

シリコン変調器を用いたオンチップ短パルス光発生

日大生産工（院） ○谷口 遼紀 北村 大和
 日大生産工（学部） 大久保 樹人 曾我 隆英
 日大生産工 野邑 寿仁垂 石澤 淳

1. まえがき

等間隔に並んだ複数のモードからなる輝線スペクトルをもつ光周波数コム(OFC)は、その性質から、精密な光周波数測定、光通信、天体観測等、様々な用途において用いられる重要なツールとなっている。OFCの一種である電気光学変調(EO)コムは、周波数可変かつ、間隔が数十GHzであるため、コムモードの分離や応用が容易となっている。先行研究にて、EOコムを用いた低雑音マイクロ波・ミリ波発生ができることを報告したり。

EOコムを利用した低ノイズマイクロ波発生は、RF信号発生器の持つ雑音成分をEOコムに反映し、フィードバック制御を行うことで実現される。フィードバック制御による位相雑音の更なる低減にはフィードバック回路の帯域幅拡大のため、EOコムの光路長の短尺化が求められる。一方で、従来EOコムの発生に利用されるLiNbO₃(LN)変調器は光路長の短尺化が困難である。そこで、光路長の短尺化が容易なシリコン(Si)変調器に着目し、Si変調器ベースEOコム発生を行っている。スペクトル帯域幅のさらなる帯域の拡大のため、3段直列接続されたオンチップSi変調器にて発生させたEOコムを集積SiN導波路へ光結合することによってスペクトル帯域幅の拡大に成功した。本報告では、Si変調器ベースEOコムのSiN導波路の自己位相変調によるスペクトル帯域幅の拡大について報告する。

2. 提案手法

光周波数コムのスペクトル帯域の拡大は自己位相変調や四光波混合等の非線形効果によって行うことができる。一般的に、高非線形ファイバー(HNLF)を使用するが、光路長が長尺化する。EOコムを利用した雑音低減手法においては位相雑音低減のボトルネックとなる。この背景を踏まえ、オンチップ集積SiN導波路²⁾を利用した自己位相変調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導波路の構造をFig. 1に示す。SiN膜は電子サイクロトロン共鳴型プラズマ励起化学気相成膜形成法(PECVD)により200℃で成膜した。水素を含まない重水素化シ

ラン(SiD₄)をソースガスに用いた。シリコン基板上に構成されたSiNはクラッドであるSiO₂で両面を覆われる。SiNは構造分散制御がされた長さが5.0 mm、幅1.1-2.0 μmの導波路からなっており、スポットサイズコンバータにて高効率に光結合される。非線形効果は高強度の光が非線形結晶を通過することで生じるため、十分な効果を得るには、高い光強度が必要となる。そこで、SiN導波路へ結合する光パルスのピーク強度を高くするため、強度変調器ベースのパルスピッカーを利用し、EOコムの繰り返し周波数の低減を行った。上記の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はパルス列の平均出力を P_{ave} 、繰り返し周波数を f_{rep} 、パルス幅を τ_p 、ビーム面積を A とするとパルスのピーク強度 P_{peak} は式(1)で示す通りとなり、繰り返し周波数 f_{rep} と反比例の関係にあることに起因する。

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

SiN導波路による帯域拡大の検証はパルスピッカーによって繰り返し周波数を低減したEOコムをSiN導波路に光を入射した後に得られたスペクトルと、25 GHz繰り返しモード間隔時に得られたスペクトルとの比較をすることで行う。

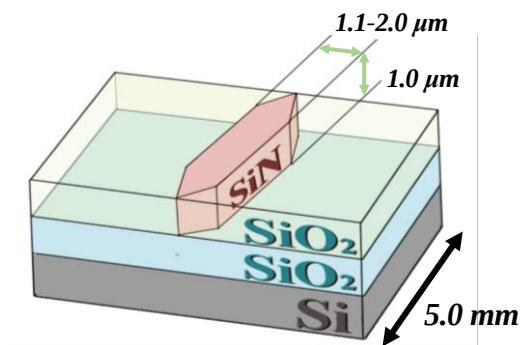


Fig. 1 SiN導波路構造。SiN: 窒化シリコン導波路。SiO₂: 二酸化ケイ素クラッド。Si: シリコン基板。

3. 実験方法および測定方法

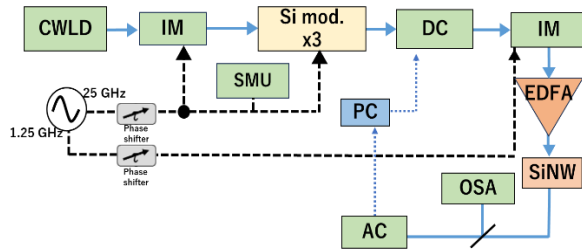


Fig. 2 実験配置図. CWLD: 連続発振レーザーダイオード. IM: 強度変調器. SMU: ソース・メジャー・ユニット. Si mod.: シリコン変調器. DC: 分散補償器. EDFA: エルビウム添加ファイバー増幅器. SiNW: SiN導波路. OSA: 光スペクトラムアナライザ. AC: 自己相関器.

実験配置図を図1に示す. まず, CW 半導体レーザー(線幅: 800 Hz, 波長: 1552 nm)を種光源とし, RF 信号発生器出力の 25 GHz 正弦波信号を印加した LN 強度変調器と 3 台 直列接続の Si 変調器(作用長: 2 mm×3 台)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. 次に, 波形整形器で分散補償を行うことで, パルス幅を 2 ps まで短パルス化し, 後段に設けた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 へ低減した, 最後に光増幅器によって 5W 光増幅を行い, 分散補償器を用いてより精密に分散補償を行った後, SiN 導波路(長さ: 5 mm)へ 56%結合効率で光結合を行うことで Si 変調器ベースの短パルス光発生を行った.

4. 実験結果および検討

まず, パルスピッカーを用いて繰り返し周波数を 25 GHz から 1.25 GHz へ低減し, 分散を精密に補償することで得られたパルスを Fig. 2(a)に示す. シリコン変調器ベースとしては短い半値全幅 2.14 ps のパルスを得ることができた. 得られた自己相関波形はノイズレベルの上昇が無く, 雑音成分の残留が少ないことがわかる. この結果は, Si 変調器ベースの光パルスとして世界最短パルスとなる. 次に, 1.25 GHz 繰り返し EO コムを構造分散制御した長さ 5 mm の SiN 導波路へ光結合を行った結果を示す. 導波路幅 1.5 μm の SiN 導波路へ光結合した際, 最もスペクトル帯域が拡大し, 12.5 THz(@ -60 dB)の帯域拡大がみられた. 25 GHz 間隔 EO コムを高非線形ファイバー(HNLF)へ光結合した際に得られたスペクトル帯域幅は 850 GHz(@ -60 dB)であり 25 GHz 駆動時に得られたスペクトルと比較し SiN 導波路によって大幅な帯域の拡大を図ることができた. この帯域の拡大はパルスピッカーによる繰り返し周波数低減によるパルスのピークパワーの上昇により, 自己位相変調効果が高まったことに起因する.

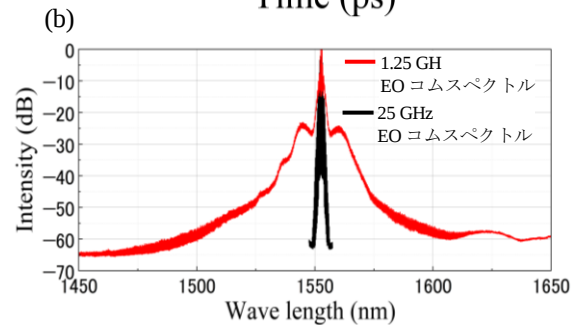
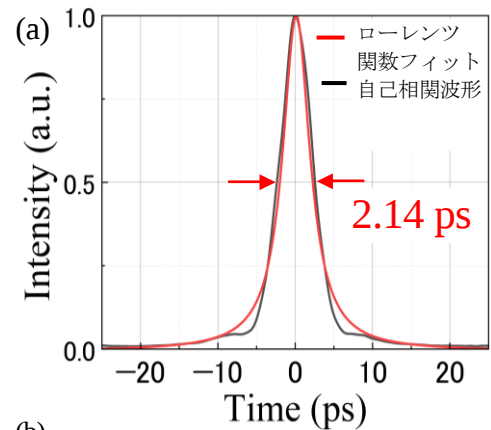


Fig. 3 (a) 1.25 GHz 自己相関波形 (b) シリコン変調器ベースEOコムスペクトル

5. まとめ

光路長の短尺化を図るため, Si変調器を用いたEOコム発生を行い, EOコムのモード間隔を提言し, 集積SiN導波路を用いることで, EOコムスペクトルを12.5 THz(@ -60 dB)まで拡大することに成功した. この結果は, 位相雑音の更なる低減のほか, 広帯域なEOコムの集積化に貢献できる. 今後はSi変調器のさらなる多段化やファブリペローフィルタによってASE雑音の低減を図ることで, 更なるパルス圧縮を行い, オンチップ極短パルス光発生への筋道をつける.

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.