

# オンチップシリコン電気光学変調コムの低雑音化

日大生産工(学部) ○松澤 優葵 塚田 祐樹  
平松 勇人 藤井 佑樹  
日大生産工(院) 谷口 遼紀 大久保 樹人  
日大生産工 野邑 寿仁亜 石澤 淳

## 1. まえがき

近年, 人工知能(AI)やIoT, 映像の超高精細化に伴い, 世界のデータ通信量は指数関数的に増大し続けている. 社会基盤である光ファイバー通信ネットワークには, さらなる伝送容量の拡大が課題となっている. 現在, 基幹通信網では波長分割多重(WDM)技術が広く採用されているが, チャンネル数の増加に伴うシステムの大型化, 消費電力の増大, コストの上昇が課題となっている. この課題に対し, 周波数軸上で等間隔な多数の輝線スペクトルを持つ光周波数コム(OFC)をマルチキャリア光源として用いる手法が注目されている. OFCの導入により, WDMシステムで用いられている多数の個別レーザーを単一光源に集約可能である.

OFCの一種である電気光学変調(EO)コム<sup>1)</sup>は, 繰り返し周波数を精密かつ自由に変更可能である. また, EOコムを利用したRF信号発生器の位相雑音をフィードバック制御によって低減することが可能である<sup>2)</sup>. 位相雑音の低減は通信品質の向上につながり, フィードバック制御でさらなる位相雑音の低減を実現するには広帯域化とEOコムの光路長の短尺化が不可欠である. 従来, EOコムの生成に用いられてきたニオブ酸リチウム(LN)変調器は, その物理的なサイズが光路長の短尺化を妨げる要因となっていた. そこで本研究では, 光路長の短尺化が容易なシリコン(Si)変調器<sup>3)</sup>に着目する.

本報告では, 多段シリコン変調器で生成させたEOコムをフィルターキャビティ(FC)へ光結合することで, 自然放出光増幅光(ASE)雑音の低減とそれに伴うスペクトル帯域幅の拡大を報告する.

## 2. 提案手法

EOコムの発生方法として, 連続発振レーザーダイオード(CW-LD)を種光源とする. その光を6台の直列に接続されたオンチップSi変調器を用いて, 25 GHz繰り返しEOコムを発生させる.

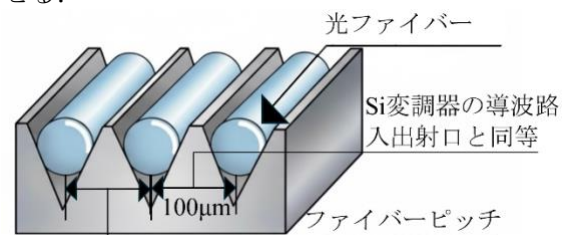


Fig. 1 ファイバーアレイの模式図

多段接続には, Fig. 1 に示すファイバーアレイを用いる. ファイバーアレイは, Si変調器チップ側面の導波路入出力と同じ間隔で光ファイバーが配置されており, Siチップの入出力へ高精度に融着されている. この構造により, Si変調器から出力された光を一度チップ外へ取り出す過程で生じる損失をエルビウム添加光ファイバー増幅器(EDFA)で補償した後, 再度次のSi導波路へ効率的に光を結合することが可能となる. しかし, この損失を補償するために用いられるEDFAにより増幅過程においてASE雑音を発生させるため, 多段構成における雑音増加の大きな課題となっている.

本手法では, FCを用いて特定の周波数の光だけを透過することにより, ASE雑音を低減する. これにより, 短尺化と広帯域かつ高い信号対雑音比を両立したEOコムの実現を目指す.

Noise Reduction of On-chip Silicon Electro-Optic Modulation Comb.

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

### 3. 実験方法および測定方法

実験方法をFig. 2に示す. 種光源には, 中心波長1552.5 nm, 線幅800 HzのCW-LDを用いた. CW-LDから出力された光は, まずLN強度変調器で変調し, 変調された光をファイバブロックにて前段のSi変調器へ光結合をした. LN強度変調器とシリコン変調器(作用長: 2 mm×6 台)には, ソース・メジャー・ユニットから6 Vの直流電圧, RF信号から繰り返し周波数25 GHzのRF信号を印加した. 各シリコン変調器の前後には偏波コントローラーを配置し, 変調効率が最大となるよう偏光状態を最適化した.

後段の変調器を透過したEOコムは, ASE雑音を除去し信号対雑音比を向上させるため, FCに入力される. 最終的に, FCを透過した光スペクトルを光スペクトラムアナライザで計測した.

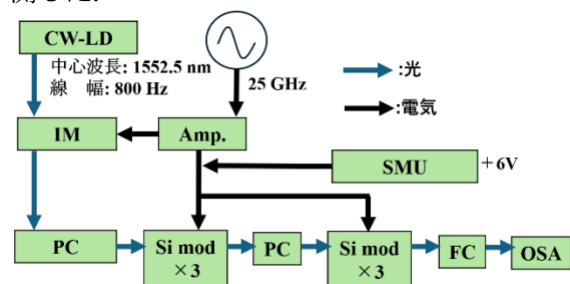


Fig. 2 実験配置図 CW-LD: 連続発振レーザーダイオード. IM: 強度変調器. PC: 偏波コントローラー. Si mod: シリコン変調器. FC: フィルターキャビティ. OSA: 光スペクトラムアナライザ. RF Amp.: RF増幅器. SMU: ソース・メジャー・ユニット.

### 4. 実験結果

Si変調器6台のFC透過前の光周波数コムのスペクトルをFig. 3 (a)に示す. 繰り返し周波数25 GHz間隔であり, その帯域幅は約375 GHzであった. しかし, ASE雑音に起因する雑音が約-40 dBレベルで観測された. 特に, 1550.6 nmおよび1553.8 nm付近のスペクトル端部では, コムが雑音に埋もれている.

Si変調器6台のFC透過後の光周波数コムのスペクトルをFig. 3 (b)に示す. Fig. 3 (b) Si変調器6台のFC透過後のスペクトルの帯域幅は強度-60 dBにおいて約425 GHzへと拡大した. この雑音低減効果は, スペクトルの端部において特に顕著である. Fig. 3 (a)では雑音に埋もれていた1550.6 nmおよび1553.8 nm付近の領域において, Fig. 3 (b)では明瞭なコムが複数本立っているのが観測でき, 光コム成分の信号対雑音比が改善された. この結果は, FCが光周波

数コムの輝線スペクトル間に存在する広帯域なASE雑音成分のみを除去したことを示している.

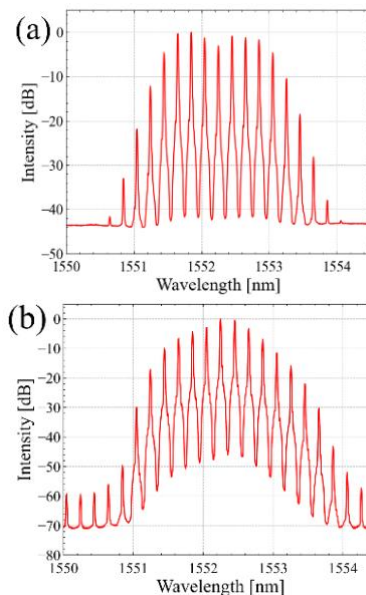


Fig. 3 実験結果 (a): Si変調器6台のFC透過後のスペクトル. (b): Si変調器6台のFC透過後のスペクトル

### 5. まとめ

本研究では, 光路長の短尺化を図るため, 直列接続されたオンチップSi変調器を用い, EOコムを発生させた. さらに, FCを使用してASE雑音を低減することで, スペクトル帯域幅を-60 dBレベルにおいて約425 GHzまで拡大することに成功した. 本結果は, Si変調器を用いたEOコムの短尺化と高性能化に大きく貢献する. 今後は, 本手法とシリコンナイトライド導波路等の非線形媒質を融合させ, さらなるスペクトル帯域拡大とASE雑音の低減を目指す.

### 参考文献

- 1) 石澤淳, 西川正, 日達研一, 後藤秀樹, 電気光学変調コム, 電子情報通信学会誌, 103, 11, 1098, (2020).
- 2) Atsushi.Ishizawa, et al. "Ultralow-phase-noise microwave generation from a broadened electro-optic comb with a feed-forward scheme." Opt. Express **21**, 22533, (2013).
- 3) Atsushi.Ishizawa, et al. "Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy." Sci Rep **13**, 8750 (2023).