

SiN 導波路の非線形効果を利用した多段 Si 変調器に基づく

広帯域 EO コム生成

日大生産工(院) ○大久保樹人 谷口遼紀
 日大生産工(学部) 塚田 祐 樹 松澤優葵
 平松 勇 人 藤井佑樹
 日大生産工 野邑寿仁垂 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」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.

本報告では, オンチップ集積可能なシリコン変調器²⁾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

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³⁾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.

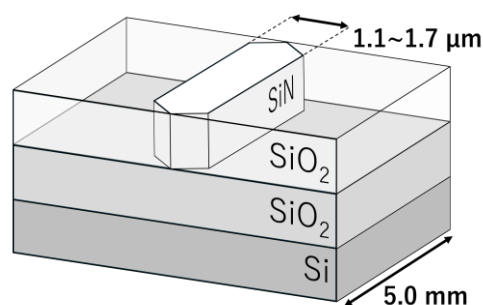


Fig. 1 SiN waveguide.

SiN導波路はSiO₂がクラッドとして, 構造分散制御がされたSiNの両面を覆う形を取っており, 長さが5.0 mmと短尺な導波路となっている. Fig. 1にSiNWの構造図を示す. 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.

3. 実験方法および測定方法

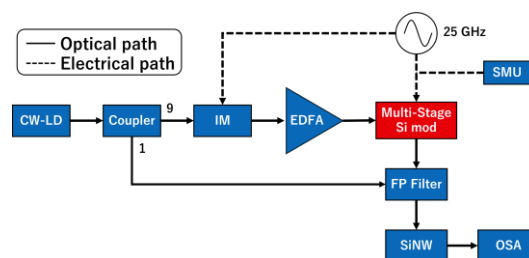


Fig.2 Experiment Setup. CW-LD: Continuous wave laser diode. IM: Intensity modulator. EDFA: Erbium-doped fiber amplifier. Si mod: Silicon modulator. SMU: Source measure units. FP Filter: Fabry Pérot Filter. SiNW: Silicon nitride waveguide. OSA: Optical spectrum analyzer.

Broadband EO Comb Generation Based on a Multi-Stage Si Modulator
 Utilizing Nonlinear Effects in SiN Waveguides.

Tatsuto OKUBO, Haruki YAGUCHI, Yuki TSUKADA, Yuki MATSUZAWA,
 Hayato HIRAMATSU, Yuki FUJII, Junia NOMURA and Atsushi ISHIZAWA

実験方法をFig. 2に示す．種光源に波長1552.5 nmの狭線幅CW-LDを用いた．LN強度変調器で変調された光をファイバアレイによってシリコン変調器（作用長: 2 mm）に結合し、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、RF信号発生器から繰り返し周波数25 GHzの正弦波信号を印加した．自然放出増幅光(ASE)雑音に対しては、Fabry Pérot (FP)Filterを用いて雑音低減を行った．非線形光学効果によるスペクトル帯域拡大には、高い入射光強度が必要となるため、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、短光パルスをSiNW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で計測した．

4. 実験結果および検討

4.1 25 GHz周波数間隔EOコム発生

シリコン変調器にて発生させたEOコムの光スペクトルをFig. 3に示す．スペクトル帯域幅は-40 dBレベルで375 GHz程度の25 GHz周波数間隔の縦モードが観測された．これは位相変調量が約 0.4π であることを示している．

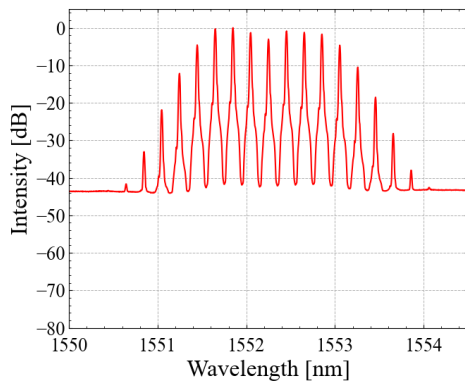


Fig. 3 EO comb spectrum with Si modulators.

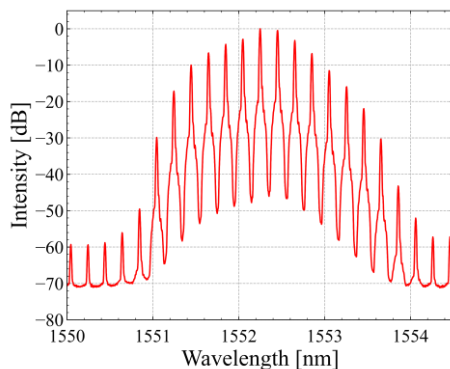


Fig. 4 Spectrum after passing through the Fabry Pérot Filter.

FP FilterによりASE雑音の低減を行ったスペクトルをFig. 4に示す．Fig. 3の透過前のスペクトルと比較し、30 dB程度の雑音低減に成功した．

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

繰り返し周波数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、SiNW透過前EOコムスペクトルに比べて、帯域幅が大幅に拡大した．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25 GHzのEOコムの自己相関波形を確認し、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の短縮が確認された．また、DCオフセットからもASE雑音の低減が確認された．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、Si変調器の多段化を行い、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) Atsushi Ishizawa, *et al.* "Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy." *Scientific Reports*. **13**, 8750, (2023)
- 2) Yugo Kikkawa, *et al.* "Sub-30-fs fibre-coupled electro-optic modulation comb at 1.5 μm with a 25-GHz repetition rate" *Electronics Letters*. **59**, 11, (2023)
- 3) 馬場俊彦, シリコンフォトンクス"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.