、残っている信号成分は300 GHz搬送波生成における問題にはならない。

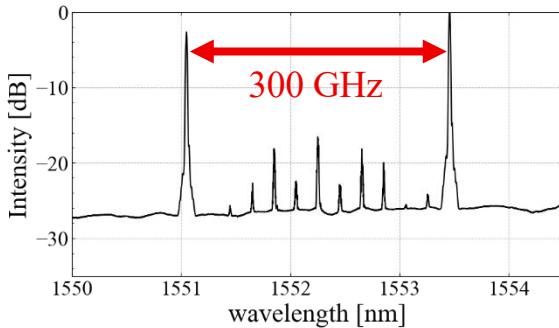


Fig. 3 300 GHz間隔輝線スペクトル

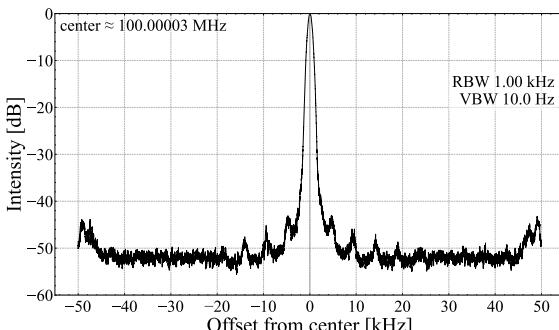


Fig. 4 IFスペクトル

UTC-PDにより生成した300 GHz搬送波信号をSHMによってダウンコンバートしたIF信号の信号対雑音比 (SNR) 45 dB以上の300 GHz信号を確認した (Fig. 4) . Fig. 5にシリコンEOコ

ム (赤) とLN変調器ベースEOコム (青) を用いた場合の300 GHz搬送波信号の位相雑音特性を示す。黒線はLOの位相雑音特性であり、本測定系のノイズフロアを示している。領域I (< 10 Hz) では、シリコンEOコムとLN変調器ベースEOコムの位相雑音特性はほぼ一致している事が分かる。領域II ($10 \text{ Hz} < II < 100 \text{ kHz}$) では、どちらの位相雑音特性もノイズフロアに達している事がわかる。一方、領域III ($> 100 \text{ kHz}$) では、シリコンEOコムの位相雑音が大きくなる傾向が観測された。このオフセット周波数は制御回路で低減することが困難であるため、この領域の位相雑音低減が今後の課題である。領域IIIの位相雑音の増大要因の一つは、シリコンEOコムの輝線スペクトルのSNRが低いことに起因すると考えられる。

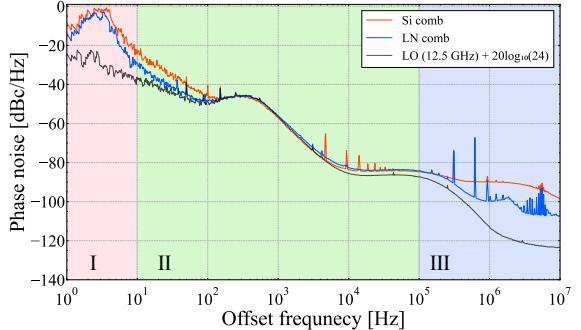


Fig. 5 300 GHz搬送波位相雑音特性

4. 結論

オンチップSi変調器を用いたシリコンEOコムを発生させた。また、UTC-PDを用いた差周波発生により300 GHz搬送波信号の生成、測定に成功した。キャリアプラズマ効果を用いたEOコムは、電気光学変調効果を用いたEOコムと同程度の位相雑音特性を持つことが分かった。今後、シリコンEOコムを用いた300 GHz搬送波信号の低位相雑音化を目指す。

参考文献

- 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**, 1 (2023).
- A. Ishizawa, *et al.*, “Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy,” *Sci. Rep.* **13**, 8750 (2023).