

光帰還注入同期半導体レーザ群を用いた 高 S/N 光周波数コム発生法の研究

Study on high S/N optical frequency comb generation technique using
injection-locked semiconductor lasers with optical feedback

研究代表者 東北大学電気通信研究所 助教 横田信英

Nobuhide Yokota

Optical frequency combs (OFCs) have been widely used for a variety of applications such as precise sensing, high-resolution spectroscopy, and large-capacity optical communications. Although there are many OFC generation techniques, convenient approaches for flat OFC generation using conventional optical modulators are limited. A single side band (SSB) OFC generation technique has an advantage for generation of wide and flat OFCs, however, there is a tradeoff between the OFC bandwidth and optical signal to noise ratio. In this study, we propose and investigate a novel SSB OFC generation technique where the wavelength-multiplexed SSB OFC are cascaded by using an optical injection locking phenomenon of semiconductor lasers. The cascaded SSB OFCs with an improvement of optical signal to noise ratio are experimentally confirmed with an optical feedback configuration with fiber Bragg gratings.

要旨

高い信号ノイズ比 (S/N) を有する光周波数コム発生技術は光計測や大容量光通信システムにおいて重要であるが、光周波数コムスペクトルの平坦性、広帯域性、制御性、省電力性、低コスト性など、様々な要求をバランス良く満足することは困難であった。本研究では、光帰還によって注入同期された複数の半導体レーザを利用した新しい光周波数コム発生法を提案し、上述の厳しい要求を満足可能な次世代光周波数コム光源の実現を目指す。波長可変レーザと面発光半導体レーザを用いた原理検証実験により、各レーザ間の単側波帯 (SSB) コムスペクトルを介した注入同期が確認され、約 13 dB の S/N 改善効果が得られた。また、SSB コムスペクトルの平坦化と更なる S/N 改善において、広帯域・高反射率を有するファイバブラッグ回折格子の導入が有効であることを明らかにした。

1. まえがき

等間隔の楕状光スペクトルを有する光周波数コムは光計測、分光測定、光通信などの幅広い分野で利用されている^{(1)~(3)}。光通信においては、単一のレーザ光源をシードとして精密に波長制御された多波長光を簡便に得るための手段として重宝される。例えば波長分割多重を導入したコヒーレント光通信では、図 1 に示すように、コヒーレンスの優れた狭線幅レーザをシード光として光周波数コムを生成し、各ス

ペクトル成分をそれぞれ外部変調器によって変調して信号重畳することで高価な狭線幅レーザの台数を低減することが可能である⁽⁴⁾。さらに、受信側においても光周波数コム生成を行うことで送信側と同期のとれた局発光を簡便に得ることが可能となる。平坦かつ広帯域な光周波数コムを効率的に生成することが重要であり、また、光通信では光スペクトルの信号ノイズ比 (S/N) が伝送容量や伝送距離を制限することから、高 S/N の光周波数コムを生成することも要求される。さらに、光通信システムへの柔軟な適用の観点から、コムスペクトルの周波数間隔の制御性も必要である。

マイクロ共振器内で生じるカー効果を活用した手法⁽⁵⁾は光源の小型化や広帯域コムの発生に有利であるが、コムスペクトルの平坦性や周波数間隔の精密制御には不向きである。モード同期レーザの有する光スペクトルは等間隔の光周波数コム形状となるが⁽⁶⁾、その平坦性や周波数間隔を制御するのは困難である。半導体レーザの利得スイッチングを用いた簡便な手法⁽⁷⁾も提案されているが、コムスペクトルの広帯域化の点で難がある。ニオブ酸リチウムなどを用いた外部変調器によって光の強度と位相を変調する手法は広く研究されており、台形型の平坦なコム発生が可能であることに加えて周波数間隔やスペクトル帯域幅の制御が容易である⁽⁸⁾。しかし、帯域幅は位相変調振幅に依存するため、広帯域化のためには位相変調器を多段接続することが求められる。単

側波帯 (SSB) 変調器を光帰還ループ内に挿入することで広帯域かつ平坦な光周波数コムを簡便に生成可能であることが知られている⁽⁹⁾。しかし、図 2 に示すように、光帰還ループ内の光損失を補償するために Er-doped fiber amplifier (EDFA) を用いる必要があり、この EDFA が放出する自然放出光 (ASE) ノイズが帰還ループ毎に蓄積されるため、広帯域化につれてスペクトルの S/N が劣化する欠点を有していた。SSB コムの広帯域化を実現するため、2つの直交偏光成分を並列的に SSB 変調し、最後に合波する手法⁽¹⁰⁾も提案されているが、SSB 変調器が 2台必要となり、複雑な制御が要求された。また、SSB 変調帰還ループ内に光フィルタを挿入することで EDFA から放出される ASE ノイズを低減する試みも報告されている⁽¹¹⁾。この手法では ASE ノイズ高強度を低減することができるが、SSB シフトしたスペクトルと同一波長のノイズ成分を本質的に分離することができない。

そこで本研究では、図 3 に示すように、SSB コム発生において付随する ASE ノイズ蓄積に起因した S/N の劣化に対処し、S/N と広帯域化のトレードオフ関係を打破するための新たな手法を提案し、その実験的検証を目指す。具体的には、波長分割多重した互いに同期していない SSB コムスペクトルを半導体レーザの注入同期法によってカスケード接続する手法を検証する。本手法において、シード光となる半導体レーザ数 N を増大させることにより、ノイズの蓄積量 (dB) が $1/N$ に低減されるため、S/N を維持したままコムスペクトルの広帯域化が可能となる。本手法によって低コストかつ省電力なコヒーレント多波長光源の実現が期待されるものである。

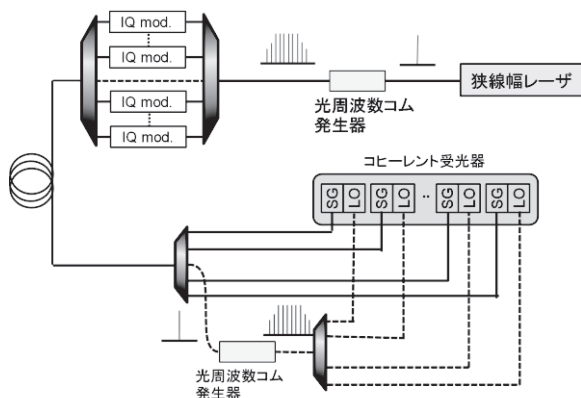


図1 光周波数コムを用いたコヒーレント波長分割多重光通信

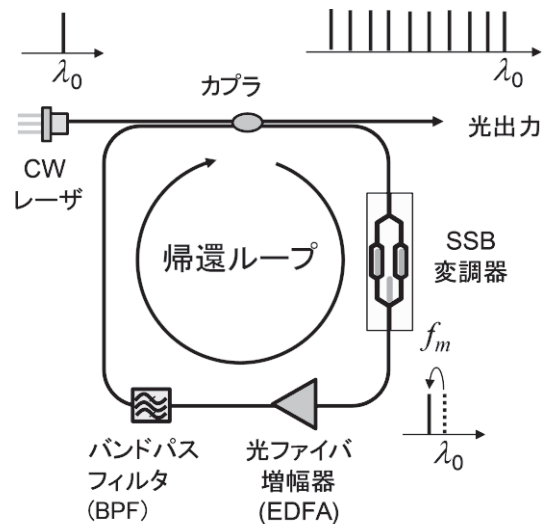


図2 SSB コム光源の構成

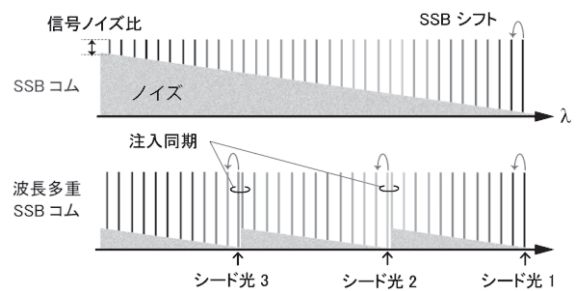


図3 注入同期を活用した SSB コムの高 S/N 化

2. 原理

2.1 SSB 変調による光周波数コム生成

SSB 変調はデュアルパラレル型マッハツェンダ変調器を用いることで実現できる。図 4 に示すように、マッハツェンダ変調器が入れ子になっており、4つの並列した光導波路に印加する位相変調信号を制御することによって SSB 変調を実現する。このような変調器は入力光電界の同相成分 (I) と直交成分 (Q) を制御できるため、直交振幅変調方式などの高度な複素電界変調を実現する IQ 変調器としても知られる。本稿ではこれ以降において、図 4 の構成を有する変調器を SSB 変調器と表記する。

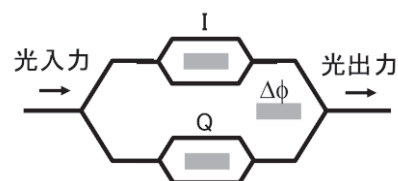


図4 SSB 変調用デュアルパラレル型変調器の構成

まず、SSB 変調器に入力される CW 光を変調した場合、変調器から出力される光電界 E_{out} は以下の式で表すことができる⁽¹⁰⁾。

$$E_{out}(t) = E_I(t) + j\beta E_Q(t) \quad (1)$$

ここで、 E_I と E_Q はそれぞれ SSB 変調器における I と Q のマッハツェンダ変調領域からの出力電界成分であり、 β は各マッハツェンダ変調領域間における非対称係数である。 E_I と E_Q はそれぞれ以下の式で表すことができる。

$$E_I(t) = \frac{E_0}{4} \exp(j2\pi f_c t) \left\{ \exp \left[j \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_I}{V_\pi} + 1 \right) \right] + \alpha \exp \left[-j \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_I}{V_\pi} + 1 \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$E_Q(t) = \frac{E_0}{4} \exp(j2\pi f_c t) \left\{ \exp \left[j \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_Q}{V_\pi} + 1 \right) \right] + \alpha \exp \left[-j \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_Q}{V_\pi} + 1 \right) \right] \right\} \quad (3)$$

ここで、 E_0 は電界振幅係数、 f_c はキャリア周波数、 V_I と V_Q はそれぞれ I と Q の信号電圧振幅係数、 V_π は π の位相シフトを生じるために必要な印加電圧、 α は各マッハツェンダ変調領域における非対称係数である。I と Q の各 RF 信号の位相差が $-\pi/2$ である場合、出力電界は近似的に以下のように表される。

$$E_{out}(t) \approx E_0 J_1 \left(\frac{\pi}{2} R \right) \exp[j2\pi(f_c + f_m)t] \quad (4)$$

ここで、 f_m は変調周波数、 R は変調指数、 J_1 は第一種ベッセル関数の 1 次成分を表す。式(4)より、変調周波数 f_m だけシフトした周波数の光電界が出力されることがわかる。SSB 変調の条件をまとめると、SSB 変調器において I と Q のマッハツェンダ変調領域にはそれぞれ差動的な変調を施し、両者の変調信号は直交位相関係とする。そして I と Q の変調領域からそれぞれ出力される光波を直交位相関係で合波する。このような方法を用いて SSB 変調を実現する。

2.2 提案光源構成

本研究で提案する光源構成を図 5 に示す。まず、数百 GHz 程度の発振周波数差を有する半導体レーザ光を波長分割多重し、サーキュレータを介して SSB 変調器を含む帰還ループ内に入力する。各半導体レーザ光をシードとして波長分割多重 SSB コムが生成

され、波長 λ_1 で発振する半導体レーザの SSB コム成分が λ_2 にほぼ一致する状況が生じる。この時、帰還ループ内に挿入したファイバブラッグ回折格子 (FBG) を反射型ノッチフィルタとして機能させ、サーキュレータを通じて半導体レーザ群へ帰還させることで、 λ_1 の SSB コム成分に λ_2 の SSB コム成分を注入同期させることができる。 λ_3 以降の SSB コム成分に対しても同様の効果が生じるため、本構成を用いることで波長分割多重された SSB コムを数珠つなぎ的に一括同期させることができる。ここで、FBG はノッチフィルタとして EDFA から放出された ASE ノイズを除去するので、光スペクトルの S/N が改善される。波長分割多重には市販のアレイ導波路回折格子 (AWG) を用いることができ、FBG における複数のフィルタ特性を有する回折格子領域は 1 本の光ファイバ内にまとめて形成することができるものである。図 5 では複数の独立した半導体レーザを用いた例を示しているが、面発光半導体レーザ (VCSEL) アレイなどの集積型レーザアレイ素子を用いることで動作設計が容易になると共に小型化・低コスト化が期待できる。

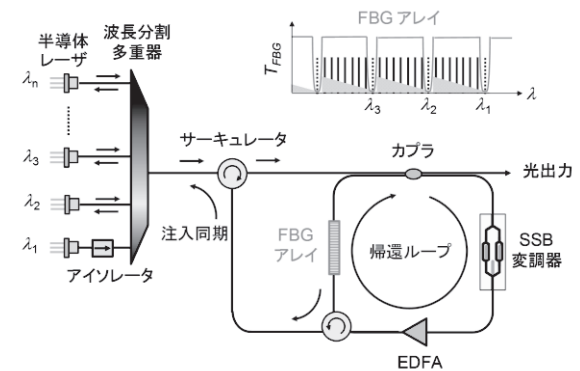


図5 提案する光源構成

3. 原理検証実験

3.1 実験方法

図 5 で示した光源構成の基本原理を検証するため、マスターレーザとスレーブレーザに相当する 2 台のレーザを用い、SSB コムを介した注入同期が実現できるかどうかを検証した。

実験構成を図 6 に示す。CW 波長可変レーザと VCSEL の発振波長を 1551.88 nm、1549.94 nm にそれぞれ設定し、各出力光を 3 dB カプラを用いて合波し、SSB 変調器を含む帰還ループへ入力した。ここで、VCSEL

と光ファイバとの相互結合は自由空間で行っており、偏光コントローラを用いて VCSEL 出力光の偏光と入力光の偏光が一致するように調節した。今回は使用した VCSEL の光出力強度(約 0 dBm)と光ファイバへの結合効率(約-8 dB)が低いことを補うため、3 dB カプラの直後に EDFA1 を挿入した。帰還ループへの結合効率に依存して帰還ループ内の光損失が変化する。結合を小さくすることでループ内の光損失を低減できるが、取り出し効率も低下するため、本実験では3 dB カプラを用いて50%の結合効率に設定した。ループ内の光損失を補償するように EDFA2 の利得を設定することで平坦な SSB コムスペクトルが得られるが、利得が過剰または不足している場合はコムスペクトルの包絡線が斜めに变化していく。SSB 変調器は短波側へとスペクトルをシフトさせる駆動条件を用いており、変調周波数は 15 GHz に設定した。FBG は波長 1549.97 nm において 99%の反射率を有しており、その半値全幅は約 38 GHz である。また、SSB 変調器には偏光子が組み込まれているため、帰還ループ内において光が偏光子に消光されることで光損失が発生する。このため、帰還ループ内の偏光コントローラを適切に調節することが必要である。FBG で反射された光は VCSEL に注入同期させるためのマスターレーザ光として用いるため、サーキュレータを介して帰還ループから抽出する。その後、バンドパスフィルタ(BPF)によって ASE ノイズ成分を低減し、EDFA3 を用いて増幅し、3 dB カプラを通じて VCSEL へ注入した。ここで、波長可変レーザの経路にはアイソレータを挿入しているため光注入の影響は無視できる。帰還ループ内に挿入した EDFA2 の飽和光出力強度が 20 dBm と比較的小さいため、十分に注入同期が生じるように FBG の反射光を EDFA3 で増幅する必要が生じたが、帰還ループ内の光強度を強くすることでこの必要性は排除できるものと考えられる。波長可変レーザをシード光とした SSB コムと VCSEL をシード光とした SSB コムが波長分割多重された状態で光出力される。各コムスペクトルが同期していない場合は両者の間に周波数差が生じるが、VCSEL が波長可変レーザをシード光とした SSB コムの末端へと注入同期することによって発振周波数の引込効果が得られ、周波数差のない連続的な SSB コムスペクトルが得られる実験構成である。

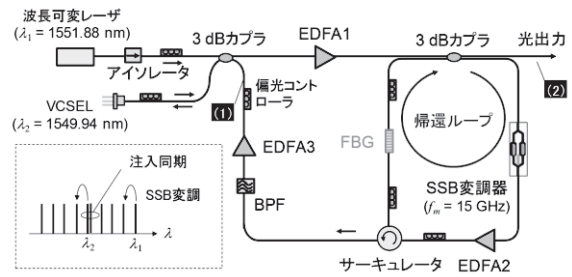


図6 実験構成

3.2 実験結果

まず、VCSEL (1549.94 nm) の入力光のみを 1 度だけ SSB 変調した際の典型的なスペクトルを図 7 に示す。変調周波数 15 GHz に一致するスペクトルのシフトが見られており、ここでの消光比は 18 dB であった。今回は SSB 変調器へのバイアス電圧のフィードバック安定化制御を導入していないため高い消光比の長期的維持が困難であったが、理論的には 30 dB 以上の消光比が得られ、より理想的な SSB スペクトルへと近づくものである。ここで、一般的に半導体レーザは線増大係数の寄与によって長波側で注入同期しやすい傾向⁽¹²⁾があるため、長波側ではなく短波側へ SSB コムを生成し、短波側で発振している半導体レーザに注入同期する構成が合理的である。SSB 変調器へ印加する RF 信号の変調指数を 0.4 以下にすることで 35 dB 以上の消光比が得られるが、変調指数をさらに増大させると不要な高次のサイドバンド成分が増大する⁽¹⁰⁾。一方、変調指数が小さくなるにつれて SSB シフト時の変換効率が低下するため、変調指数は 0.3~0.4 程度に制御するのが理想的である。本実験では使用した SSB 変調器の変調帯域幅の関係で変調指数が 0.28 以下程度とやや低くなったが、これは最終的に帰還ループ内の過剰な光損失となるため、今後の改善が必要である。

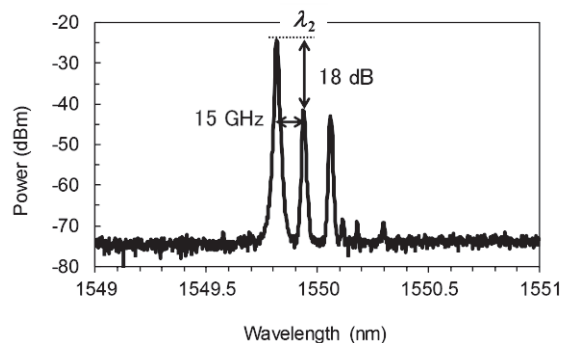


図7 SSB 変調後の光スペクトル

図6において(1)の位置において測定した、VCSELへの注入光のスペクトルを図8(a)に示す。本スペクトルでは反射型ノッチフィルタとして機能するFBGによって反射されたASEノイズ成分が確認できる。ここで、FBGにおいて単一ではなく複数のSSBコムスペクトル成分が反射されたことが確認できるが、これはFBGの反射帯域半値全幅(38 GHz)に対してコム間隔(15 GHz)が狭いためである。本実験ではSSB変調器の3 dB帯域幅が12 GHzと狭いことを考慮して変調周波数を15 GHzに設定したが、より3 dB帯域幅の広いSSB変調器を用いることで、FBGによって反射させるコムスペクトルの選択性を改善することができる。

本光源構成から出力される最終的なコムスペクトルの測定結果を図8(b)に示す。ここで、スペクトルは図6における(2)の位置において測定している。サーキュレータを介して帰還される注入光の有無((1)の部分における光接続の有無)によってスペクトル形状が変化していることが確認できた。注入光なしの場合、マスターレーザに相当する波長可変レーザとスレーブレーザに相当するVCSELがそれぞれ独立して発振しているため、波長可変レーザのSSBコム成分とVCSELのSSBコム成分の間に3 GHzの周波数分離が見られた。一方、注入光/VCSEL出力光の強度比が約3 dBの条件下で注入光を導入することでVCSELの発振周波数が波長可変レーザのSSBコム成分に注入同期して引き込まれ、周波数分離が無くなることが確認できた。また、注入光によってVCSELのSSBコムスペクトルの光強度が向上していることが確認できる。これは注入光のエネルギーがVCSELに結合しているためであると考えられる。理想的にはSSBコムスペクトルは平坦になるが、図8(b)では短波側において強度が低下していることがわかる。この原因は帰還ループ内に挿入されているEDFA2のASEノイズが本実験では未着目の波長領域で蓄積・増幅されているためである。

SSBコムスペクトルを広い波長範囲で測定した結果を図9(a)に示す。SSBコムスペクトルは1550 nm付近に生じているが、1530 nm付近に顕著なスペクトル成分が確認できる。これは、EDFA2へ入力する光強度が-10 dBm以下と弱い場合、1530 nm付近の利得が相対的に強くなる性質がEDFA2にあるためであ

る。本実験では帰還ループ内の光損失が28 dB程度と大きく、帰還ループ内でASEノイズが強く増幅・蓄積されたものと考えられる。ASEノイズの蓄積によってEDFA2が飽和利得に達すると、SSBシフトしたスペクトル強度がシフト前に比べて低下するため、傾斜したコムスペクトルが生じたものと考えられる。

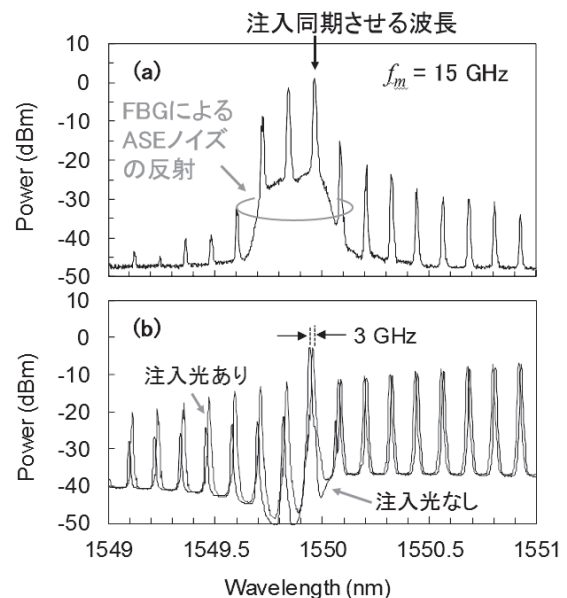


図8 光スペクトルの測定結果 (a)FBG反射光成分 (b)全光出力

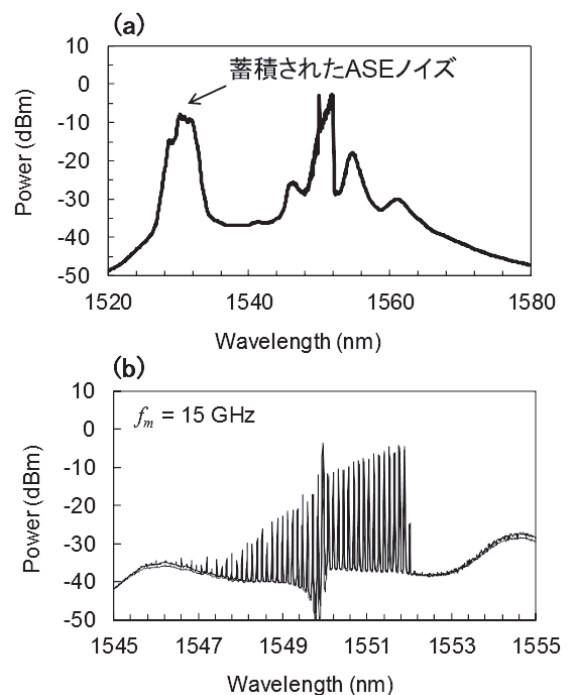


図9 SSBコムスペクトル (a)広波長範囲 (b)狭波長範囲

そこで、1520～1540 nm において約 99%の反射率を有する広帯域 FBG を試作し、帰還ループ内に挿入することで、ASE ノイズの蓄積を低減することを試みた。測定した SSB コムスペクトルを図 10 に示す。ここでは確認のため、VCSEL の光入力は遮断しており、波長可変レーザの SSB コムスペクトルのみを測定している。得られた SSB コムスペクトルは平坦であり、1549.8 nm 付近で見られるように、FBG によって ASE ノイズを反射したことに起因したノイズフロアの改善は約 26 dB であり、ASE ノイズに比べて SSB コムスペクトルの利得が向上していることが確認できた。したがって、SSB コムスペクトルを発生させない長波側の領域にも同様の広帯域 FBG を挿入することで、EDFA の ASE ノイズ蓄積をさらに抑制できることが期待できる。これらは帰還ループ内に光バンドパスフィルタを挿入している状態に相当するが、一般的に自由空間で用いる光フィルタモジュールに比べて、FBG を活用することで挿入損失の低減効果が得られる。

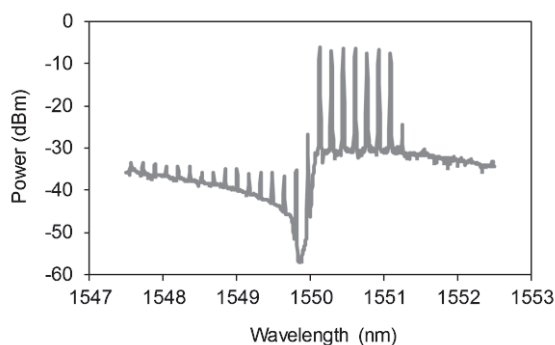


図 10 広帯域 FBG を用いて生成した SSB コムスペクトル

図 5 の構成で示したように、将来的にはより多数のシード光を波長分割多重し、それらを同時に SSB 変調用の帰還ループ内に注入するが、これによって帰還ループ内の EDFA に入力される光強度が向上するため、EDFA への光入力が小さい時に生じるノイズフィギュアの劣化が改善されることも期待できる。更なる改善として、シード光の高出力化が挙げられる。本実験では半導体レーザとして VCSEL を用いたが、低い出力強度と低い光ファイバ結合効率によって帰還ループに入力する前段階で EDFA を挿入する必要が生じた。これによって過剰な ASE ノイズが生

成されていたため、この点を改善することで SSB コムスペクトルの更なる高 S/N 化が期待できる。

4. まとめ

本研究では広帯域かつ高 S/N の SSB 変調光周波数コム生成を実現するため、半導体レーザの注入同期現象を活用した波長分割多重 SSB コムの同期手法を提案し、その実験的検証に取り組んだ。狭帯域 FBG を用いることで所望の SSB コムスペクトル成分を選択的に SSB 変調用帰還ループから取り出すことに成功し、これを注入同期用のマスターレーザ光として活用する構成を検証したところ、SSB コムスペクトルを介した半導体レーザへの注入同期を確認することができた。また、FBG によって EDFA から放出される ASE ノイズの除去効果が得られ、ノイズフロアが 13 dB 程度改善されることを確認した。これらの結果は本研究の基本的アイデアを支持するものである。今後、広帯域 FBG を用いた ASE ノイズ低減策を導入し、更なる実験系の最適化を進め、学術論文誌への成果発表を予定している。

最後に、萌芽的段階である本研究をご支援頂いたマツダ財団のご関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

発表論文

- [1] 横田信英, 小向知也, 八坂洋, 注入同期による SSB 変調光周波数コムの広帯域・高 S/N 化, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-53, 2018 年 9 月。

参考文献

- (1) Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, Optical frequency metrology, *Nature* 416, 233 (2002).
- (2) M. C. Stowe, M. J. Thorpe, A. Pe'er, J. Ye, J. E. Stalnaker, V. Gerginov, and S. A. Diddams, Direct Frequency Comb Spectroscopy, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* 55, 1 (2008).
- (3) Y. Suzaki, H. Yasaka, Y. Kawaguchi, R. Iga, and H. Okamoto, Monolithically integrated eight-channel WDM modulators with cyclic AWGs for multi-channel-block operation over C-band, *Electron. Lett.* 41, 551 (2005).
- (4) A. Lorences-Riesgo, T. A. Eriksson, A. Fülöp, P. A. Andrekson, and M. Karlsson, Frequency-Comb Regeneration for Self-Homodyne Superchannels, *J. Lightwave Technol.* 34, 1800 (2016).
- (5) 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 Kerr frequency combs, *Nat. Photon.* 8, 375 (2014).
- (6) H. Sanjoh, H. Yasaka, Y. Sakai, K. Sato, H. Ishii, and Y. Yoshikuni, Multiwavelength light source with precise frequency spacing using a mode-locked semiconductor laser and an arrayed waveguide grating filter, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 9, 818 (1997).
- (7) R. Zhou, S. Latkowski, J. O' Carroll, R. Phelan, L. P. Barry, and P. Anandarajah, 40nm wavelength tunable gain-switched optical comb source, *Opt. Express* 19, B415 (2011).
- (8) T. Sakamoto, T. Kawanishi, and M. Izutsu, Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator, *Electron. Lett.* 43, 1039 (2007).
- (9) T. Kawanishi, T. Sakamoto, S. Shinada, and M. Izutsu, Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation, *IEICE Electron. Express* 1, 217 (2004).
- (10) J. Zhang, J. Yu, N. Chi, Y. Shao, L. Tao, J. Zhu, and Y. Wang, Stable Optical Frequency-Locked Multicarriers Generation by Double Recirculating Frequency Shifter Loops for Tb/s Communication, *J. Lightw. Technol.* 30, 3938 (2012).
- (11) J. Lin, L. Xi, J. Li, X. Zhang, X. Zhang, and S. A. Niazi, Low noise optical multi-carrier generation using optical-FIR filter for ASE noise suppression in re-circulating frequency shifter loop, *Opt. Express* 22, 7852 (2014).
- (12) F. Mogensen, H. Olesen, and G. Jacobsen, Locking conditions and stability properties for a semiconductor laser with external light injection, *IEEE J. Quantum Electron.* 21, 784 (1985).