

## 広帯域電気光学変調コムを用いたシングルコムバーニア方式による周波数計測

日大生産工(院) ○佐藤優成 阿部紘大 中野晶博 吉田靖典

NTT 物性研 日達研一 眞田治樹 小栗克弥

日大生産工 野邑寿仁亞 石澤淳

### 1. まえがき

近年、高精度に光周波数を決定する技術は多岐にわたる科学技術分野において、重要な役割を担っている。高精度な光周波数は、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの絶対周波数測定やデュアルコム分光法での分子吸収スペクトルの解析などで用いられる。光周波数を高精度に測定する一般的な方法としては、周波数軸に輝線スペクトルが等間隔に並んでいる光周波数コム<sup>1)</sup>と高精度な波長計を組み合わせた手法が用いられる。どちらも光周波数を測定し制御する際に、比類のない精度を有するが、高精度な波長計は高コストかつ定期的な波長較正の必要がある。そこで、我々はファイバーレーザーコムを用いたシングルコムバーニア方式による光周波数計測法を実証した<sup>2)</sup>。しかし、ファイバーレーザーコムでは、長時間かつ数百 kHzで変動するレーザーが測定限界であり、MHzオーダーで変動する半導体レーザーには適用できないことが課題となっている。

### 2. 提案手法

本研究では、マイクロ波で駆動する電気光学変調器によって單一周波数のレーザー光源 $f_{cw}$ を変調することで生成される電気光学変調コムを用いた手法を提案する。

被測定レーザーの光周波数 $f'_{cw}$ は、種光源 $f_{cw}$ 、モード間隔 $f_{rep}$ 、モード番号 $M$ 、ビート周波数 $f_{beat}$ を用いて以下の式で表される。

$$f'_{cw} = f_{cw} + Mf_{rep} + f_{beat} \quad (2.1)$$

$f_{cw}$ と $f_{rep}$ は周波数安定化されており、 $f_{beat}$ は周波数カウンターで計測される。そのため、モード番号 $M$ を求ることで、 $f'_{cw}$ は算出される。

シングルコムバーニア方式は、 $f_{rep}$ を複数回変化させたときの $f_{beat}$ を計測することにより、モード番号 $M$ を特定する手法である (Fig.1)。 $f_{rep}$ を可変するにあたって、ファイバーレーザーコムでは共振器長を変える必要があり、測定時間の長時間化の要因となっていた。一方、電

気光学変調コムはシグナルジェネレータからの信号で簡易的に可変可能であるため、測定時間の短縮化が見込まれる。

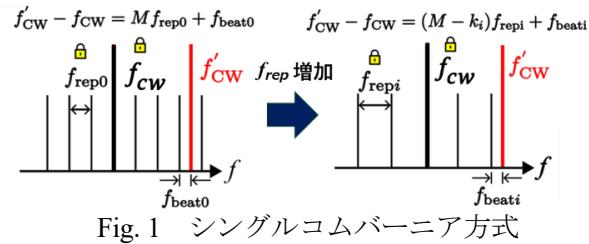


Fig. 1 シングルコムバーニア方式

### 3. 実験方法

実験配置図を Fig. 2 に示す。波長 1552.5 nm の連続波レーザーをマイクロ波で駆動する強度変調器及び位相変調器 4 台に挿入し、電気光学変調コムを生成する。続いて、Wave shaper®で分散制御を行い、エルビウム添加光ファイバー増幅器でアンプした後に高非線形光ファイバーで広帯域化させる (Fig.3)。その後、被測定レーザーとカプラで合波し、フォトディテクタによりビート信号を検出した。得られたビート周波数 $f_{beat}$ は、周波数カウンターおよび RF スペクトラムアナライザを用いて測定した。

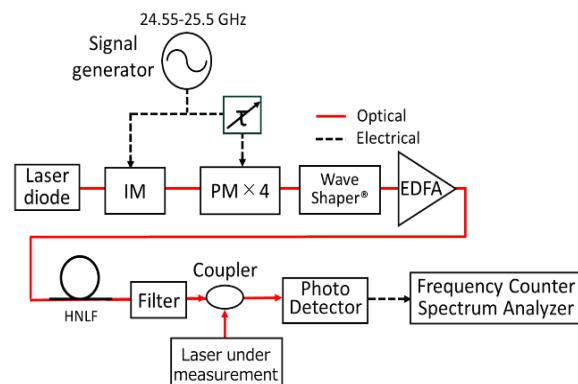


Fig. 2 実験配置図。

IM : Intensity Modulator. PM : Phase Modulator.

EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier.

HNLF : Highly Nonlinear Fiber.

## Frequency measurement of a semiconductor laser using a single-comb Vernier method with a broadband electro-optic modulation comb

Yusei SATO, Kenichi HITACHI, Kodai ABE, Akihiro NAKANO, Yasunori YOSHIDA,  
Junia NOMURA, Haruki SANADA, Katsuya OGURI and Atsushi ISHIZAWA

初期のモード間隔 $f_{repo}$ で $f_{beat}$ を周波数カウンターで計測後、モード番号が1だけ変化するようにシグナルジェネレータからの信号( $f_{rep}$ )を増加させ、再度 $f_{beat}$ を計測した。RFアンプの許容範囲である24.55 GHzから25.5 GHzの間で測定を複数回繰り返すことにより、モード番号 $M$ の収束化を行った。今回、被測定レーザーとしてMHzオーダーで変動するフリーラン状態の波長可変レーザーを使用し、1525 nmと1600 nmの2点で測定を行った。

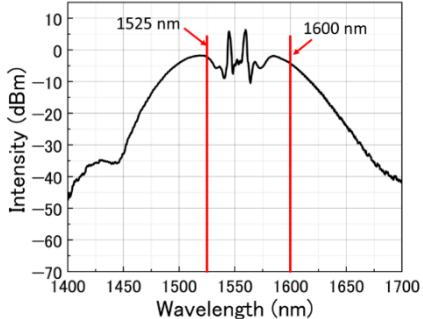


Fig.3 広帯域電気光学変調コムスペクトル

#### 4. 実験結果

1525 nm、1600 nmでのモード番号の収束結果をそれぞれTable 1、Table 2に示す。また、モード番号の差 $k_i$ を増加させたことによるモード番号の差の誤差 $\delta k_i$ とモード番号の誤差 $\delta M_i$ をそれぞれFig. 4、Fig. 5に示す。

Fig.4、Fig.5より、 $\delta k_i$ は0.01以下と非常に小さく、 $k_i$ が高い精度で求められている。また、Table 1とFig. 4、Table 2とFig. 5より、 $k_i$ の増加に伴い、 $\delta M_i$ が徐々に減少しており、推定されるモード番号 $M=141$ 、 $M=249$ へ収束していく様子が確認できる。

Table 1 モード番号収束結果（波長:1525 nm）

index	$f_{rep,i}$	$f_{beat,i}$	$k_{exp,i}$	$k_i$	$M_i$
0	24,550,500,000	365,819,000		0	
1	24,724,342,000	575,360,000		1	141.018
2	24,901,142,000	722,255,000	2.000	2	141.015
3	25,450,742,000	683,192,000	5.000	5	141.002

Table 2 モード番号収束結果（波長:1600 nm）

index	$f_{rep,i}$	$f_{beat,i}$	$k_{exp,i}$	$k_i$	$M_i$
0	24,549,180,000	-15,655,562		0	
1	24,648,157,000	26,915,229		1	248.599
2	24,747,957,000	25,721,568	1.998	2	248.794
3	25,363,997,000	14,324,822	7.994	8	248.991

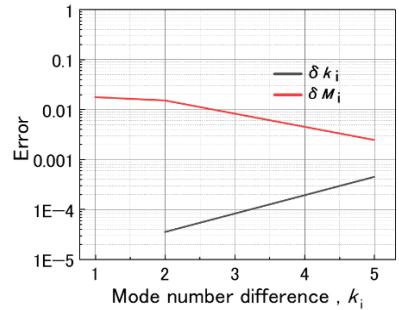


Fig.4  $k_i$ の増加による $\delta k_i$ と $\delta M_i$ (波長:1525nm)

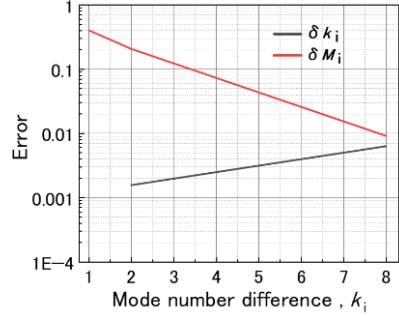


Fig.5  $k_i$ の増加による $\delta k_i$ と $\delta M_i$ (波長:1600nm)

#### 5.まとめ及び今後の展望

本研究では、電気光学変調コムを用いたシングルコムバーニア方式により、MHzオーダーで周波数変動するフリーラン状態の半導体レーザーにおいても、モード番号 $M$ の特定に成功した。この結果は、単一の光周波数コムを用いた光周波数計測における測定レンジの拡大に貢献するものである。また、従来の手法では2時間ほど測定に要したが、本手法はモード間隔の可変が容易であるため、測定時間を20分ほどに短縮することに成功した。

本実験では、種光源の周波数安定化が行われていなかったため、絶対周波数の測定には至っていない。今後は種光源の安定化を図り、絶対周波数の計測を行う。また、シングルコムバーニア方式の自動化を進めることで、さらなる測定時間の短縮を目指す。

#### 参考文献

- 1) 石澤淳, 光周波数コムの最新状況と応用展開特集 2-3 電気光学変調コム, 電子情報通信学会誌 Vol. 103, 2020, pp.1-2
- 2) K Hitachi, A Ishizawa, H Sanada and K Oguri, Single-comb Vernier method for precise optical-frequency measurement, Optics Express, 33.8, 2025, 16684-16695.