

位相変調器を用いた高繰り返し短パルスファイバーレーザー

諸橋 功^{*,†}, 坂本 高秀^{*}, 外林 秀之^{**}
関根 徳彦^{*}, 川西 哲也^{*}, 寶迫 巖^{*}

Optical Short Pulse Fiber Lasers with High Repetition Rate Using Phase Modulators

Isao MOROHASHI^{*,†}, Takahide SAKAMOTO^{*}, Hideyuki SOTOBAYASHI^{*}, Norihiko SEKINE^{*},
Tetsuya KAWANISHI^{*} and Iwao HOSAKO^{*}

Terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) is widely used for nondestructive imaging, gas sensing and so forth. The main component in conventional THz-TDS systems is an ultrashort pulse laser, and mode-locked lasers are conventionally used. Optical-modulator-based ultrashort pulse sources attract a great deal of attention for an alternative source because of stability, tunabilities and high repetition rate on the order of Gigahertz. For the THz-TDS system, ultrashort pulse trains with a high repetition rate provide benefits such as short acquisition time in spectroscopic measurements, high modal power density, and so forth. In this paper, an ultrashort pulse source composed by a Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator and a dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber is discussed. In addition, high peak power pulse generation using chirped pulse amplification is also discussed, which is required for THz wave generation.

Key words: ultrashort optical pulse, optical frequency comb, terahertz time-domain spectroscopy, Mach-Zehnder modulator, dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber, chirped pulse amplifier

テラヘルツ (THz) 波 (周波数: 0.1~10 THz, 波長: 30~3000 μm) は, 簡便に発生・検出する方法がなかったために, かつては“未開拓領域”とよばれ, 電波天文などのごく限られた分野で利用された周波数領域である。しかし, 近年のデバイス技術や超短光パルス技術の進展により, テラヘルツ波帯での計測が比較的簡便に行えるようになってきた。これにより, セキュリティーや医療・バイオ, 無線通信など, さまざまな分野での応用の可能性が見いだされている¹⁾。現在のテラヘルツ波計測ではテラヘルツ時間領域分光 (THz time-domain spectroscopy: THz-TDS) が主流となっており, 超短光パルスレーザーは非常に重要な役割を担っている。これまでは Ti: Sapphire レーザーなどの固体レーザーがおもに使われていたが, 近年では小型で安定なファイバーレーザーに注目が集まっている。

超短光パルスファイバーレーザーでは, モード同期法が広く用いられており, 高性能な光源が多く開発されている²⁻⁴⁾。一方, モード同期法とは別のアプローチとして, 光変調技術に基づいた短パルス光源が開発されており, フレキシブルで高安定な光源として期待される。この光源の特徴として, モード同期法では難しい 10 GHz を超える高繰り返しパルス列の発生が可能であること, 中心波長や繰り返し周波数の制御が容易であることなどがあり, 波長分割多重 (wavelength division multiplexing: WDM) 用多波長連続波 (continuous wave: CW) 光源や時分割多重 (time division multiplexing: TDM) 用信号源として注目されてきた。しかし, これらの特徴はテラヘルツ分光計測に対しても, 測定時間の短縮や SN 比の向上など, さまざまなメリットがあると考えられる。本稿では, テラヘルツ応

*情報通信研究機構 (〒184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1)

**青山学院大学 (〒252-5258 相模原市中央区淵野辺 5-10-1)

†E-mail: morohashi@nict.go.jp

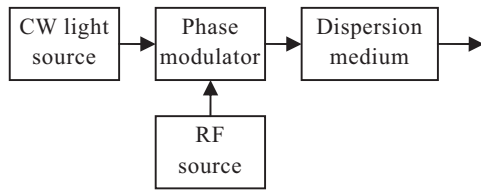


図1 位相変調器を用いたパルスレーザーの構成.

用に向けた高繰り返しパルスレーザーとして、マッハ・ツェンダー変調器 (Mach-Zehnder modulator: MZM) 型超平坦光コム発生器 (MZM-based flat comb generator: MZ-FCG) を用いた超短光パルス光源について述べる.

1. 超短光パルスのテラヘルツ波応用

THz-TDS は、超短光パルスを用いてテラヘルツ波パルスの発生および検出を行う分光法であり、材料の複素屈折率を測定することができる。さらに、パルス波であることを利用して、深さ方向の情報を得ることができ、物体の内部構造の情報を非破壊・非接触で得られることから注目を集めている。例えば、文化財の非破壊検査に应用されており、絵画などの文化財の修復前に、支持体や下地構造の観察に利用されている⁵⁾。現在のTHz-TDSの研究・開発の方向性としては、高強度・超短パルスレーザーを用いた高出力・広帯域システムの開発と⁶⁻⁸⁾、ファイバーレーザーを用いたシステムの小型化、高安定化の2通りがあると考えられる。最近では、テーブルトップサイズの小型システム⁹⁾や可搬型システムも市販されている¹⁰⁾。特に可搬型システムでは、テラヘルツ波発生部と検出部をプローブ化しており、測定対象を動かすことなく測定することが可能である。さらに最近の新しい流れとして、テラヘルツコム技術の開発が進められており、周波数の精密計測やテラヘルツ帯信号源の位同期期技術の開発などが進められている¹¹⁻¹⁵⁾。高繰り返しパルスレーザーは、モード当たりのパワーを大きく取れることやモード分離の容易さから、テラヘルツコム技術において注目されており、開発が行われている¹⁶⁾。光変調器を用いたパルスレーザーは安定性や高繰り返し、制御の簡便性から、テラヘルツコムへの応用も期待される。

2. 光位相変調器を用いた高繰り返しパルス発生技術

図1に光位相変調器を用いたパルス光源の構成を示す。この光源はおもにCW光源、光変調器および分散デバイスにより構成される。CW光を高周波信号で変調することにより周波数チャープを与え、分散デバイスを用いてパルス波形に整形する¹⁷⁾。

入力光の電界を

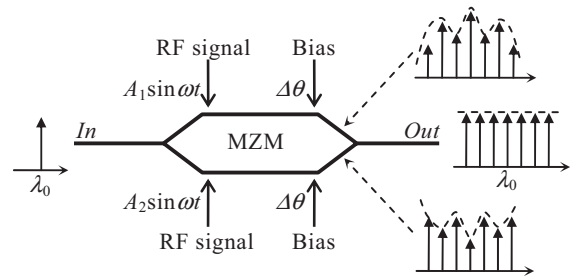


図2 MZ-FCGによる光コム発生原理.

$$E_{\text{out}} = E_0 \exp\{j\omega_0 t\}$$

とし、これを正弦波信号 $A \sin(\omega_m t)$ で変調した場合、出力光の電界は次式のようなになる。

$$E_{\text{out}} = E_0 \exp\{j\omega_0 t - j(A \sin \omega_m t)\} \\ = E_0 \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(A) \exp\{j(\omega_0 - n\omega_m)t\} \quad (1)$$

ここで、 J_n は n 次ベッセル関数である。出力光は線形に近いチャープをもつため、分散デバイスで補償することにより、パルス波形を得ることができる¹⁸⁾。しかしこの方法により得られる短パルスは消光比が高くなく¹⁸⁾、スペクトルの平坦性も低いという問題点がある。強度変調器と位相変調器をタンデム接続する方法が提案されており^{19,20)}、平坦性の高いスペクトル形状とサブピコ秒オーダーの光パルス発生が報告されている²¹⁾。

3. マッハ・ツェンダー変調器型光コム発生器による超短光パルス発生

光変調器を用いたパルス光源の場合、繰り返し周波数が変調器を駆動する高周波 (radio-frequency: RF) 信号の周波数と一致するため、RF信号により繰り返し周波数を簡便にかつ精密に制御できる。さらに、その安定度もRF信号の精度で決まることから、高精度のパルス列を簡便に発生できる。

上述の方法に対して、1台の光変調器を用いて平坦な光周波数コムを発生する方法が提案された²²⁾。この方法では、発生される光コム信号が線形チャープをもつため、簡便に光パルスを発生することが可能である²³⁾。さらに、ソリトンパルス圧縮法を組み合わせることで、フェムト秒オーダーのパルスを発生することも可能である²⁴⁾。本章では、MZ-FCGおよび非線形パルス圧縮を用いた超短光パルス発生について述べる。また、テラヘルツ波発生に必要な高ピークパワーパルスを得るための超短光パルス増幅についても述べる。

3.1 動作原理

図2にMZ-FCGによる光コム発生原理の模式図を示す。

MZ-FCG は両アームに独立の変調電極を有する 2 電極型 MZM を用い、両アームに振幅が異なる RF 正弦波信号 ($A_1 \sin \omega_m t, A_2 \sin \omega_m t$) を入力する。MZM の各アームに導波された CW 光は、それぞれ RF 信号による位相変調を受け、式 (1) に従う側帯波が生成される。それらは直流バイアスによる位相シフト (θ_1, θ_2) が加えられた後、合波される。したがって、出力光の光電場 E_{out} は

$$E_{out} = \frac{1}{2} E_{in} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [J_k(A_1) \exp\{j(k\omega_m t + \theta_1)\} + J_k(A_2) \exp\{j(k\omega_m t + \theta_2)\}] \quad (2)$$

となる²⁵⁾。ただし、 J_k は k 次ベッセル関数である。ここで、ベッセル関数の漸近展開による近似式を適用し、入力光の強度 P_{in} に対する各モードの強度 P_k の変換効率 η_k を求めると、次式ようになる。

$$\eta_k = \frac{P_k}{P_{in}} \approx \frac{1}{2\pi A} \left[1 + \cos(2\Delta\theta) \cos(2\Delta A) + \{\cos(2\Delta\theta) + \cos(2\Delta A)\} \cos\left\{2\bar{A} - \frac{(2k+1)\pi}{2}\right\} \right] \quad (3)$$

ただし、 $\Delta A \equiv A_1 \pm A_2$ 、 $\Delta\theta \equiv \theta_1 \pm \theta_2$ である。ここで、次式の関係が満たされるとき、出力される光コムの各モードの強度は平坦化される (光コム平坦化条件)。

$$\Delta A \pm \Delta\theta = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

このとき、各モードの位相 Φ_k は次式のように、モード次数に関して自乗特性をもつ。

$$\Phi_k = \pm \frac{4k^2 - 1}{8A} \quad (5)$$

このチャープ特性はシングルモードファイバー (SMF) とは逆特性となるため、SMF を用いて簡単にチャープ補償をすることが可能である。これにより、光コム信号はその帯域幅に対応した時間幅 (ピコ秒程度) をもつ光パルスに整形される²³⁾。

3.2 超平坦光コム発生とピコ秒パルス発生

図 3 (a) に MZ-FCG を用いた超短光パルス発生システムの構成を示す。シンセサイザーから出力された 10 GHz の RF 信号を 2 分岐し、それぞれ 30 dBm 程度に増幅後、変調器の各アームに入力した。RF 信号の入力パワーおよび DC バイアスを式 (4) の光コム平坦化条件に設定し、半導体レーザーからの CW 光 (1552 nm, 10 dBm) を変調器に入射して光コムを発生させた。図 3 (b) に MZ-FCG により発生された光コムのスペクトルを示す。平坦性の高い光コムが発生されており、このときの帯域は 300 GHz 程度であった。この光コム信号を長さ 1.1 km の SMF でチャープ補償することにより、2.5 ps 幅の光パルスが発生された

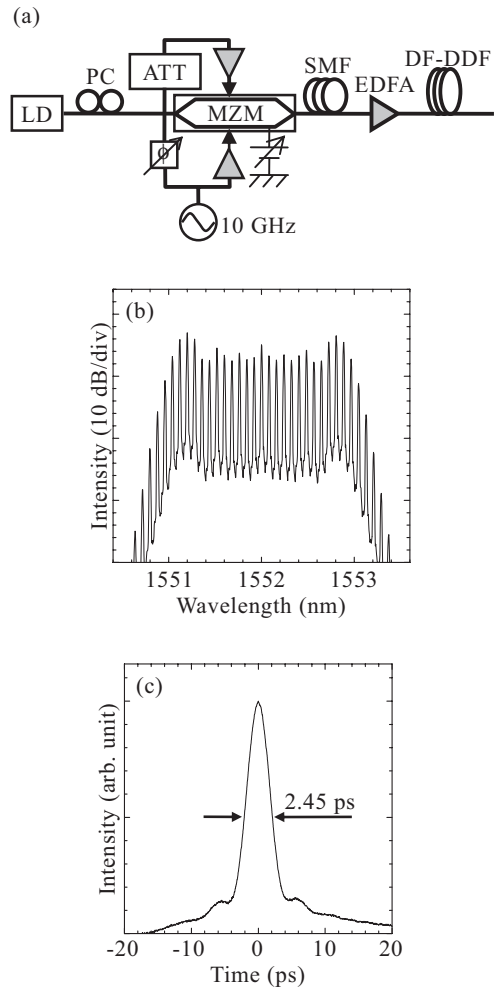


図 3 (a) MZ-FCG 超短光パルス光源の構成, (b) MZ-FCG により発生された光コムのスペクトル, (c) チャープ補償後の光パルスの自己相関波形。

(図 3 (c)).

3.3 非線形パルス圧縮法を用いた超短光パルス発生

MZ-FCG で得られるパルス幅は MZM に入力する RF 信号のパワーにより決まるため、通常 2~3 ps 程度に制限される。超短パルスを得るには非線形パルス圧縮法が有効であり、断熱ソリトン圧縮を用いることで高品質なパルスが得られる。断熱ソリトン圧縮は、ソリトンパルスに緩やかな摂動を与えることでパルス圧縮する方法であり、分散減少ファイバーや短尺楕円分散配置ファイバーなどを用いた超短光パルス発生が報告されている²⁶⁻²⁸⁾。

MZ-FCG で発生されたピコ秒パルスをフェムト秒オーダーまで高品質にパルス圧縮するため、分散フラット・分散減少ファイバー (dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber: DF-DDF) を用いてパルス圧縮を行った。DF-DDF の入射側および出力側の分散値は、9.1 および 0.53 ps/nm/km であり、1550 nm における分散スロープは 0.03 ps/nm/km/nm、長さは 2 km である。図 4 (a), (b) に発

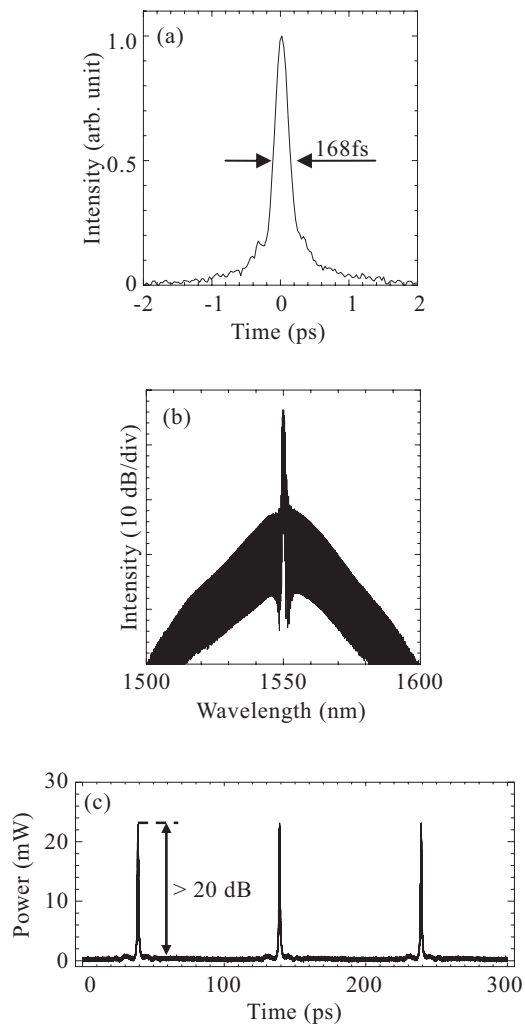


図4 DF-DDFにより発生された超短光パルス。(a)パルスの自己相関波形、(b)スペクトル、(c)光サンプリングオシロスコープを用いて観測したパルス列の波形。

生したフェムト秒光パルスの自己相関波形およびスペクトルを示す。DF-DDFによる圧縮後、168 fs (sech²波形) のパルス幅のフェムト秒パルスが得られた。図4 (b) に示されるように、パルス圧縮後のスペクトルは中心付近に非圧縮成分がみられるものの、10 dB バンド幅が40 nm 以上の広帯域なスペクトルが得られた。図4 (c) に光サンプリングオシロスコープで観測したフェムト秒光パルス列の波形を示す。本方式により得られる光パルスは均一な形状であ

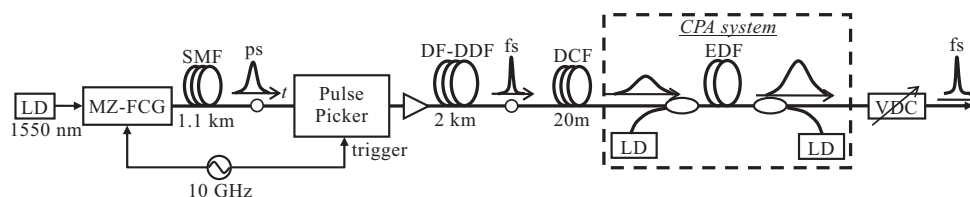


図5 MZ-FCG 超短光パルス光源と CPA を組み合わせた高ピークパワーパルス光源システムの構成。

り、消光比は 20 dB 以上であることが確認された。したがって、ほぼすべてのパルスエネルギーが SMF および DF-DDF において高効率に圧縮されていることがわかる。

3.4 チャープパルス増幅による高ピークパワー化

超短光パルスをテラヘルツ波発生に用いる場合、kW レベルの高いピークパワーが必要とされる。しかし、非線形ファイバーを用いたパルス圧縮ではパルスの圧縮条件による制限から、得られるピークパワーは100 W 以下となる。そこで、高ピークパワーの超短光パルスを得るため、チャープパルス増幅法 (chirped pulse amplification: CPA) による増幅を行った²⁹⁻³¹⁾。

図5に CPA を組み合わせた高ピークパワー超短パルス光源の構成を示す。適度な平均パワーで高ピークパワーパルスを得るため、パルスピッカーを用いて繰り返し周波数の分周を行った。パルスピッカーはマッハ・ツェンダー型強度変調器から成り、MZ-FCG を駆動する RF 信号に同期した 30 ps の電気ゲートパルスにより駆動される。パルスピッカーをチャープ補償用 SMF の後に配置し、パルスピッキング後に DF-DDF によるパルス圧縮を行った。分周率は 1/32 とした。発生された超短光パルスは、20 m の分散補償ファイバー (dispersion compensation fiber: DCF) によりプリチャープが与えられ、10 ps 程度のパルス幅に伸長される。その後 Er 添加ファイバー増幅器 (erbium-doped fiber amplifier: EDFA) により増幅され、可変分散補償器 (variable dispersion compensator: VDC) を用いて入力のパルス幅程度まで圧縮した。図6に CPA の入力および出力パルスの自己相関波形を示す。DF-DDF の出力パルス幅は 220 fs であり、CPA による増幅および VDC による圧縮後、280 fs の超短光パルスが得られた。平均パワーから推定されたピークパワーは 3.5 kW であった。これにより、本光源によるテラヘルツ波発生が可能なレベルのピークパワーが得られた。

4. MZ-FCG 超短パルス光源のテラヘルツ計測応用

近年、テラヘルツコムを用いた分光計測が注目を集めている^{11, 12, 32)}。図7 (a) にテラヘルツコムを用いたヘテロ

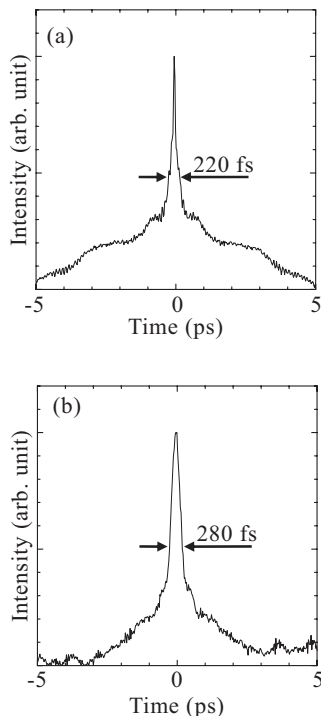


図6 (a) CPA 入力前のパルス波形, および (b) VDC 出力のパルス波形.

ダイナミクス計測システムの基本構成を示す. 光伝導アンテナ (photoconductive antenna: PCA) を繰り返し周波数 f_{ML} の超短光パルス列で励起した場合, PCA 内に光キャリアの周波数コム (テラヘルツコム) が生成される (図7 (b)). テラヘルツコムの周波数間隔はパルス列の繰り返し周波数に一致し, f_{ML} となる. そこへテラヘルツ波が照射されると, 両者の相互作用によるビート信号が生じる (図7 (c)). このビート周波数 Δf を測定することにより, テラヘルツ波の周波数を精密に計測することができる. ただし, テラヘルツコムのモード次数 n を判定するため, f_{ML} を微小変化させる必要がある¹¹⁾. この手法における周波数精度は, 超短光パルスの繰り返し周波数の精度 (すなわち光コムのモード間隔の精度) により決まる. MZ-FCG により発生される光コムのモード間隔の精度は MZM を駆動する RF 信号の周波数精度で決まり, 繰り返し周波数は RF 信号の周波数を変えることで変化させることができる. したがって, MZ-FCG 超短パルス光源を用いた場合, 複雑な制御をすることなく高精度の周波数計測が可能となる.

本稿では, MZ-FCG, DF-DDF および CPA を用いた高ピークパワー超短光パルス光源について述べた. 本光源は, GHz オーダーの高い繰り返し周波数をもつパルス列の発生が可能であり, さらに高安定, 中心波長および繰り返し周波数可変などの特徴をもつ. 本光源はテラヘルツ計

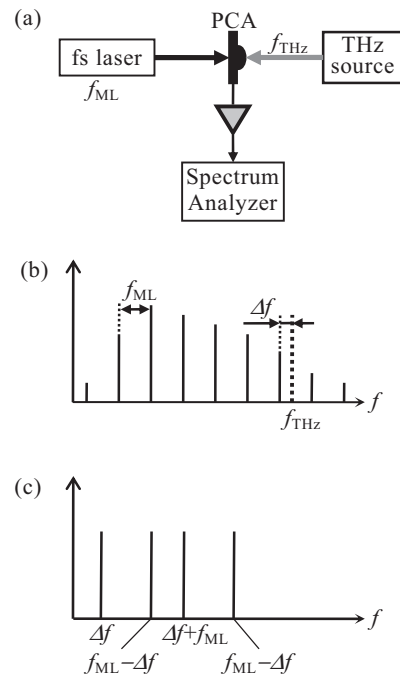


図7 (a) テラヘルツコムを用いたヘテロダイン計測システムの基本構成. (b) テラヘルツ領域におけるスペクトル. (c) ビート信号のスペクトル.

測に用いた場合, 複雑な制御をすることなく精密な周波数計測ができるなどのメリットがある.

本研究の一部は, (独) 情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「近接テラヘルツセンサシステムのための超短パルス光源の研究開発」の支援を受け行われたものである. 本委託研究において光源開発に携わられた住友大阪セメント株式会社および株式会社オプトハブの関係諸氏に深く感謝いたします.

文 献

- 1) M. Tonouchi: "Cutting-edge terahertz technology," *Nature Photon.*, **1** (2007) 97-105.
- 2) S. Arahira, S. Oshiba, Y. Matsui, T. Kunii and Y. Ogawa: "Terahertz-rate optical pulse generation from a passively mode-locked semiconductor laser diode," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 834-836.
- 3) T. Hoshida, H. F. Liu, M. R. H. Daza, M. Tsuchiya, T. Kamiya and Y. Ogawa: "Generation of 33 GHz stable pulse trains by subharmonic electrical modulation of a monolithic passively mode-locked semiconductor laser," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 572-573.
- 4) M. Nakazawa, E. Yoshida and K. Tamura: "Ideal phase-locked-loop (PLL) operation of a 10GHz erbium-doped fibre laser using regenerative modelocking as an optical voltage controlled oscillator," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1318-1320.
- 5) K. Fukunaga and M. Piccolo: "Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials," *Appl. Phys. A*, **100** (2010) 591-597.
- 6) K. L. Yeh, M. C. Hoffmann, J. Hebling and K. A. Nelson: "Generation of 10 μ J ultrashort terahertz pulses by optical

- rectification,” *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 171121.
- 7) E. Matsubara, M. Nagai and M. Ashida: “Generation and detection of ultrabroadband coherent infrared pulse with 200 THz bandwidth,” *37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2012)*, Mon-A-1-3 (2012).
 - 8) I. Katayama, R. Akai, M. Bito, H. Shimosato, K. Miyamoto, H. Ito and M. Ashida: “Ultrabroadband terahertz generation using 4-N, N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate single crystals,” *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 021105.
 - 9) 塩田和教, 小野 茂, 入澤昭好, 今村元規: “LiNbO₃ 導波路を用いたチェレンコフ位相整合型テラヘルツ光源開発とその応用”, 電子情報通信学会技術研究報告, **112** (2012) 45-50.
 - 10) J. F. Federici, D. Gary, R. Barat and Z. H. Michalopoulos: “T-rays vs. terrorists,” *IEEE Spectrum* (July, 2007) 47.
 - 11) T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma and T. Araki: “Terahertz frequency metrology based on frequency comb,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17** (2011) 191-201.
 - 12) 安井武史, 謝 宜達, 弥永祐樹, 坂口良幸, 横山修子, 稲場肇, 美濃島薫, 荒木 勉: “ギャップレスなテラヘルツ周波数コムの生成と低圧ガス分光への応用”, 光学, **41** (2012) 485-489.
 - 13) S. Barbieri, M. Ravarò, P. Gellie, G. Santarelli, C. Manquest, C. Sirtori, S. P. Khanna, E. H. Linfield and A. G. Davies: “Coherent sampling of active mode-locked terahertz quantum cascade lasers and frequency synthesis,” *Nat. Photonics*, **5** (2011) 306-313.
 - 14) Y. Irimajiri, A. Kawakami, I. Morohashi, N. Sekine, S. Ochiai, S. Tanaka, I. Hosako, and M. Yasui: “Development of a low noise heterodyne receiver at 3THz,” *37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2012)*, Mon-Pos-18 (2012).
 - 15) S. Nagano, H. Ito, M. Kumagai, M. Kajita and Y. Hanado: “Absolute THz frequency measurements with fractional frequency uncertainty at the 10⁻¹⁶ toward establishment of THz frequency standard,” *International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012)*, Pos1.42 (2012).
 - 16) D. C. Heinecke, P. Storz and T. Decorsy: “THz waveform generation with a 10 GHz repetition rate frequency comb,” *International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2013)*, W5B-5 (2013).
 - 17) D.-S. Kim, M. Arisawa, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Femtosecond optical pulse generation using quasi-velocity-matched electrooptic phase modulator,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2** (1996) 493-499.
 - 18) 山本貴司, 小向哲郎, 川西悟基: “位相変調器とチャープファイバグレーティングを用いたパルス光源”, 電子情報通信学会技術研究報告, **105** (2006) 23-27.
 - 19) M. Fujiwara, M. Teshima, J. Kani, H. Suzuki, N. Takachio and K. Iwatsuki: “Optical carrier supply module using flattened optical multicarrier generation based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation,” *J. Lightwave Technol.*, **21** (2003) 2705-2714.
 - 20) 西川 正: “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”, 光学, **41** (2012) 479-484.
 - 21) A. Ishizawa, T. Nishikawa, A. Mizutori, H. Takara, S. Aozasa, A. Mori, H. Nakano, A. Takada and M. Koga: “New approach to achieving a carrier-envelope phase-locked frequency comb with 25-GHz mode spacing,” *The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2010)*, CWJ4 (2010).
 - 22) T. Sakamoto, T. Kawanishi, M. Tsuchiya and M. Izutsu: “Picosecond pulse generation with a single-stage standard Mach-Zehnder modulator employed,” *32nd European Conference on Optical Communication (ECOC 2006)*, WE4.6.2 (2006).
 - 23) T. Sakamoto, T. Kawanishi and M. Tsuchiya: “10-GHz, 2.4-ps pulse generation using single-stage dual-drive Mach-Zehnder modulator,” *Opt. Lett.*, **33** (2008) 890-892.
 - 24) I. Morohashi, T. Sakamoto, H. Sotobayashi, T. Kawanishi, I. Hosako and M. Tsuchiya: “Widely repetition-tunable 200 fs pulse source using a Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber,” *Opt. Lett.*, **33** (2008) 1192-1194.
 - 25) T. Sakamoto, T. Kawanishi and M. Izutsu: “Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator,” *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1515-1517.
 - 26) K. R. Tamura and M. Nakazawa: “54-fs, 10GHz soliton generation from a polarization-maintaining dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber pulse compressor,” *Opt. Lett.*, **26** (2001) 762-764.
 - 27) A. V. Andrianov, S. V. Muraviev, A. V. Kim and A. A. Sysoliatin: “DDF-based all-fiber optical source of femtosecond pulses smoothly tuned in the telecommunication range,” *Laser Phys.*, **17** (2007) 1296-1032.
 - 28) T. Inoue, J. Hiroishi, T. Yagi and Y. Mimura: “Generation of in-phase pulse train from optical beat signal,” *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1596-1598.
 - 29) J. W. Nicholson, A. D. Yablon, P. S. Feder and M. F. Yan: “High power, single mode, all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation,” *Opt. Exp.*, **12** (2004) 3025-3034.
 - 30) J. Takayanagi, N. Nishizawa, H. Nagai, M. Yoshida and T. Goto: “Generation of high power femtosecond pulse and octave-spanning ultrabroad super continuum using all-fiber system,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (2005) 37-39.
 - 31) G. R. Lin, Y. T. Lin and C. K. Lee: “Simultaneous pulse amplification and compression in all-fiber-integrated pre-chirped large-mode-area Er-doped fiber amplifier,” *Opt. Exp.*, **15** (2007) 2993-2999.
 - 32) S. Nagano, H. Ito, M. Kumagai, M. Kajita and Y. Hanado: “Microwave synthesis from a continuous-wave terahertz oscillator using a photocarrier terahertz frequency comb,” *Opt. Lett.*, **38** (2013) 2137-2139.

(2012年5月23日受理)