

電気光学変調コムを用いた低ノイズマイクロ波発生

日大生産工 (院) ○杉山大泰

日大生産工 黒岩 芽生 佐野 直哉 和田 知也

日大生産工 石澤 淳

1. まえがき

現代の高度情報化社会においてマイクロ波・ミリ波発生装置が担う役割は極めて大きく、無線通信からレーダー計測まであらゆる電子計測機器の内部に広く活用されている。近年、レーダー計測、無線通信、精密分光の分野でより低雑音なマイクロ波やミリ波が必要とされている。しかしながら、市販のマイクロ波・ミリ波の発生装置は、水晶発振器(基本周波数 10 MHz)として知られる発振器の周波数を N 通倍して、必要とする周波数を発生させる方法を取っているため、雑音は $20 \times \log(N)$ (dB) で増加する。例えば、1 GHz のマイクロ波を発生させる場合は、10 MHz の水晶発振器で発生する雑音が 10,000 倍に拡大されてしまう。そこで、電気光学変調光コム(EO コム)を光電変換することによって、低雑音なマイクロ波やミリ波信号発生を目指している。

2. EO コム発生原理

EO コムは種光源となる一般的なモードロックレーザの代わりに、CW レーザを強度変調位相変調することによってサイドバンドを生成する光周波数コムである(Fig. 1 参照)。電気信号による外部信号だけで数十 GHz の繰り返し周波数、かつ、広範囲に繰り返し周波が可変な光周波数コムを発生できる。

正弦波の位相変調された光波は

$$E(t) = a_0 e^{j2\pi\nu_0 t} e^{-j\Delta\theta_m \sin(2\pi f_m t)}$$

$$= a_0 \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} J_{-n}(\Delta\theta_m) e^{j2\pi(\nu_0 + n f_m)t} \quad (2.1)$$

と表され、ベッセル関数の周期的な線スペクトルから成るサイドバンドが生成、つまり光周波数コムが発生する。また、瞬時周波数は

$$\nu(t) = \nu_0 - \Delta\theta_m f_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2.2)$$

と表せ、式(2.1)若しくは(2.2)から、光コムの周波数

帯域幅は

$$\Delta\nu \sim 2 \cdot \Delta\theta_m (\text{変調指数}) \times f_m (\text{変調周波数}) \quad (2.3)$$

と表せる^{1),2)}。

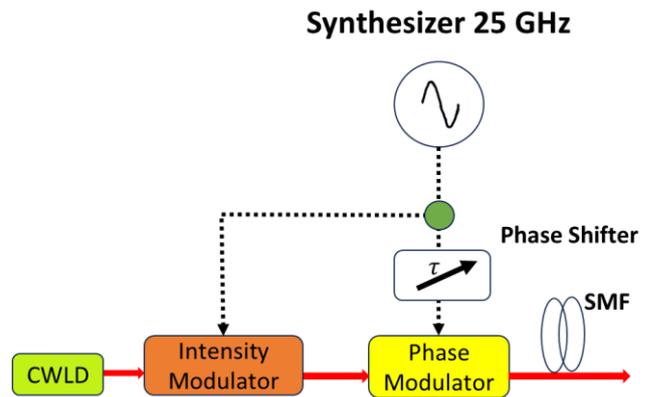


Fig. 1 EO コムの概要図

3. 研究方法

CW 半導体レーザ光を光増幅器で +20 dBm まで光増幅し、半値幅・波長可変フィルタ (ロールオフ: 1500 dB/nm) で 40 dB 以上の高い信号対雑音比 (SNR) をもつ線スペクトルを EO コムの種光源とする。続いて、位相変調器に 25 GHz の正弦波信号を強度変調器(IM)と 3 台の位相変調器(PM)へ印加することで半値全幅 39 nm の帯域幅を持つ EO コムを発生する。この段階での EO コムには ASE 雑音が多く含まれているため、その後段に FP フィルタを用いて EO コムの ASE 雑音を低減し、Pound-Drever-Hall (PDH) ロックを行う³⁾。レーザ光を EO 変調器により、位相変調側波帯を生成する。高フィネスの共振器を通した光をフォトダイオードで強度信号に変換し、変調信号の位相を変えることにより直交成分と同相成分のヘテロダイン検波を行い、エラー信号を生成する。このエラー信号をフィードバックすることによりレーザ周波数を安定化する。実験配置図を Fig. 2 に示す。

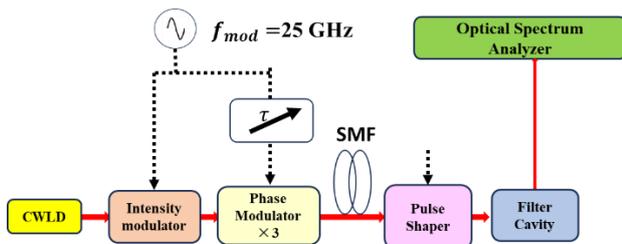


Fig. 2 実験配置図

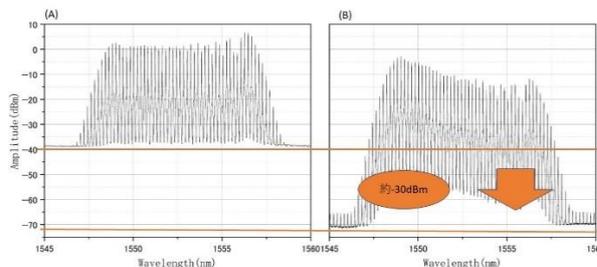


Fig. 4 FP フィルタによる雑音低減

4. 研究結果

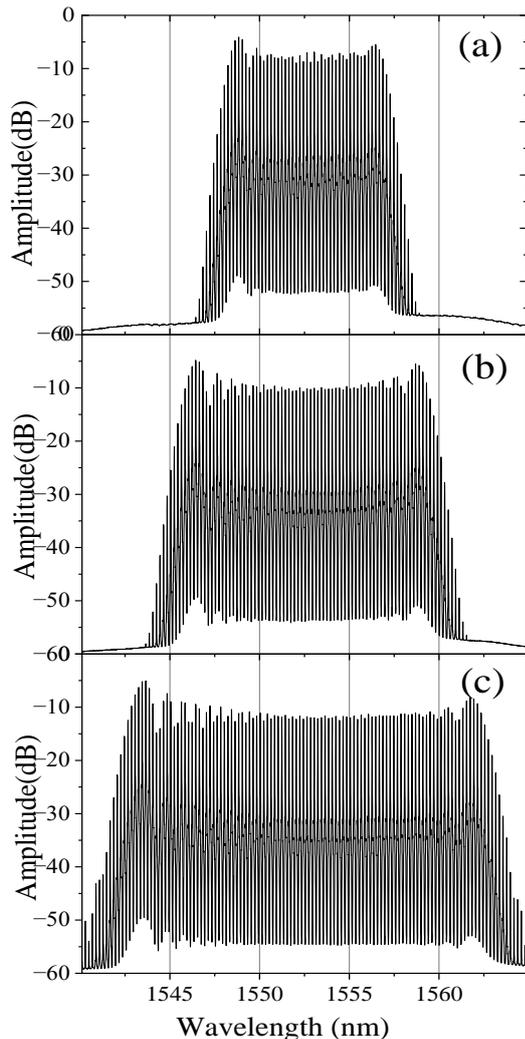


Fig. 3 25 GHz 繰り返し EO コムの光スペクトル

Fig. 3 (a)-(c) はそれぞれ 1~3 台の位相変調器を直列接続したときの 25 GHz 間隔の EO コムスペクトルを示す。広い周波数モード間隔を持っているため、光スペクトルアナライザーで各光コムがスペクトル分解可能である。また、SNR は 40 dB 程度である。位相変調器は変調器台数に比例して大きくなるため、光スペクトル帯域幅が拡大している。

Fig. 4 の(A)と(B)はそれぞれ FP フィルタ挿入前後の EO コムスペクトルである。FP フィルタ内の温度を 21.5 °C に設定したとき、PDH ロックを掛けることに成功し、FP フィルタ挿入により、約 3 桁程度 ASE 雑音の低減に成功した。

5. まとめと今後の展望

本研究は 3 台の位相変調器を用いて 25 GHz モード間隔の EO コム発生を行い、その EO コムに含まれる ASE 雑音を低減した。位相変調器を 1 台から 3 台へ増やすことにより、Fig.4 で得られた結果よりスペクトル帯域幅を 1 台当たり 4 nm 広げ、18.8 nm まで広げること成功した。また、EO コムに含まれる ASE 雑音を低減する為、FP フィルタを用いた結果、Fig.4 で得られた結果より、3 桁程度の ASE 雑音を低減することに成功した。今後は、EO コムを用いた低ノイズなマイクロ発生応用において、EO コム光学系の光路長を短尺化し、極短パルスを実現する。その為には EO コムの光パルスの尖頭光強度を更に高くする必要がある。そのために、高フィネスの FP を用いて ASE 雑音を低減し、HNLF に適切な分散値を付与することによる短パルス化、広帯域化を行っていく。

参考文献

- 1) A. Ishizawa *et al*, Octave-spanning frequency comb generated by 250 fs pulse train emitted from 25 GHz externally phase-modulated laser diode for carrier-envelope-offset-locking., *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 19, (2010) pp. 1343-1344.
- 2) X. Zhang, *et al*, Sub-100 fs all-fiber broadband electro-optical frequency comb at 1.5 μm ., *Opt. Express* vol. 28, no. 23, (2020) pp. 34761-34771.
- 3) E. D. Black, An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization., *Am. J. Phys.* Vol. 69 (1), (2001) pp. 79-87.