

## マルチステージシリコン変調器ベース短パルス光発生

日大生産工（学部）

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

### 1. まえがき

周波数軸上において等間隔に並ぶ複数のモードから構成される光信号である光周波数コム(OFC)の一種である電気光学変調(EO)コムは、モード間隔が数十GHzと広く、周波数可変可能という特徴を有する、この特徴より、コムモードの分離や応用が容易となっている。また、先行研究にてEOコムを用いた低雑音マイクロ波・ミリ波発生技術が確立されている<sup>1)</sup>。

上記手法における位相雑音の低減は EO コムの駆動に用いるマイクロ波信号の有する雑音成分を EO コムに反映し、信号発生器へフィードバック制御を行うことで実現される。低減できる雑音はフィードバックに用いる制御回路の帯域幅に反比例するほか、制御回路の帯域幅拡大のためには光路長の短尺化が必須であることが判明している。一方で、従来 EO コムの発生に利用される LiNbO<sub>3</sub>(LN)変調器は光路長の短尺化が困難である。そこで、光路長の短尺化容易なシリコン(Si)変調器に着目し、Si 変調器ベース EO コム発生を行った。スペクトル幅の広帯域化のため、ファイバアレイによるオンチップ Si 変調器の多段化を行い、発生させた EO コムにて短パルス光を発生、集積 SiN 導波路へ光結合を行った。本報告では、マルチステージによる多段化 Si 変調器ベース EO コムによる短パルス化について報告する。

### 2. 提案手法

自己位相変調(SPM)や四光波混合等の高非線形効果によってEOコムの帯域を拡大する場合、非線形媒質に高非線形ファイバー(HNLF)を用いるのが一般的であるが、HNLFの利用光路長が長尺化を招くため、前述した位相雑音低減手法においては阻害要因となりうる。この背景を踏まえ、非線形媒質に短尺なオンチップ集積SiN導波路<sup>2)</sup>を利用し、SPMによるシリコン変調器ベース EO コムの帯域の拡大の検証を行った。SiN導波路のSPMによる帯域拡大は入射光のピーク強度に依存するため、入射するEOコムは広帯域であることが望ましい。Si変調器は単体での変調効率が低く直列接続による帯域の確保が重要となるが、

本Siチップ上においては挿入損失による制限のため3台の直列接続が限界となる。そこで、ファイバアレイによる多段化を行った。

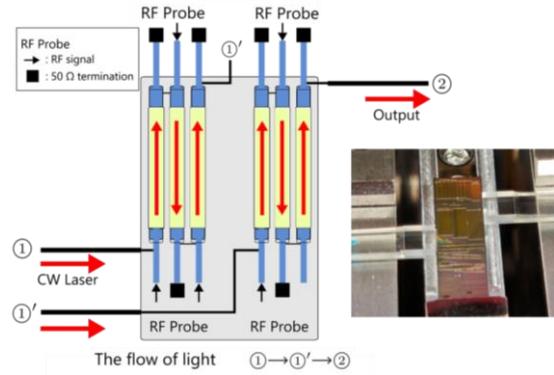
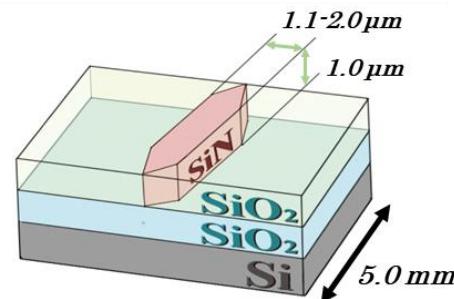


Fig. 1 マルチステージSi変調器概略図。

本実験で扱うマルチステージSi変調器の構造をFig. 1に示す。Siチップは導波路上に1, 3台のSi変調器が通った複数の導波路から構成されている。ファイバアレイは側面の導波路入出射口と同ピッチとなっており、直接Si変調器の入出射口へ高精度に融着がなされる。これにより、Si変調器入射に伴う挿入損失を補填した後、再度チップ上の異なる導波路へ光結合が可能となり、3段以上のSi変調器直列接続によるスペクトルの帯域拡大が見込める。本手法においては、Siチップ上のSi変調器3台の導波路2本を直列接続することでSiチップ1台あたりSi変調器6台の直列接続を実現した。

Fig. 2 SiN導波路構造。SiN: 売化シリコン導波路。SiO<sub>2</sub>: 二酸化ケイ素クラッド。Si: シリコン基板。

Short pulse generation based on a multistage silicon modulators

Haruki YAGUCHI, Tatsuto OKUBO, Yuki TSUKADA, Yuki MATSUZAWA,  
 Yuto HIRAMATSU, Yuki HUJI, Junia NOMURA, and Atsushi ISHIZAWA

SiN導波路の構造をFig. 2に示す。Si基板上に構成されたSiNはSiO<sub>2</sub>をクラッドとし両面を覆われる。導波路は長さ5.0 mm, 幅1.1-2.0 μmの導波路からなっており適切な構造分散制御が可能となる。また、スポットサイズコンバータにて高効率に光結合される。本手法ではSiN導波路による高非線形効果をさらに高めるため、強度変調器ベースのパルスピッカーレーザーを利用してEOコムの繰り返し周波数の低減を行った。上記操作によるピーク強度の向上は、一パルスあたりのピーク強度がパルス列の平均出力をP<sub>ave</sub>, 繰り返し周波数をf<sub>rep</sub>, パルス幅をτ<sub>p</sub>, ビーム面積をAとするとパルスのピーク強度P<sub>peak</sub>は式(1)で示す通りとなり、繰り返し周波数f<sub>rep</sub>と反比例の関係にあることに起因する。

$$P_{peak} = \frac{P_{ave}}{f_{rep} \times \tau_p \times A} \quad (1)$$

### 3. 実験方法および測定方法

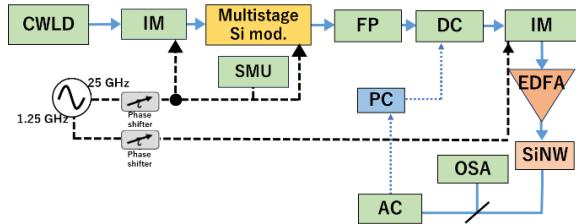


Fig. 3 実験配置図. CWLD: 連続発振レーザーダイオード. IM: 強度変調器. SMU: ソース・メジャー・ユニット. Si mod.: シリコン変調器. FP: ファブリペロフィルタ. DC: 分散補償器. EDFA: エルビウム添加ファイバー増幅器. SiNW: SiN導波路. OSA: 光スペクトラムアナライザ. AC: 自己相関器.

実験配置図をFig. 3に示す。まず、種光源であるCW半導体レーザー(線幅: 800 Hz, 波長: 1552 nm)を、RF信号発生器出力の 25 GHz正弦波信号を印加した強度変調器とマルチステージSi変調器(作用長 : 2 mm)にて変調を行うことで、25 GHz繰り返しEOコム発生を行った。マルチステージSi変調器において、直列接続がなされる導波路間は、挿入損失を補填するべく光増幅がなされる。次に、ファブリペロフィルタ(FP)を用いてASE雑音を低減し、波形整形器で分散補償した後パルス幅の狭線化を行い、後段に設けたパルスピッカーレーザーを用いてEOコムの繰り返し周波数を25 GHzから1.25 GHzへ低減した。繰り返し周波数の低減後、光増幅器によって光平均強度を5Wに増幅し、再度、分散補償器を用いて精密に分散補償を行うことでSi変調器ベースの短パルス光発生を行った。最後にSiN導波路(長さ: 5 mm)へ光結合を行うことで高非線形効果による広帯域化を図る。

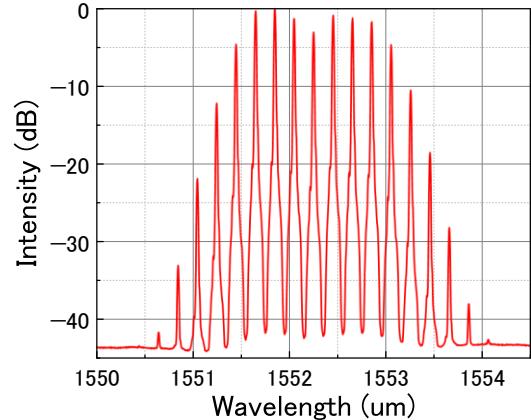


Fig. 4 Si変調器6段スペクトル.

### 4. 実験結果及び検討

SiN導波路による帯域拡大にあたりSiチップ1台で発生させたEOコムをFig. 4に示す。Siチップ1台上で変調器6台の直列接続を行い、単一チップあたり約400 GHz(@-40 dB)のEOコムの発生を行った。変調器台数の増加に伴うサイドバンド増加量の低減を確認したが、この現象は中心波長から離れて発生するサイドバンドがノイズフロアに埋没することに起因する。後段のSiN導波路による帯域拡大においてはボトルネックとなるためFPによるSEノイズフロア除去にて補償を行った。さらに、マルチステージによる多段駆動Si変調器ベースEOコムにて短パルス化を行ったほか、SiN導波路へ光結合を行うことで微小光デバイスシステムによる広帯域光発生を行った。

### 5. まとめ

ファイバアレイを用いて、チップ上の異なる導波路同士を直列接続することで、単一の導波路では不可能であった4段以上の多段駆動Si変調器ベースEOコム実現した。さらに、マルチステージSi変調器ベースのEOコムにて広帯域光の発生及び、短パルス化を行った。この結果は、オンチップ極短パルス光発生への筋道をつくるものである。

### 参考文献

- 1) A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hitachi, T. Akatsuka, and K. Oguri, "Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy," *scientific reports* 13.1, 8750, 2023.
- 2) A. Ishizawa, K. Kawashima, R. Kou, X. Xu, T. Tsuchizawa, T. Aihara, K. Yoshida, T. Nishikawa, K. Hitachi, G. Cong, N. Yamamoto, K. Yamada, and K. Oguri "Direct f-3f self-referencing using an integrated silicon-nitride waveguide," *Optics Express* 30.4, 5265-5273, 2022.