

アレイ導波路格子を用いた光波シンセサイザによる 超高速光信号の生成

安西志摩子, 駒井 友紀, 三重野光子, 小舘香椎子
日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2007年12月13日受理)

要 旨 光通信における超高速デバイスの性能向上により, 光ファイバで伝送できる伝送速度は飛躍的に向上している。それに伴い, 大容量通信の実現のために伝送速度の更なる高速化が進められ, 毎秒テラビット (Tera bit per second: Tbps) 伝送の実用化が期待されている。光時分割多重方式 (Optical time division multiplexing: OTDM) においては, 1 波長で 1.28 Tbps が実現されているが, さらなる超高速な繰り返し周波数を有する光クロック生成技術の研究開発が進められている。しかし, 繰り返し周波数や中心波長を可変にする技術は未開発であった。本研究では, 導波路型光波シンセサイザ (Optical spectrum synthesizer: OSS) とスーパーコンティニウム (Supercontinuum: SC) 光生成器を組み合わせ, 繰り返し周波数, 中心周波数共に可変で制御可能な新しいテラヘルツ (THz) レート光クロック生成技術を提案する。この OSS は可変減衰器 (Variable optical attenuator: VOA) と可変位相シフタ (Variable optical phase shifter: VOPS) で, 入力光信号のスペクトルの各成分を制御することにより, 任意の繰り返し周期を持つパルス列やパルス波形の生成, 整形が可能となる。本論文では, 提案する光クロック生成システムを用い, 安定した THz レート光クロックの生成を実験的に実証したので報告する。提案した THz レート光クロック生成技術は通信分野に限らず計測分野等でも幅広い応用が期待できる。

キーワード: フォトニックネットワーク, THz レート光クロック生成器, 導波路型光波シンセサイザ (Optical spectrum synthesizer: OSS), アレイ導波路格子 (Arrayed waveguide grating: AWG), スーパーコンティニウム (Supercontinuum: SC) 光, 光パルス処理, フーリエ変換

1. はじめに

近年, 光の特徴である超高速性・超広帯域性を活用した THz オーダーの高速繰り返し・高出力光クロックの研究開発が進められている。THz レート光クロック光源は高速化・大容量化が進んでいる超高速フォトニックネットワークにおける基準クロックの生成への応用をはじめとして, 計測・センシングにおける装置の時間分解能を越えた測定や超精密時間分解計測への応用¹⁾, 未知の光学現象における材料開発^{2,3)}, 光遺伝子分析, 非線形光学効果⁴⁾ への幅広い応用が期待されている。

超高速フォトニックネットワークにおいてはシステムを構成する光デバイスの性能向上により光ファイバで伝送できる伝送速度は飛躍的に向上してきた。さらに次世

代のユビキタス社会および大容量通信ネットワークの実現のため, 伝送速度の更なる高速化が進められ, Tbps オーダーの伝送性能が求められている。OTDM においては, 1 波長で 1.28 Tbps が実現されている⁵⁾。超高速光クロック生成技術として, モード同期レーザ (Mode lock laser diode: MLLD) を用いる手法⁶⁾, 時分割多重装置を用いて生成する手法⁷⁾, 波長の異なる複数台のレーザの発振周波数差を利用してフーリエ合成を行う手法⁸⁾, 高非線形ファイバを用いる手法⁹⁾ が研究されている。さらに, 最近では分子振動を活用し, 10 THz の極めて質の高い超短パルスレーザ光¹⁰⁾ が実現されている。しかし, 繰り返し周波数や中心波長が可変である光クロック生成技術は未開発である。

本研究室ではフーリエ変換を用いたスペクトル制御によるパルス整形の原理を基に, 光通信におけるキーデバイスである AWG を用いた OSS を提案している¹¹⁾。OSS

では入力した光信号を AWG のフーリエ変換機能によりスペクトルに変換し、制御した後に逆フーリエ変換することによって任意の光信号が生成可能である。この手法により、時間領域では直接変調することが難しい 100 Gbps 以上の超高速光信号も操作可能であり、試作した OSS を用いた 10~160 GHz の Return-to-zero (RZ) 変調式パルス列の繰り返し周波数変調にも成功している¹¹⁾。得られた結果を踏まえ、本研究では、この OSS と SC 光源を組み合わせ、繰り返し周波数、中心波長が共に可変である新しい THz レート光クロック生成器を提案する。また、試作した光クロック生成器を用い、安定した THz レート光クロックの生成を実験的に実証したので報告する¹²⁾。

本論文では第 2 章でフーリエ変換を用いたスペクトル領域における超高速光クロック生成について述べ、第 3 章で OSS の構成について述べる。第 4 章では OSS を用いた THz レート光クロック生成実験で得られた結果について述べ、第 5 章で得られた結果についてまとめる。

2. THz オーダーの繰り返し周波数を有する光クロックの生成原理

2-1. フーリエ変換を用いたスペクトル信号処理

Fig. 1 にスペクトル領域での制御に基づく超高速光信号生成の原理を示す。直接変調が困難な繰り返し周波数 40 GHz 以上の光クロックの処理には、フーリエ変換を用いたスペクトル領域での制御が有効である。時間領域でのパルス幅 $\Delta\tau$ はスペクトル領域でのスペクトル分布全体の幅と逆数の関係にある。同様に、時間領域でのパルス間隔 Δt はスペクトル領域でのスペクトル成分の間隔と逆数の関係にある。したがって、高速な光信号ほどスペクトル領域では広帯域であり、スペクトル成分の間

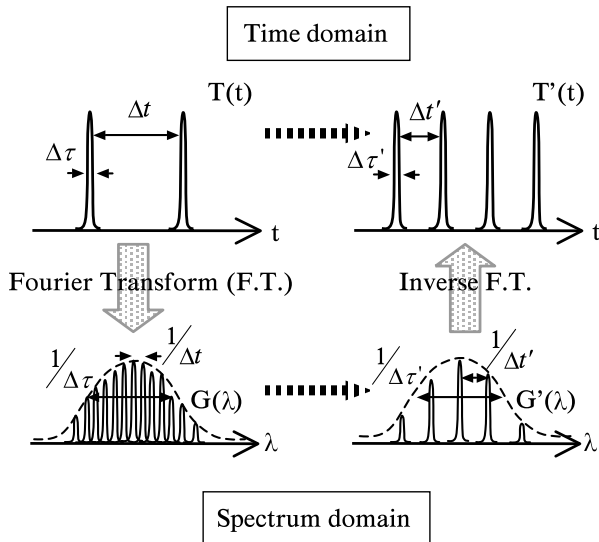


Fig. 1 Principle of pulse train in time and spectrum region.

隔も広くなるため、制御が容易になる。このように、スペクトル領域で制御を行うことで時間領域では直接制御をすることが困難な超高速光パルスも高精度に制御することができる。この原理により、光信号をフーリエ変換によってスペクトル領域に変換し、スペクトル成分の振幅、位相を制御することにより、任意の形状、繰り返し周波数の光パルスを生成することが可能となる。

これまでに、光信号をスペクトル領域で処理するデバイスとして、回折格子とレンズを組み合わせたもの¹³⁾や AWG を用いて波長ごとに分波するもの¹⁴⁾が研究されている。われわれは光信号をスペクトル領域に変換するデバイスとして OSS を適用し、繰り返し周波数の高速化に加え、伝送してきた光信号の分散補償¹⁵⁾やスペクトル領域で符号・復号化、光パケットスイッチングでのラベル生成や、光符号分割多重方式の符号化¹⁶⁾などの光信号処理を行い、その有用性を示している。

2-2. AWG を用いた導波路型 OSS の原理

Fig. 2 に振幅・位相可変周回性 AWG を用いた OSS の構成を示す。試作した OSS は AWG (チャンネル数 32, チャンネル間隔 20 GHz) と、各出力導波路上に設置された VOA, VOPS, ミラー, サーキュレータから構成される。

VOA は平面導波回路 (Planar Lightwave Circuit: PLC) 基板上にヒータを有するマッハ・ツェンダ型干渉計の構造になっており、VOPS は直線導波路上にヒータを設置した構造になっている。VOA, VOPS に取り付けられたヒータの変調量は、制御用パソコンから印加する電流量により制御することができる。このとき、熱光学効果で導波路の屈折率が変化し、振幅と位相を任意に制御することが可能になる。制御に要する時間は約 3 ms である。AWG の入出力ポートから入力された光信号はフーリエ分解され、各スペクトル成分に分波される。VOA, VOPS により振幅と位相を制御されたスペクトル成分はミラーで反射し、AWG によってフーリエ合成され、入出力ポー

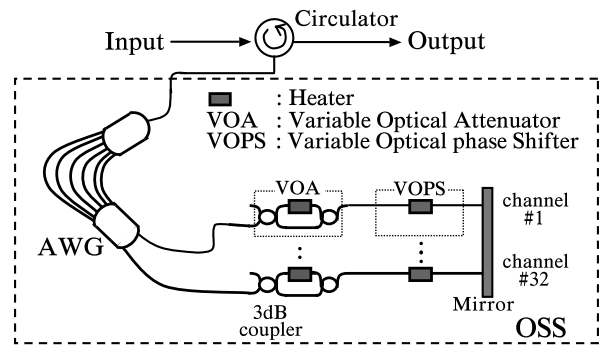


Fig. 2 Configuration of waveguide-type optical spectrum synthesizer.

トから制御された光信号として出力される。さらに、AWG, VOA, VOPS を一体化した PLC 基板にベルチエ素子と温度センサを組み込み、モジュール化している。この構造により基板温度を制御し、整形される光信号の中心波長を微調節することができる。この OSS では、 0.1°C 変化させることにより、 0.01 nm 中心波長をシフトさせることが出来る。

2-3. OSS による超高速光クロックの生成

AWG は長さの異なる多数の光導波路から構成され、アレイ導波路の長さは隣接する導波路で一定量 ΔL ずつ異なっている。導波路の長さは一定値 ΔL ずつ異なっているので、出力導波路端では、波長に依存した位相差が生じる。AWG の設計はアレイ導波路のピッチ d 、スラブ導波路の焦点距離 f を変化させることで線分散を大きくすることができる。さらに、AWG の回折次数 m はチャンネル導波路の透過屈折率 n_c 、アレイ導波路群の導波路長差 ΔL 、入力する光パルスの中心波長 λ_0 を用いて、以下のように表すことができる。

$$m = \frac{n_c \Delta L}{\lambda_0} \quad (1)$$

この式より、任意の整数である回折次数に対応して、中心波長が複数存在する。中心波長が重複無く使用できる帯域を free spectrum range (FSR) といい、

$$FSR = \frac{\lambda_0}{m} \quad (2)$$

と表すことができる。現在では 6 インチウエハを用いた 400 チャンネル大規模 AWG が実現され、隣接波長チャンネルのクロストークが -20dB の良好な透過特性が確認され

ている¹⁷⁾。

これまでに、本研究室では AWG を用いた OSS を用いて、繰り返し周波数 20 GHz の光信号をスペクトル領域で制御することにより繰り返し周波数を 160 GHz まで圧縮することに成功している。Fig. 3 (a), (b) に MLLD から発振された繰り返し周波数 20 GHz の光パルス列のスペクトル分布と時間波形, Fig. 3 (c), (d) に OSS によってスペクトル成分を抑圧し、スペクトル成分間を 20 GHz である 0.16 nm から、8 倍の 1.28 nm に拡大したときのスペクトル分布と時間波形を示す。光パルスの間隔が 50 ps から 0.625 ps と 8 分の 1 に圧縮され、繰り返し周波数が 160 GHz に変換された事が分かる。この OSS では 20 GHz 間隔で 32 ch 分のスペクトル成分が制御可能であるため、6.12 nm の帯域で動作している。また、MLLD から発振される光信号の帯域は約 10 nm となり、OSS で生成できる超高速光信号の繰り返し周波数は 160 GHz が上限であった。

繰り返し周波数が 160 GHz 以上の高速な光信号を生成するためには、スペクトルの成分間隔を THz オーダー (約 8 nm 以上) まで広げる必要があるため、広帯域光源とその広帯域に渡るスペクトルを制御する機能が必要である。そこで、我々は光源に SC 光源を用いた THz レート光クロック生成技術を考案した。SC とは非線形性媒質中に強い光パルスを入射したとき、種々の光学的非線形現象の相互作用によって生成される広帯域のスペクトルを指す¹⁸⁾。SC 光は光通信における波長分割多重方式 (Wavelength Division Multiplexer: WDM) における多波長光源や、長短パルス光源として用いられている。SC 光の発生手法として、数 cm 程度の長さのフォトニッククリスタルファイバやウエスト部のクラッド直径を数

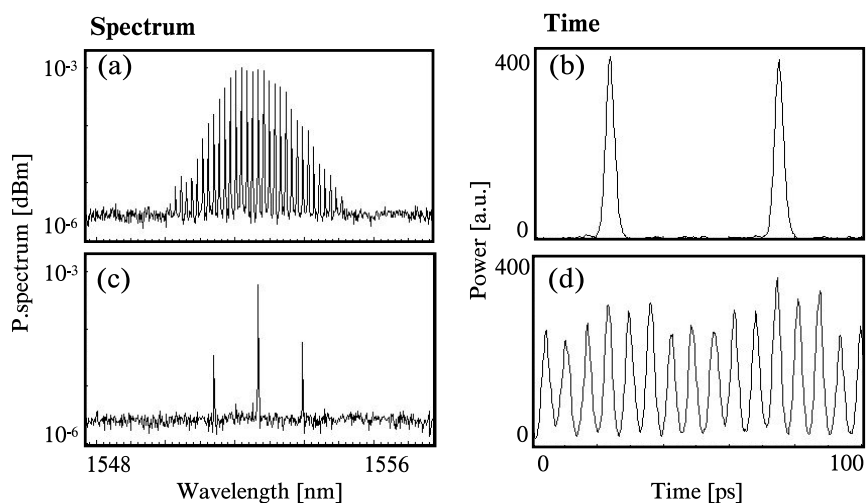


Fig. 3 Experimental results of ultrahigh speed optical pulse train.

- (a), (b) Spectrum and optical waveform: 20GHz repetition rate.
(c), (d) Spectrum and optical waveform: 160GHz repetition rate.

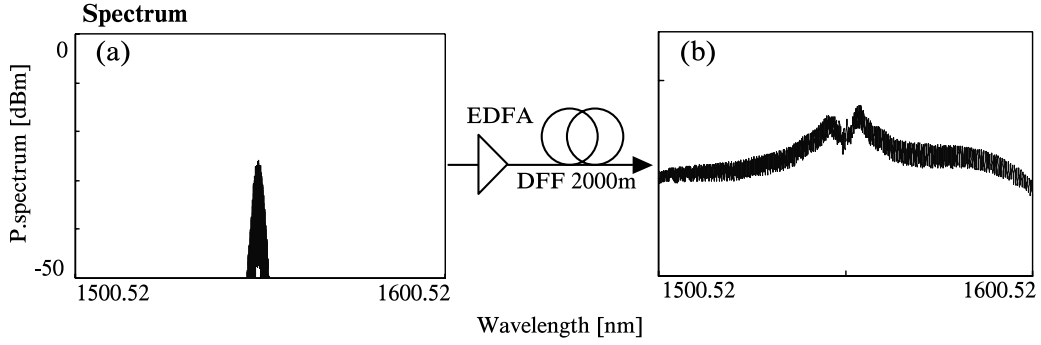


Fig. 4 Spectra of MLLD output and generated SC light.

- (a) MLLD output.
(b) generated SC light.

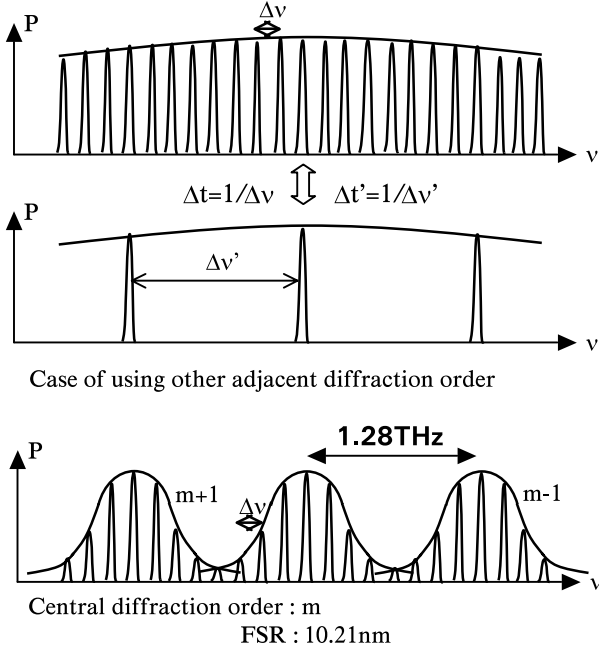


Fig. 5 THz repetition rate optical clock using single and multi diffraction order of AWG.

μm 程度に細くした双方向テーパファイバを使用した方法、分散フラットファイバ (DFF) を用いた方法がある。今回の実験では DFF に高出力な光パルス列を入力することにより、スペクトル領域において 100 nm 以上の広がりを持つ光を生成し、THz レート光クロック生成器の光源とした。Fig. 4 (a) に MLLD から発振された光信号のスペクトル分布、Fig. 4 (b) に DFF によって生成された SC 光のスペクトル分布を示す。入力光パワーは 14.5 dBm とした。Fig. 4 (b) よりわかるように、フラットで安定した SC 光が生成できた。

また、8 nm 以上のスペクトル成分間隔を制御するため、OSS に搭載した AWG の複数回折次数光を用いた。Fig. 5 にその概念図を示す。原理確認実験では、20 GHz-

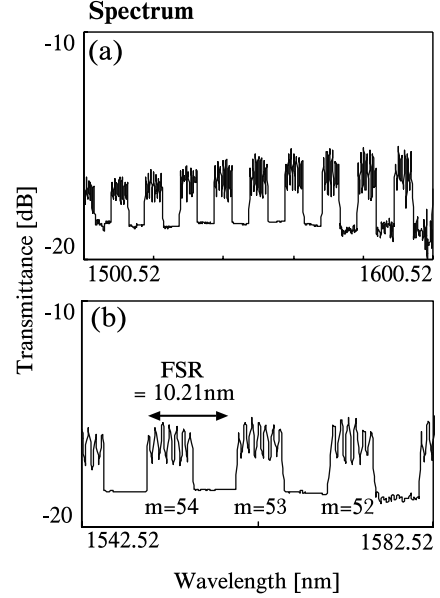


Fig. 6 Characteristic of OSS.

- (a) Transmittance of OSS.
(b) Close-up of transmittance.

32 ch の試作 OSS を使用したため、組み込んである AWG の複数回折次数光を利用したが、AWG の FSR を大きく設計し、任意のスペクトル制御を行うことで、より柔軟な繰り返し周波数、中心周波数可変な THz レート光クロックが生成できる。この THz レート光クロックの生成方法は、作製技術が確立されている光導波路デバイスを使用することにより、1.55 μm 波長帯で中心波長および繰り返し周期が可変であるという利点も持つ。

OSS に ASE 光を入力したときの透過スペクトル光を Fig. 6 (a) に示す。試作 OSS の AWG は FSR が 1.28 THz (10.21 nm) の設計になっていることが分かる。ここで、OSS によって AWG の各回折次数光の中心のスペクトル成分のみを残して抑圧すると、中心回折次数およ

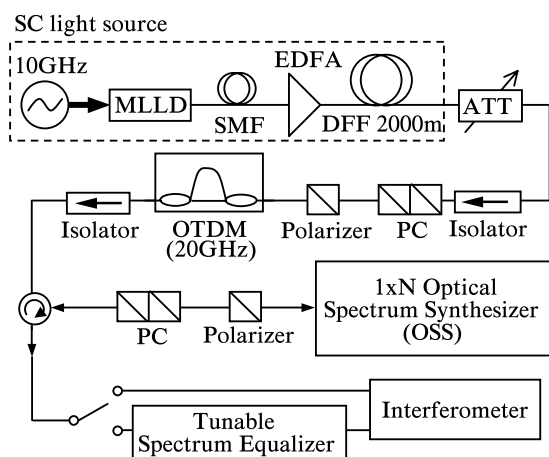


Fig. 7 Experimental setup of THz repetition rate optical clock.

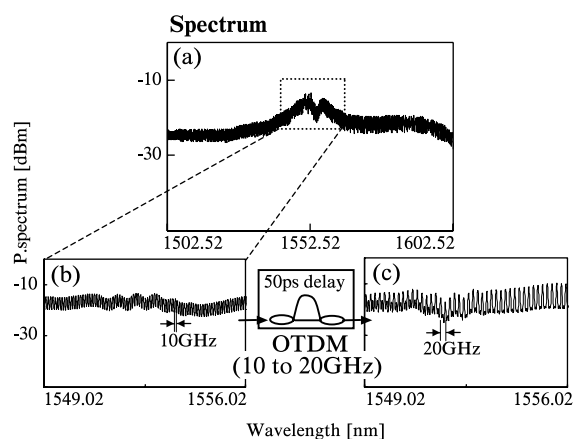


Fig. 8 Spectrum of generated 20GHz SC light.

- (a) 10GHz SC light.
- (b) Close-up of 10GHz SC light.
- (c) Close-up of 20GHz SC light.

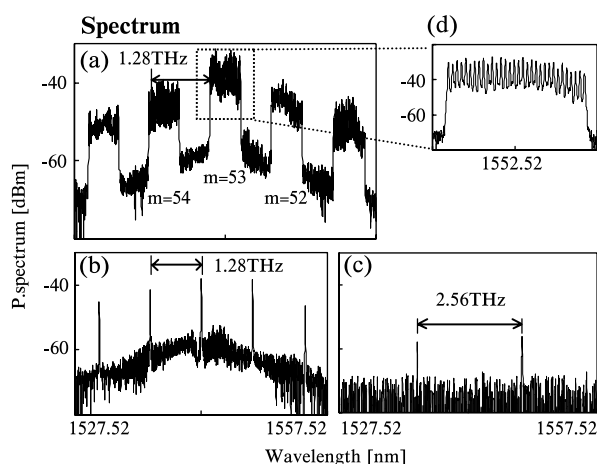


Fig. 9 Spectrum of optical clock controlled by OSS.

- (a) Non-controlled spectrum of optical pulse trains.
- (b) Repetition rate: 1.28THz.
- (c) Repetition rate: 2.56THz.
- (d) Close-up of central diffraction order's spectrum.

びその隣接する回折次数のスペクトル成分の間隔が 10.21 nm となり、繰り返し周波数 1.28 THz の THz レート光クロックの生成が可能となる。

3. THz レート光クロック生成の実験

THz レート光クロック生成実験の光学系を Fig. 7 に示す。光学系は MLLD, SC 光源, OTDM, 光スペクトルアナライザ, 光サーキュレータ, 偏波コントローラ (PC), 偏光子, アイソレータ, サーキュレータ, OSS から構成されている。SC 光源はエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA), DFF から構成される。MLLD は OSS の中心波長にあわせ、中心波長 1552.524 nm, 繰り返し周波数 10 GHz, パルス幅 2 ps の光信号を生成した。OSS により制御、合波された光信号はサーキュレータから取り出され、光スペクトルアナライザとマイケルソン干渉型スペクトルアナライザにより測定される。繰り返し周波数が 320 GHz 以上の光パルス列は光サンプリングオシロスコープでの時間波形の観測が不可能になる。そこで、マイケルソン干渉計型スペクトルアナライザを用いることで生成された光パルスの繰り返し周波数の確認を行った。マイケルソン干渉計型スペクトルアナライザでは、入力された光パルスをビームスプリッタによって 2 光路に分岐し、光路差を通して干渉させる。光路差を横軸に、干渉光強度を縦軸にとったインターフェログラムは、被測定光の自己相関となる。この自己相関波形のピーク間の距離を測定することで繰り返し周波数の確認を行うことが出来る。

以上に基づき、MLLD から発振された繰り返し周波数 10 GHz, パルス幅 2 ps のパルス列より SC 光を生成した。この 10 GHz の SC 光を OTDM に入力し、繰り返し周波数 20 GHz の SC 光を生成した。Fig. 8 (a) に生成した 10 GHz の SC 光, (b) に拡大図, (c) に生成した 20 GHz の SC 光のスペクトル分布を示す。次に、繰り返し周波数 20 GHz の SC 光を OSS に入力し、スペクトル領域で制御を行った。Fig. 9 (a) に、OSS によって振幅、位相を制御する前の出力スペクトル分布, Fig. 9 (d) に中心の回折次数の拡大図を示す。Fig. 9 (a) に示したようにスペクトルは中心のスペクトル成分以外のすべてのスペクトル成分を VOA によって抑圧し、繰り返し周波数が THz オーダーの光クロックを生成した。Fig. 9 (b), (c) に繰り返し周波数 1.28 THz および 2.56 THz の光クロックのスペクトルを示す。繰り返し周波数 2.56 THz の THz レート光クロックの生成時には、可変スペクトルイコライザを用いて繰り返し周波数 1.28 THz レート光クロックの光スペクトル成分を 1 つおきに抑圧した。使用した可変スペクトルイコライザのチャンネル間隔は 100 GHz である。また、マイケルソン干渉計型スペクト

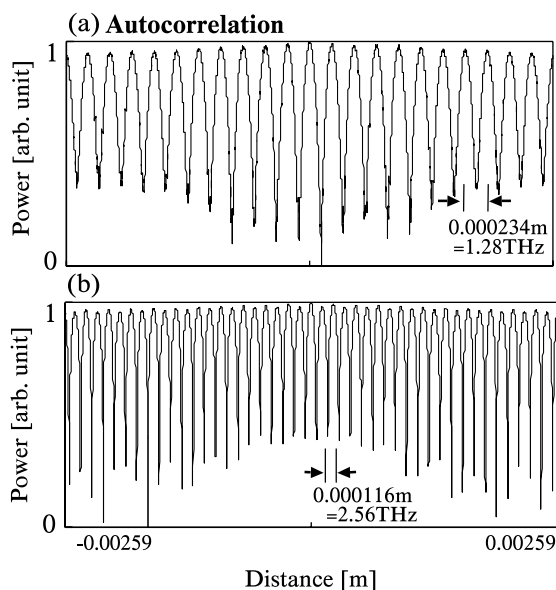


Fig. 10 Autocorrelation of generated THz repetition rate optical clock.

- (a) Repetition rate: 1.28THz.
(b) Repetition rate: 2.56THz.

ルアナライザを用いて、生成した 1.28 THz および 2.56 THz 繰り返し周波数の光クロックの自己相関波形を取得した。Fig. 10 (a), (b) に生成した繰り返し周波数 1.28 THz, 繰り返し周波数 2.56 THz レート光クロックの自己相関波形を示す。2 つの隣接したピークの間隔は 0.234 mm, 0.116 mm であり、それぞれ光クロックの繰り返し周波数は 1.28 THz, 2.56 THz に相当する。したがってスペクトル領域で制御可能な OSS を用いることにより、1.28 THz, 2.56 THz の THz レート光クロックが生成できたことを確認した。また、自己相関波形のピークのパワーにほぼ差がないことから、安定した THz 光クロックが生成されていることが分かる。この手法においては、SC 光の種パルス光の周波数を変えることにより、中心周波数を可変にすることも可能である。

4. ま と め

本論文では SC 光生成部と導波路型 OSS を組み合わせた、繰り返し周波数、中心周波数が可変な THz オーダーの繰り返し周波数を有する光クロックの新しい生成法の提案を行った。スペクトル領域でスペクトル成分の強度を制御することにより、スペクトル成分間隔 1.28 THz および 2.56 THz, 消光比 10 dB 以内の 5 本のスペクトル成分を生成した。このスペクトルの自己相関波形の測定結果から、提案した THz レート光クロック生成器により安定した THz オーダーの繰り返し周波数を有する光

クロックが生成されたことを実験的に実証した。OSS に組み込む AWG の最適設計により、更なる何の高速化、安定化が可能である。

本研究は日本女子大学と独立行政法人情報通信研究機構の共同研究で進めています。実験にご協力・ご助言を頂きました情報通信研究機構第 1 研究部門 新世代ネットワーク研究センター 超高速フォトニックネットワークグループの宮崎哲弥氏、他グループの皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) Y. Hayashi, Y. Tanaka, T. Kirimura, N. Tsukuda, E. Kuramoto, and T. Ishikawa: Physics Review Letter, Vol. **96**, 115505 (2006).
- 2) Y.C. Sasaki, Y. Okumura, T. Miyazaki, T. Higurashi, and N. Oishi: Applied Physics Letters, Vol. **89**, 053121 (2006).
- 3) Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima: Journal of the Optical Society of America B, Vol. **19**, pp. 2573-2589 (2002).
- 4) K. Itoh, Y. Toda, R. Morita, and M. Yamashita: Japanese Journal of Applied Physics, Vol. **43**, pp. 6448-6451 (2004).
- 5) M. Nakazawa, T. Yamamoto, and K.R. Tamura: Electronics Letters, Vol. **36**, pp. 2027-2029 (2000).
- 6) S. Arahira, S. Oshiba, Y. Matsui, T. Kanii, and Y. Ogawa: Optics Letters, Vol. **19**, p. 834 (1994).
- 7) E. Yamada, E. Yoshida, T. Kitoh, and M. Nakazawa: Electronics Letters, Vol. **31**, pp. 1342-1344 (1995).
- 8) M. Hyodo, Kazi Sarwar Abedin, and N. Onodera: Optics Letters, Vol. **26**, pp. 340-342 (2001).
- 9) Y. Ozeki, S. Takasaka, J. Hiroishi, R. Sugizaki, T. Yagi, M. Sakano, and S. Namiki: Electronics Letters Vol. **41**, pp. 1048-1050 (2005).
- 10) M. Katsuragawa, K. Yokoyama, T. Onose, and K. Misawa: Optics Express, Vol. **13**, pp. 5628-5634 (2005).
- 11) N. Wada, F. Kutota, H. Watanabe, Y. Komai and K. Kodate: Conference on Lasers and Electro-Optics in Europe 2003, CEP-8-THU (2003).
- 12) Y. Komai, S. Anzai, N. Wada, F. Moritsuka, T. Miyazaki and K. Kodate: ECOC 2006, We3. P.77 (2006).
- 13) A.M. Weiner: Optical and Quantum Electronics, Vol. **32**, pp. 473-487 (2000).
- 14) T. Kurokawa, H. Tsuda, K. Okamoto, K. Naganuma, H. Takenouchi, Y. Inoue and M. Ishii: Electronics Letters, Vol. **33**, Issue 22, pp. 1890-1891 (1997).
- 15) N. Wada, Y. Komai, F. Moritsuka and K. Kodate: Proceedings of SPIE, 6028 414-421 (2006).
- 16) F. Moritsuka, N. Wada, T. Sakamoto, T. Kawanishi, Y. Komai, S. Anzai, M. Izutsu and K. Kodate: Optics Express, Vol. **15**, pp. 7515-7521 (2007).
- 17) <http://www.ntt.co.jp/RD/OFIS/active/2001pdf/ct33.pdf>
- 18) R.R. Alfano and S.L. Shapiro: Physical Review Letters, **24** (1970) 592-594.

Ultrafast Repetition-Rate Optical Clock Generation Based on Optical Spectrum Synthesizer Using Attenuation and Phase Tunable Arrayed Waveguide Grating

Shimako Anzai, Yuki Komai, Mitsuko Mieno and Kashiko Kodate

The Graduate School of Science, Division of Mathematical and
Material Structure Science, Japan Women's University

(Received December 13, 2007)

Abstract: Recently, a number of researches have been carried out to develop new technologies of ultrahigh-speed repetition rate with terahertz (THz)-order optical clock generation based on the ultrafast and ultrabroadband property of light. The applications of this THz repetition rate optical clock are broad, including ultrahigh-precision measurement and searching exceeding the time restraints, material development, optical and biomedical analysis of a genome, nonlinear optical phenomena, and the generation of a standard clock in an ultrafast photonic network.

Currently, techniques are available for THz optical clock generation based on a compression high-nonlinear fiber and OTDM, Fourier synthesis of multiple wavelengths, and a mode-locking- distributed Bragg reflector. An ultrafast clock with a repetition rate of 10 THz has been realized by applying molecular vibration. However, the tunability of the repetition rate and the center wavelength of the optical clock have not yet been achieved using these technologies.

We propose a new THz rate optical clock generation technique with a tunable repetition rate and a center wavelength. The proposed optical clock generator consists of a waveguide-type optical spectrum synthesizer using attenuation and phase-tunable cyclic arrayed waveguide grating and a supercontinuum light generator. The optical spectrum synthesizer can generate arbitrary repetition rate pulse trains and a waveform by controlling each spectrum mode, using its variable optical attenuators and phase shifters. In this paper, we demonstrate optical clock generation with repetition rates of 1.28 and 2.56 THz experimentally.

Key words: Photonic network, Terahertz (THz) repetition rate optical clock generation system, Optical spectrum synthesizer: OSS, Arrayed waveguide grating: AWG, supercontinuum light: SC light, Optical pulse processing, Fourier transform.

