

# 通信波長帯広モード間隔光周波数コムの発生技術と その利用

西 川 正

## Generation of a Wide-Mode Spacing Optical Frequency Comb and Its Applications

Tadashi NISHIKAWA

We propose an approach to achieving an offset-frequency locked frequency comb with 25-GHz mode spacing in the telecommunications wavelength region. To achieve the approach, we developed a 185-fs laser pulse train at a 25-GHz repetition rate by intensity- and phase-modulating a seed light emitted from a continuous wave laser diode and propagating it through a dispersive fiber. Using our developed tellurite photonics crystal fiber with high-nonlinear coefficient, we demonstrated octave-spanning supercontinuum generation in the 1.5- $\mu\text{m}$  band from 250-MHz gated pulse train for offset frequency detection.

**Key words:** optical frequency comb, wide-mode spacing, optical modulator, octave-spanning supercontinuum

近年目覚ましい進展を遂げる光周波数コム技術<sup>1,2)</sup>の開発により、原子時計等からのマイクロ波基準信号に対して正確に固定された周波数間隔と位置をもつ光周波数基準光源が得られるようになり、周波数軸上の“光のものさし”として光周波数計量分野に飛躍的な進歩をもたらし、各種計量から精密分光にわたるさまざまな分野において欠かせない道具として広く活用されるようになってきている。光周波数コム光源はまた、高確度に波長と位相が揃った基準光としても使えるので、将来のフォトニックネットワークにとっても大変有望な技術となる。近年の光ファイバーを用いた光通信の伝送方式は、大伝送容量化に向けた周波数利用効率拡大のために、従来の光の振幅にのみ情報を載せる方式から、振幅および位相に情報を載せる多値変調方式に移ってきており、各キャリアの周波数が確定し位相が揃ったキャリア光源の必要性が高まってきている。

しかしながら、光周波数コム光源の周波数モード間隔はレーザーの繰り返し周波数に等しいために、モードロックレーザーベースの光周波数コムにおいては一般的に 100

MHz 前後という大変稠密なモード間隔となるため、そのままでは各モード 1 本 1 本を回折格子等の分散素子で分離することができず、光周波数計量用の参照光源として用いることはできても、フォトニックネットワークのマルチキャリア光源や精密分光用の光源として直接用いることはできない。もし、図 1 に示すように、アレイ導波路回折格子 (AWG) 等の一般的な分散素子を用いて各モード 1 本 1 本が容易に分離可能になる 25 GHz 以上のモード間隔をもつ光周波数コム光源が実現できれば、光通信用のマルチキャリア光源や精密分光用の光源<sup>3)</sup>としてのみならず、分離したモード 1 本 1 本の振幅と位相を変調し再び合成することにより、光の任意電界波形整形<sup>4)</sup>やそれを用いた物質のコヒーレント制御が可能となる。しかし、この 25 GHz のモード間隔をモードロックレーザーで実現しようすると、レーザーの共振器長をわずか 6 mm に設定しなければならず、大変な困難を伴う<sup>5)</sup>。また、稠密なモード間隔をもつ光周波数コム光源のモードを、ファブリー・ペローキャビティを用いて間引くことで周波数間隔を大き

NTT 物性科学基礎研究所 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1)  
現所属: 東京電機大学 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番) E-mail: t.nishikawa@mail.dendai.ac.jp

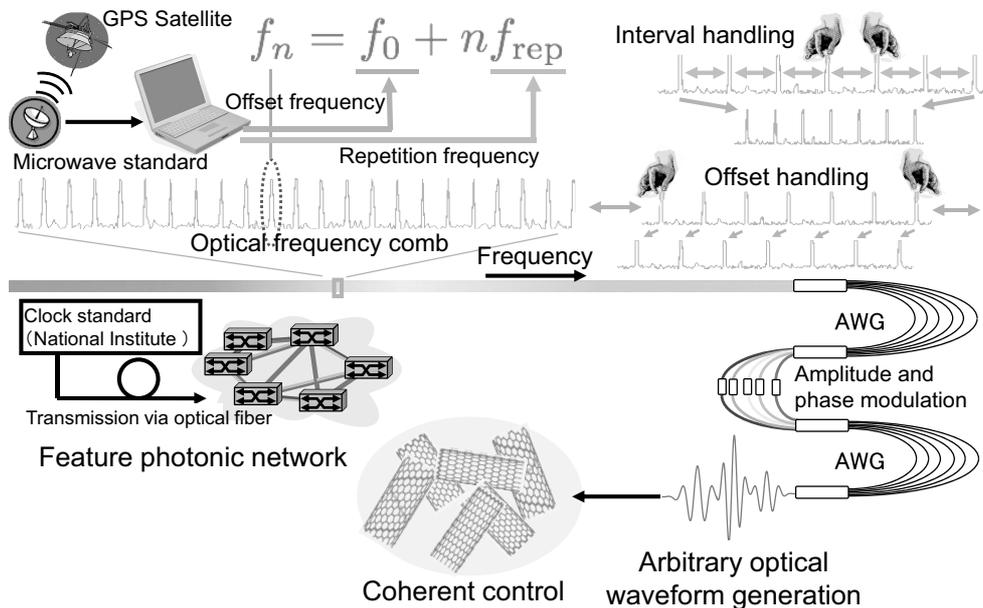


図1 広モード間隔光周波数コムの利用イメージ。

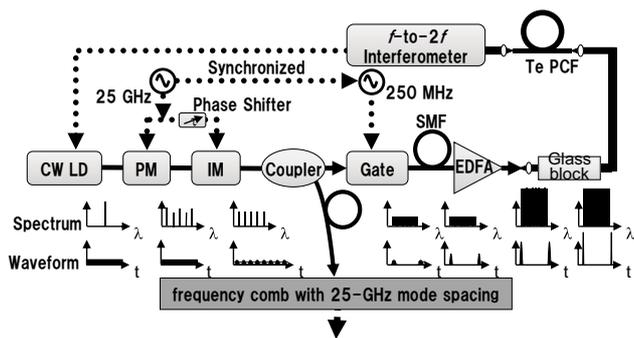


図2 光変調器ベースの広モード間隔光周波数コム実現方式。

くする方法<sup>6)</sup>もあるが、光エネルギー効率等の問題がある。そこでわれわれは、一般的なモードロックレーザーの代わりに、CW半導体レーザーからの光をもとに光変調器を用いてGHz繰り返しのフェムト秒光パルス列を発生させる手法<sup>7,8)</sup>により、各モードの波長が固定された広モード間隔光周波数コム光源を実現する方式を提案し<sup>9)</sup>、その実現に向けた研究を進めている。今回は、このわれわれの取り組みとその展望について解説を行う。

### 1. 光変調器ベースの広モード間隔光周波数コム

図2に、われわれが提唱する、モードロック方式の代わりに光変調器を用いた広モード間隔光周波数コムの発生原理を示す<sup>9)</sup>。最初にCW半導体レーザーからの光を数十GHzの正弦波で駆動する光位相変調器で変調する。これにより変調周波数に等しい周期的なアップチャープとダウンチャープが形成される。ここから線形なダウンチャープ部分のみを強度変調器で切り出し、ファイバーに通して分

散を付与しチャープ補償を行うことでパルス圧縮を行う。これにより、変調周波数に等しい繰り返しもつフェムト秒パルス列を発生させることが可能となる<sup>7,8)</sup>。この光周波数コムの各モードの光周波数を外部のRF基準信号に対して固定するためには、f-2f自己参照干渉法によるオフセット周波数検出を行うための、オクターブ帯域光の発生が必要となる。そこで、パルスのピーク強度を高めるために、光ゲートを用いてレーザー光の繰り返しを落とした後に、高出力エルビウム添加光ファイバー増幅器(EDFA)で増幅を行うことで、増幅器利得の飽和を生じさせずにパルスピーク強度を高める。さらに、低いピーク強度でも十分な自己位相変調効果を起こすことができる非線形性の大きなテルライトのフォトニック結晶ファイバー(PCF)<sup>10)</sup>を用いることでオクターブ光を発生させ、f-2f自己参照干渉法によりオフセット周波数を検出し、シード光として用いているCW半導体レーザーの中心波長に対してフィードバック制御を掛けることで、光周波数コムの各モードの波長を固定する。本方式の利点は、繰り返しパルス列の発生に光共振器を用いないために共振器長の制限を受けず、数十GHzの高繰り返しパルス列の発生が容易に実現でき、かつその繰り返し周波数と中心波長を広範囲に連続的に変化させることが可能となる点にある。以降では、本技術の詳細についての解説を行う。

### 2. 光変調器を用いた高繰り返し短パルス列の発生

フェムト秒の光パルス列を発生させる一般的な方法は、モードロック方式によるものである。フェムト秒モード

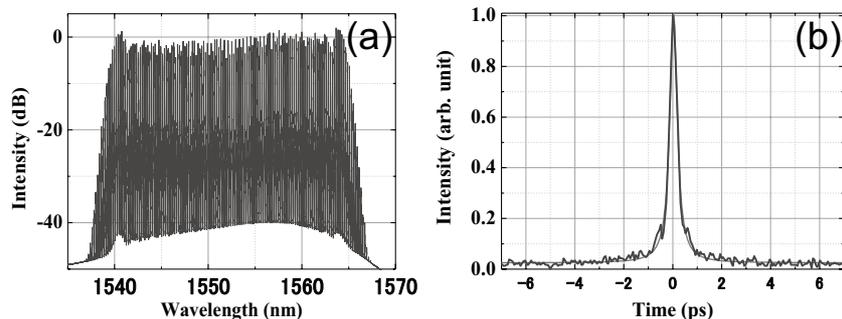


図3 光変調器を用いて発生させた 25 GHz 周波数間隔光周波数コムスペクトル (a), および自己相関波形 (b).

ロックレーザーは超高速現象測定のためのツールとして、長い間重要な役割を果たしてきた。フェムト秒の光パルス列を発生させるレーザーとしては、近赤外領域ではチタンサファイアレーザーが、通信波長帯ではエルビウム添加ファイバーレーザーが広く用いられている。しかしながら、モードロックレーザーはレーザーの繰り返し共振器長で決まるために、数十 GHz 以上の高繰り返しのパルス列を発生させることは困難になる<sup>5)</sup>。

この問題を克服するひとつの手段は、光共振器構成を必要とするモードロック方式の代わりに光変調器を用いる方法である。ここでは、半導体レーザーと光変調器との組み合わせによる簡素な構成で、パルス幅 185 フェムト秒の 25 GHz 繰り返し光パルス列を発生させる方法、および、さらに EDFA 中での増幅に伴う自己位相変調効果により段階的なスペクトル帯域の拡大を引き起こすことで、繰り返し 250 MHz、パルス幅 70 fs、平均出力 1 W のパルス列を発生させた成果<sup>11)</sup> について紹介する。

### 2.1 光変調器を用いた 25 GHz 繰り返し短パルス列の発生

中心波長 1552 nm、線幅 2 kHz の CW 半導体レーザーからの出力光に対して、RF シンセサイザーからの 25 GHz 正弦波信号で駆動する 3 台の位相変調器を用いて位相変調を掛ける。RF シンセサイザーは GPS 衛星からの基準信号に同期させている。3 連の位相変調器を用いて与えられたトータルの変調指数は  $20\pi$  であった。この過程により、25 GHz 繰り返しの周期的なアップチャープとダウンチャープが生成される。次に、線形なダウンチャープ部を強度変調器で抜き出すことにより、図 3 (a) に示したように、24 nm のスペクトル幅をもつ平坦な光周波数コムを発生させることが可能となる。各位相変調器と強度変調器を駆動する RF 信号のタイミングは、RF 位相シフターを用いて調整している。パルスの圧縮は、位相変調器でチャープさせた光をシングルモードファイバーに通して分散を付与し、チャープ補償することで行う。図 3 (b) に、測定した 25 GHz の繰り返しパルスの自己相関波形を示す。パルス

時間波形にローレンツ型を仮定すると測定された自己相関波形とよくフィットし、それをもとに換算したパルスの半値全幅は 185 fs であった。

### 2.2 EDFA 中での自己位相変調効果を用いた短パルス化

さらなる短パルス化を行うために、EDFA 中での増幅に伴う自己位相変調効果により、段階的にスペクトルを広げて行くことでスペクトル帯域の拡大を図った。EDFA の利得の飽和を抑え増幅後のパルスピーク強度を高めて大きな自己位相変調効果を起こすために、図 2 中に示した光ゲートを導入した。この光ゲートは、RF シンセサイザーからの RF 正弦波信号を印加したコム発生器から生成される RF インパルス信号によって駆動される、強度変調器によって構成されている。RF シンセサイザーは、前節で記述した 25 GHz 繰り返しパルス列を発生させるシンセサイザーと正確に同期が取られている。光ゲートを 250 MHz の繰り返して駆動した結果について紹介する。光ゲートは 25 GHz の光パルス列から、100 パルスに 1 パルスの割合で光パルスを選択して取り出し、自然放射増幅光を抑制するという重要な役割も担っている。光ゲートによって 25 GHz の繰り返しの 250 MHz に低減した後、高出力 EDFA を用いて平均出力 1 W にまで増幅を行った。EDFA 中での光パルスのピーク強度は数 kW にまで達するために、自己位相変調効果によりスペクトル幅の拡大が生じる。そして、チャープした光を長さ 1 m のガラスブロックに通して分散を与えてチャープ補償することにより、パルス幅の圧縮を行った。なお、圧縮する際に時間波形の歪みを生じさせる非線形効果が生じないように、光パルスの空間ビーム径をあらかじめ拡大してからガラスブロック中に入射させている。図 4 に、ガラスブロック前のスペクトル (a) およびガラスブロック後の自己相関波形 (b) を示す。EDFA 中での自己位相変調効果によるスペクトル帯域の拡大により、幅 70 fs (ローレンツフィット時) の短パルス光を達成することができた。なお、図 4 (b) の自己相関波形にみられるウィング成分は、位相変調器の後段の強度変調器では取り

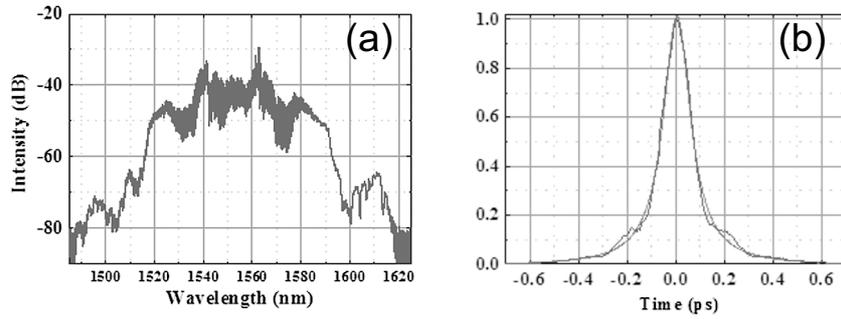


図4 ガラスブロック前のスペクトル (a), およびガラスブロック後の自己相関波形 (b).

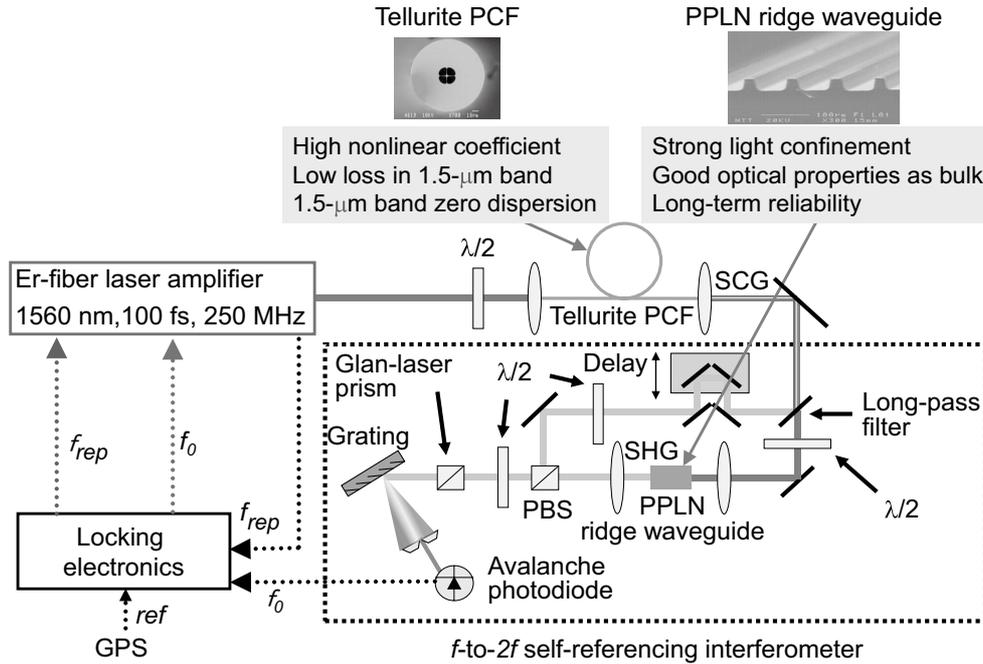


図5 オフセット周波数の低パルスエネルギー閾値化の実験セットアップ.

切れない非線形なチャープ成分に基づくものである。このウィング成分は、バンドパスフィルターを挿入して非線形なチャープ成分を除去することで取り除くことが可能である<sup>8)</sup>。

### 3. オフセット周波数検出の低パルスエネルギー閾値化

光周波数コムの各モードの周波数を外部のRF基準信号に対して固定するためには、 $f-2f$ 自己参照干渉法を用いる方法が一般的である。広モード間隔光周波数コムにおいては、高繰り返し化や位相変調方式に伴うベース成分の残留等により、得られるパルスピーク強度の低下が生じるために、より低い光パルスエネルギーでもオフセット周波数を検出できる技術の開発が必要となる。ここでは、従来の高非線形シリカファイバーよりも高い非線形定数が得られるテルライトフォトニック結晶ファイバー (PCF)<sup>10)</sup> および、第二高調波への高い変換効率が得られる擬似位相整合

$\text{LiNbO}_3$  (PPLN) リッジ導波路<sup>12)</sup>を用いることで、低パルスエネルギーでもオフセット周波数を検出する方法<sup>13,14)</sup>について紹介を行う。全体の実験系のセットアップを図5に示す。

#### 3.1 テルライトフォトニック結晶ファイバー

$f-2f$ 自己参照干渉法で必要になるオクターブ帯域光を低パルスエネルギーで発生させるために、図5に断面写真を示したテルライトPCF<sup>10)</sup>を用いた。コアサイズ、ホール直径、ファイバー外径はそれぞれ2.6, 25, 110  $\mu\text{m}$ である。コア領域は、4本のブリッジによって外側のガラスと光学的に分離されている。見積もられる実効モード断面積は3.54  $\mu\text{m}^2$ である。テルライトガラス材料は $5.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ の非線形屈折率をもつ。したがって、計算される非線形定数 $\gamma$ の値は $675 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ となり、一般的に使われている高非線形シリカファイバーのおよそ30倍の大きさとなる。波長1560 nmにおける伝搬損失は $0.4 \text{ dBm}^{-1}$ であ

る。自己位相変調効果を用いたスーパーコンティニューム光の発生には、入射光の波長近傍で分散が小さくなるようにする必要がある。そこで適切な PCF 構造の設計により、ゼロ分散波長域を 1573 nm 近辺にシフトさせている。これらの効果により、より低いパルスエネルギーの光パルスでもオクターブ帯域光を発生させることが可能となる。

### 3.2 擬似位相整合 LiNbO<sub>3</sub> リッジ導波路

自己参照干渉計内で用いる第二高調波の発生効率を高めるために、従来のプロトン交換による方法の代わりに、ベース部になる LiTaO<sub>3</sub> 基板と導波路形成部の Zn 添加 LN 基板との 2 枚の基板の張り合わせと、ダイヤモンドブレードを用いた切削加工で導波路構造を作成した PPLN リッジ導波路<sup>12)</sup>を用いた。導波路の長さは 38 mm で、擬似位相整合のピッチは 27 μm である。本製造方法では、導波路の形成に化学的処理や拡散プロセスを用いないために、フォトリフラクティブ効果に対する強い耐性を室温でも備え、プロセスに伴うバルクの光学特性の劣化を受けない。さらに、切削加工で作成されたリッジ導波路構造は急峻な屈折率変化を備えるために、高い光の閉じ込め効果を得ることができる。これらの効果の結果、第二高調波への高い変換効率を達成することができ、f-2f 自己参照干渉計によるオフセット周波数検出を低いパルスエネルギーで達成することが可能となる。

### 3.3 オフセット周波数ロックの結果

上記の 2 つの技術による、オフセット周波数ロックの低パルスエネルギー閾値化の効果を確かめるために、通常のファイバーレーザーを用いて実験を行った<sup>13)</sup>。レーザーには、250 MHz 繰り返しの Er 添加モードロックファイバーレーザーおよびファイバーアンプのシステムを用いた。ファイバーアンプ後のレーザーの最大出力は、中心波長が 1560 nm で、パルス幅 100 fs、パルスエネルギー 1 nJ であった。ファイバー増幅器からの出力光はコリメートレンズを用いて空間で平行ビームにし、NA=0.8 の対物レンズを用いてテルライト PCF に結合した。対物レンズでの透過率 59% を含んだオーバーオール結合効率は 29% であった。テルライト PCF 後のスペクトルはオクターブ帯域以上に広がる。オフセット周波数の検出には、f-2f 自己参照干渉法を用いた。ロングパスフィルターを用いて長波長側の成分を分離して PPLN リッジ導波路に入射させ、1930 nm からの第二高調波を発生させ、ロングパスフィルターで反射された短波長側成分のビームと偏光ビームスプリッターキューブを用いて合波した。合波したビームは回折格子を用いて分光し、965 nm 中心の波長の光を InGaAs アバランシェフォトダイオードに入射させた。このフォト

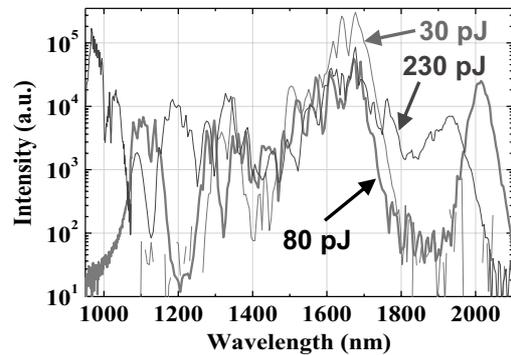


図6 テルライト PCF からの出射光スペクトルのファイバー結合パルスエネルギー依存性。

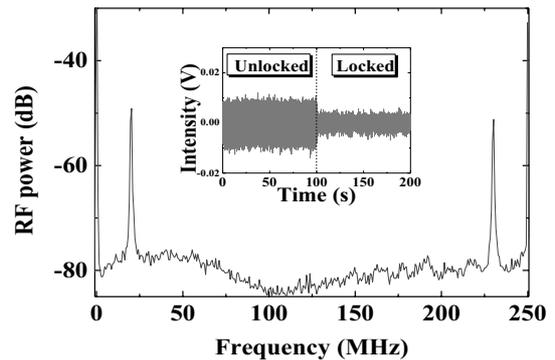


図7 f-2f 自己参照干渉計によるビート信号 RF スペクトル。

ダイオードからの信号のビート成分によってオフセット周波数を検出し、フィードバック回路を用いて、GPS 衛星からの信号を基準とした 20 MHz の RF 基準信号に対してロックを掛けた。

図 6 に、長さ 30 cm のテルライト PCF を用いて、レーザーの結合エネルギーがそれぞれ 30, 80, 230 pJ のときに得られた、ファイバーからの出力光スペクトルを示す。パルスエネルギー 80 pJ において、ピークから -30 dB レベルの範囲で、950~2100 nm に及ぶオクターブ帯域光が発生できているのを確認できる。複雑なテーパー構造をもつファイバー以外での通信波長帯における低パルスエネルギーでのオクターブ光発生のもので記録は、Hundertmark らによる SF6 ファイバーを用いた 1560 nm の波長での 200 pJ というもの<sup>15)</sup>だったので、テルライト材料と PCF 構造の採用により、その半分以下のパルスエネルギーでオクターブ帯域光が発生できるようになった。

図 7 に、ファイバー結合エネルギーが 230 pJ のときに観測された、ビート信号 RF スペクトルを示す。RF スペクトルアナライザーの分解能帯域が 100 kHz の条件で、30 dB の SN レベルのオフセット周波数信号を検出することに成功した。このとき、RF スペクトルの半地幅はおよそ 180 kHz であった。この信号をもとに、フィードバック回路を

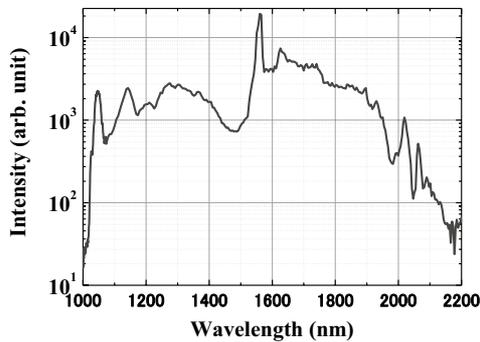


図8 光変調器で発生させたフェムト秒光パルス列から発生させたオクターブ帯域光スペクトル。

用いてファイバーレーザー励起用半導体レーザーの出力にフィードバックを掛けることにより、オフセット周波数をGPS衛星からの信号を基準とする20 MHzのRF基準周波数に対して固定することに成功した。図7の挿入図は、ロック前後での誤差信号を示す。通信波長帯におけるオフセット周波数ロックのパルスエネルギーのそれまでの記録は、Hartlらによる600 pJの報告<sup>16)</sup>だったので、その半分以下のファイバー結合パルスエネルギーでのオフセット周波数ロックに成功したことになる。

#### 4. 光変調器を用いて発生させた短パルス列からのオクターブ光の発生と今後の課題

われわれは、2章で述べた光変調器を用いた高繰り返し光短パルス列発生技術と3章で述べたオフセット周波数検出の低パルスエネルギー閾値化技術を組み合わせて、広モード間隔光周波数コムのオフセット周波数をロックすることに取り組んでいる。図8に、光変調器で発生させた繰り返し250 MHz、平均出力1 Wの光パルスを、テルライトPCFに入射させたときに得られたSC光スペクトルを示す。波長1030 nmから2060 nmに及ぶオクターブ帯域光が得られている。今後、PPLNリッジ導波路を用いて2060 nm近辺の光からの第二高調波を発生させて短波長成分と干渉させて、オフセット周波数の検出を行い、シードに用いているCW半導体レーザーの中心波長にフィードバック制御を掛けることで、各モードの光周波数が外部のRF基準信号に対して固定された通信波長帯広モード間隔光周波数コムを完成させる予定である。

ここで紹介した研究は、NTTの石澤淳氏、高良秀彦氏、大分大学の古賀正文氏、水鳥明氏、徳島大学の高田篤氏との共同研究によるものである。皆様に心より感謝いたします。本研究の一部は科学研究費補助金により遂行されたものである。

#### 文 献

- 1) T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth and T. W. Hänsch: "Absolute optical frequency measurement of the cesium D1 line with a mode-locked laser," *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 3568-3571.
- 2) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall and S. T. Cundiff: "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis," *Science*, **288** (2000) 635-639.
- 3) D. C. Heinecke, A. Bartels, T. M. Fortier, D. A. Braje, L. Hollberg and S. A. Diddams: "Optical frequency stabilization of a 10 GHz Ti:sapphire frequency comb by saturated absorption spectroscopy in <sup>87</sup>rubidium," *Phys. Rev. A*, **80** (2009) 053806.
- 4) Z. Jiang, C. Haug, D. E. Leaird and A. M. Weiner: "Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines," *Nat. Photonics*, **1** (2007) 463-467.
- 5) A. Bartels, D. Heinecke and S. A. Diddams: "10-GHz self-referenced optical frequency comb," *Science*, **326** (2009) 681.
- 6) T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck, R. Holzwarth, T. W. Hänsch and T. Udem: "Fabry-Pérot filter cavities for wide-spaced frequency combs with large spectral bandwidth," *Appl. Phys. B*, **96** (2009) 251-256.
- 7) T. Kobayashi, H. Yao, K. Amano, Y. Fukushima, A. Morimoto and T. Sueta: "Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 382-387.
- 8) T. Otsuji, M. Yaita, T. Nagatsuma and E. Sano: "10-80-Gb/s highly extinctive electrooptic pulse pattern generation," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2** (1996) 643-649.
- 9) A. Ishizawa, T. Nishikawa, A. Mizutori, H. Takara, S. Aozasa, A. Mori, A. Takada and M. Koga: "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.*, **46** (2010) 1343-1344.
- 10) A. Mori, K. Shikano, E. Enbutsu, K. Oikawa, K. Naganuma, M. Kato and S. Aozasa: "1.5 μm band zero-dispersion shifted tellurite photonic crystal fibre with a nonlinear coefficient of 675 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>," *30th European Conference on Optical Communication (ECOC 2004)*, Th3.3.6 (2004, Stockholm).
- 11) A. Ishizawa, T. Nishikawa, A. Mizutori, H. Takara, H. Nakano, T. Sogawa, A. Takada and M. Koga: "Generation of 120-fs laser pulses at 1-GHz repetition rate derived from continuous wave laser diode," *Opt. Express*, **19** (2011) 22402-22409.
- 12) Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga and H. Suzuki: "Direct-bonded QPM-LN ridge waveguide with high damage resistance at room temperature," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 609-611.
- 13) A. Ishizawa, T. Nishikawa, S. Aozasa, A. Mori, O. Tadanaga, M. Asobe and H. Nakano: "Demonstration of carrier envelope offset locking with low pulse energy," *Opt. Express*, **16** (2008) 4706-4712.
- 14) A. Ishizawa, T. Nishikawa, S. Aozasa, A. Mori, O. Tadanaga, M. Asobe and H. Nakano: "Efficient carrier-envelope offset locking with a simplified configuration of an f-to-2f interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** (2011) 022502.
- 15) H. Hundertmark, D. Kracht, D. Wandt, C. Fallnich, V. V. R. K. Kumar, A. K. George, J. C. Knight and P. St. J. Russell: "Super-continuum generation with 200 pJ laser pulses in an extruded SF6 fiber at 1560 nm," *Opt. Express*, **11** (2003) 3196-3201.
- 16) I. Hartl, G. Imeshev, M. E. Fermann, C. Langrock and M. M. Fejer: "Integrated self-referenced frequency-comb laser based on a combination of fiber and waveguide technology," *Opt. Express*, **13** (2005) 6490-6496.

(2012年5月23日受理)