

SiN 導波路を用いた 25 GHz 繰り返し広帯光発生

日大生産工（院） ○佐野 直哉 黒岩 芽生
 日大生産工（学部） 中野 晶博 阿部 紘大
 日大生産工 野邑 寿仁亜 石澤 淳

1. まえがき

キャリアエンベロープオフセット（CEO）周波数がロックされた光周波数コムは、精密な光周波数測定¹⁾、精密分光²⁾、光通信³⁾、低位相雑音のマイクロ波発生⁴⁾など様々な分野での応用が期待されている。光周波数コムの中で、電気光学変調（EO）コムは周波数間隔が数十GHz程度と大きく、周波数可変が容易という特徴がある。一方で、EOコムは周波数軸上で種光源から離れるにつれてマイクロ波のノイズが重畳し、周波数が不安定になるため、周波数を安定化する必要がある。そこで我々は、25 GHz繰り返しEOコムのCEO周波数を $2f$ - $3f$ 自己参照干渉を用いて検出し、EOコムの絶対周波数を安定化させることを目指して研究を行っている。 $2f$ - $3f$ 自己参照干渉によるCEO検出には、 $2/3$ オクターブ帯域光の発生が必要であるが、25 GHz繰り返し光パルスはパルスエネルギーが低く、非線形光学効果を利用した広帯域光発生が困難である。今回我々は、高精度な分散補償により、約30 fsまでEOコムを短パルス化し、この短光パルスを構造分散制御したSiN導波路（SiNW）に光結合することで $2/3$ オクターブ帯域光発生に成功した。

2. SiNWの設計コンセプト

我々は、25 GHz繰り返し周波数EOコムの帯域幅を $2/3$ オクターブ以上まで拡大するために、スポットサイズコンバータ（SSC）を備えた長さ5 mmの低損失SiNWを使用した。

Fig. 1にSiNWの概略図を示す。

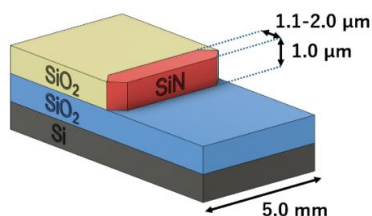


Fig. 1 Schematic of the SiNW

SiN膜は、電子サイクロトロン共鳴プラズマを用いた化学気相成長法により、200 °Cで成膜している。原料ガスは水素フリーの重水素シラン（SiD4）を用いている。SiNWの厚さは、異常分散領域を拡大し最適な分散制御を行うために1.0 μmとし、導波路幅は1.1-2.0 μmまで選択することで励起レーザー波長帯域の分散値を制御できるように設計されている。

3. 実験方法および測定方法

実験配置図を Fig. 2 に示す。波長 1552.5 nm の狭線幅レーザーを種光源として用い、RF 信号発生器出力の 25 GHz 正弦波信号で駆動する強度変調器と 4 台の位相変調器により、スペクトル帯域幅 20 nm の 25 GHz 周波数間隔 EO コムを生成した (Fig. 3)。フィルターキャビティを用いて自然放出増幅光 (ASE) 雑音を抑圧した後、エルビウム添加光ファイバー増幅器 (EDFA) で光パルスを平均 5 W まで増幅し、高非線形ファイバー (HNLF) とパルスシェーパによる 2 次および 3 次分散の高精度制御により、パルス幅を 32 fs (ローレンツ関数フィット) まで短パルス化することに成功した (Fig. 4(a))。次に、25 GHz 繰り返し、パルス幅 32 fs の光パルスを非球面レンズ (NA: 0.55) で SiNW に空間光結合 (結合効率 56 %) し、広帯域光のスペクトル計測を行った。

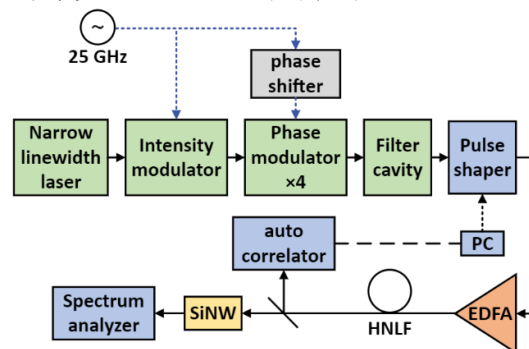


Fig. 2 Experimental setup

Generation of Supercontinuum Light Using SiNWs with 25-GHz Mode Spacing

Naoya SANO, Mei KUROIWA, Akihiro NAKANO, Kodai ABE,
 Junia NOMURA, and Atsushi ISHIZAWA

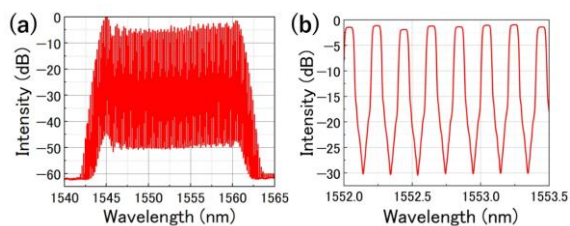


Fig. 3 (a) spectrum of 25 GHz mode spacing EO comb, (b) Expanded frequency spectrum of figure 3a

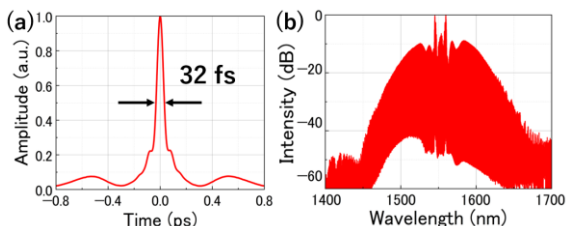


Fig. 4 (a) Autocorrelation waveform, (b) spectrum at 25 GHz mode spacing

4. 実験結果

Fig. 5 に、広帯域光発生におけるパルスエネルギー依存性を示す。パルスエネルギーが増加するにつれてスペクトル帯域幅が拡大し、0.11 pJ のパルスエネルギーで最も広い帯域幅をもつ 25 GHz 繰り返し広帯域光発生に成功した。

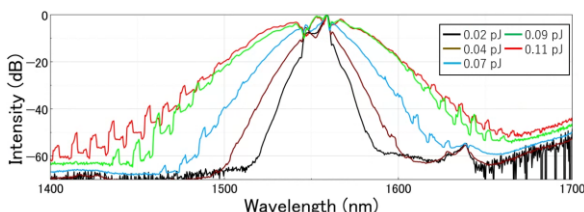


Fig. 5 Dependence of supercontinuum spectra on incident laser pulse energy using a 1.3-μm-wide SiNW

Fig. 6 に、広帯域光発生における導波路幅依存性を示す。導波路幅 1.3 μm の SiNW に TE モードで 0.11 pJ の結合パルスエネルギーを光結合した際、最も広帯域な 2/3 オクターブ帯域以上 (@ -60 dB 基準) の 25 GHz 繰り返しの広帯域光発生に成功した。これらの広帯域光の短波長領域 (1200-1400 nm) で観測される振動成分は光計測で用いたマルチモードファイバによる干渉成分であると考えられる。

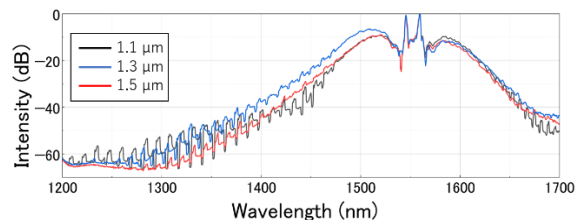


Fig. 6 Dependence of the supercontinuum spectra on SiNW widths (1.1-, 1.3-, and 1.5-μm) at 0.11 pJ coupled laser pulse energy in TE mode

5. 結論と今後の展望

我々は、HNLFとパルスシェーパーによる2次および3次分散の高精度制御により、約30 fsの短光パルス発生に成功した。さらに、この短光パルスを構造分散制御したSiNWに光結合することで2/3オクターブ帯域光発生に成功した。この実験セットアップの光路長は10 m未満であり、CEO信号のフィードバックによるRF信号の制御帯域幅がさらに拡大し、低雑音のRF信号の生成が可能になることが期待できる。今後はこの広帯域光発生の更なる帯域拡大を目指すとともに、 $2f$ - $3f$ 自己参照干渉を用いた25 GHz 周波数間隔EOコムのCEO信号検出および周波数安定化を目指す。

参考文献

- 1) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T.W. Hänsch, "Absolute optical frequency measurement of the cesium D1 line with a modelocked laser," Phys. Rev. Lett., vol.82, no.18, May1999, pp. 3568-3571.
- 2) T. Ideguchi, S. Holzner, B. Bernhardt, G. Guelachvili, N. Picqué, and T.W. Hänsch, "Coherent Raman spectro-imaging with laser frequency combs," Nature, vol. 502, Oct. 2013, pp. 355-358.
- 3) J. Pfeifle, V. Brasch, M. Lauermaun, Y. Yu, D. Wegner, T. Herr, K. Hartinger, P. Schindler, J. Li, D. Hillerkuss, R. Schmogrow, C. Weimann, R. Holzwarth, W. Freude, J. Leuthold, T.J. Kippenberg, and C. Koos, "Coherent terabit communications with microresonator Kerrfrequency combs," Nat. Photon., vol. 8, May 2014, pp. 375-380.
- 4) A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hitachi, T. Akatsuka, and K. Oguri, "Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy" scientific reports 13, 8750, 2023.