

4-2 高繰り返し TDS システム

4-2 High-Repetition TDS System

諸橋 功 坂本高秀 齋藤伸吾 外林秀之 川西哲也 関根徳彦
 寶迫 巖 土屋昌弘

MOROHASHI Isao, SAKAMOTO Takahide, SAITO Shingo, SOTOBAYASHI Hideyuki,
 KAWANISHI Tetsuya, SEKINE Norihiko, HOSAKO Iwao, and TSUCHIYA Masahiro

要旨

テラヘルツ時間分解分光計測用の超短パルス光源として、マッハツェンダ光変調器型平坦光コム発生器 (MZ-FCG) 及び非線形パルス圧縮技術を用いて超短光パルス発生を行った。本方法による超短光パルス発生システムは、シンプルな構成で安定した光パルス発生が可能であり、繰り返し周波数及びパルス幅の可変性を有する。シングルモード半導体レーザからの連続光を RF 正弦波信号で駆動させた MZ-FCG に入射して光コム信号を発生させる。その光コム信号をシングルモードファイバでチャープ補償し、分散フラット・分散減少ファイバで断熱ソリトン圧縮することにより、200 fs 級の超短光パルス列の発生に成功した。

We have demonstrated ultrafast optical pulse generation using a Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator (MZ-FCG) and an adiabatic soliton compression technique for terahertz-time-domain-spectroscopy. Our pulse generation technique is very simple configuration and has tunability in the repetition rate and the pulsewidth. The MZ-FCG was driven by two radio-frequency sinusoidal signals. Continuous wave lights led to the MZ-FCG were converted to ultraflat comb signals. The comb signals were formed into picosecond pulse trains by compensating the frequency chirp, and the picosecond pulses were compressed into femtosecond pulses by a dispersion flattened-dispersion decreasing fiber. Pulse trains with 200 fs-width were successfully generated.

【キーワード】

テラヘルツ波, 時間分解分光, 光周波数コム, マッハツェンダ変調器, 分散フラット・分散減少ファイバ
 Terahertz wave, Time-domain spectroscopy, Optical frequency comb, Mach-Zehnder modulator,
 Dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber

1 まえがき

テラヘルツ帯周波数の電磁波は、固体中の光学フォノン、プラズマ周波数、分子間相互作用や固体中の振動など興味深い物性が多数存在することから、物性研究には極めて重要な周波数領域である。また、癌の診断や薬品の検査等の医療応用、あるいは爆薬検査等のセキュリティ関係等、様々な分野で応用が期待されており、注目されている研究分野の一つである。

テラヘルツ波パルスは、超短光パルスを用いて発生させることができる。低温成長 GaAs などの

短寿命な光キャリア特性を持つ半導体基板の表面にアンテナ構造の電極を形成し(光伝導アンテナ)、バイアスを印加した状態で超短光パルスを照射すると、アンテナに瞬時電流が流れ、モノサイクルのテラヘルツ波パルスが放射される。検出においても光伝導アンテナ及び超短光パルスが用いられる。超短光パルスとテラヘルツ波パルスが同時に光伝導アンテナに入射した場合、超短光パルスにより生成されたキャリアがテラヘルツ波の電場によりドリフトしてアンテナを流れる電流としてテラヘルツ波の振幅が検出される。

THz-TDS において、フェムト秒パルス光源は

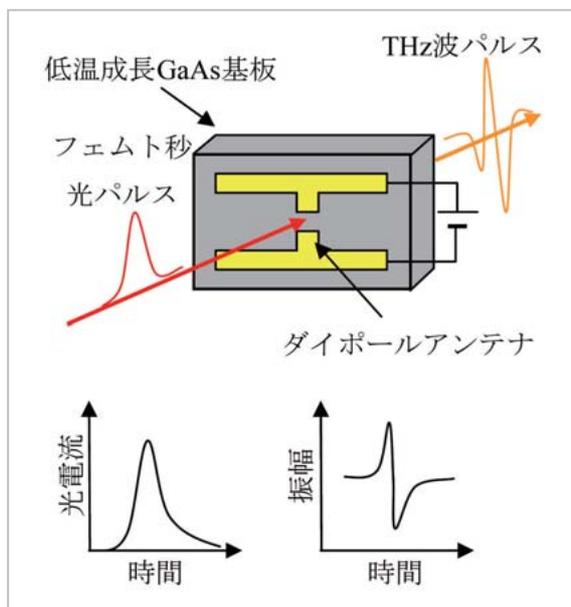


図1 光伝導アンテナからのテラヘルツ放射

測定帯域等の性能を決める重要な要素であり、またコスト及びシステムサイズの面においても大きなウェイトを占める。光伝導スイッチのフェムト秒光パルス励起によるテラヘルツ波の発生は、Auston らにより 1984 年に提案・実証された[1]。当初は衝突モード同期色素レーザーが用いられていたが、色素レーザーは大型で構造が複雑な上に安定して動作しないため、信頼性が低かった。また、様々な色素と溶媒を組み合わせるため、安全性の問題もあった。その後、操作性のよいチタン・サファイアモード同期レーザーが開発されたことにより、テラヘルツ波の研究が大きく進展した。チタン・サファイアレーザーは 700~1000 nm 付近までの波長可変性を持ち、励起レーザーも含めてすべて固体にすることで、ビーム品質のよい安定なフェムト秒光パルスが得られる。フェムト秒光パルスの出力増大及びテラヘルツ波発生素子の改良に伴い、テラヘルツ波の高出力化がなされ[2][3]、またフェムト秒光パルスの時間幅を狭めることにより、発生するテラヘルツ波の帯域の拡大がなされた[4]。しかしながら、チタン・サファイアレーザーは高価でまだサイズも大きく、取扱いが難しい。チタン・サファイアモード同期レーザーに代わる超短パルス光源としてファイバレーザーがあり、それらを用いたテラヘルツ波発生の実験が行われている[5][6]。また、それに合わせて通信波長帯でテラヘルツ波の発生・検出が可能な光伝導スイッチの

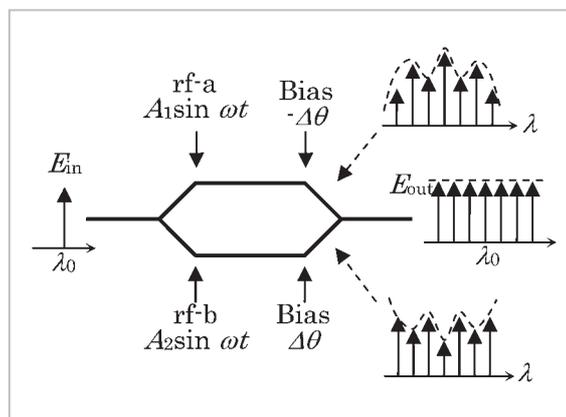


図2 マッハツェンダ型光変調器を用いた光コム発生原理

開発も進められている[7][8]。ファイバレーザを用いた THz-TDS システムは既に市販されており、テラヘルツ波を専門としない研究者が利用しやすいテラヘルツ分光装置として利用されている。しかし、ファイバレーザはチタン・サファイアモード同期レーザーに比べて小型ではあるが、低光出力で波長可変性などの自由度も低く、コスト面にもまだ難点がある。繰返し周波数はキャビティ長により決まるために微調できる程度であり、繰返し周波数を変えるためには精密な制御が必要である。また、超短光パルスが発生するための非線形パルス圧縮方法として、ステップ形状分散ファイバやコム形状分散ファイバによるパルス発生が報告されているが[9]~[11]、これらはパルス整形及び圧縮をするのに特別に設計された光ファイバが必要となる。

近年、超平坦光周波数コム発生法を用いることにより、簡単な構成でパルス発生が可能であることが報告された[12]~[14]。この方法では大振幅の高周波信号で駆動されたマッハツェンダ型光変調器(MZM)により超平坦光コム信号を発生させ、その光コム信号のチャープ補償をすることにより光パルスが発生される。光コム信号内のチャープは線形であるため、通常のシングルモードファイバ(SMF)により簡単にチャープ補償が可能である。光コム信号の帯域幅及びモード間隔は変調器に入力する高周波信号の周波数とパワーにより容易に制御できることから、発生する光パルスのパルス幅と繰返し周波数を容易に制御することができる。さらに、発生した光パルスは非線形圧縮法により更なる短パルス化が可能である。

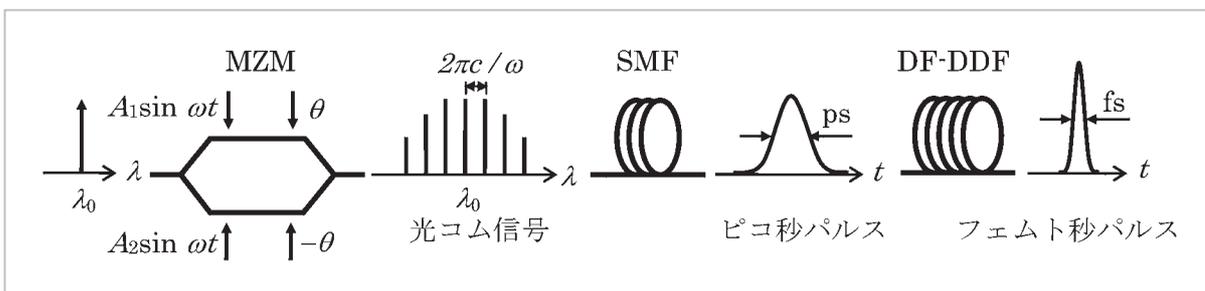


図3 超短光パルス発生の流れ

本論文では、マッハツェンダ光変調器型平坦光コム発生器 (Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator : MZ-FCG) 及びソリトン圧縮法を用いたフェムト秒光パルス発生について主に報告する。

2 光周波数コム発生器を用いた超短光パルス発生

図2にMZ-FCGの概念図を示す。MZ-FCGは、連続波(CW)光源、MZM及びその駆動高周波回路から構成される。MZMは両アームに独立の変調電極を有する dual-drive 型変調器であり、両アームはそれぞれ若干振幅が異なる大振幅正弦波信号により駆動される。MZ-FCGに入射されたCW光は両アームで変調を受け、基本成分の両側に側波帯が生成される。側波帯の周波数間隔は高周波変調周波数に一致し、その数は高周波信号のパワー(振幅)に依存する。両アームで生成された変調信号は、DCバイアスで適当な位相差を与えられた後、合波されて出力される。結果としてMZ-FCGから帯域が変調周波数とパワーにより決まる光コム信号が出力される。MZ-FCGにより発生される光コム信号の各成分の振幅はベッセル関数により決まるため、一般には平坦なスペクトル形状とはならない。しかし、

$$\Delta A \pm \Delta \theta = \pi/2 \quad (1)$$

の条件が満たされる場合、合波後の光コム信号は平坦化される(光コム平坦化条件)。ここで、 ΔA は二つの高周波信号の振幅の差であり、 $\Delta \theta$ は両アームの変調信号光の位相差である。この光コム平坦化条件において、各コム成分の位相はモード次数に関して自乗特性を持つため、SMFの分散

の逆の特性となり、補償が可能となる。

図3にMZ-FCGを用いた超短光パルス発生の流れを示す。本研究における超短光パルス発生システムは、(1) LiNbO₃結晶MZMを用いたMZ-FCG、(2)発生した光コム信号のチャープ補償を行うためのSMF及び(3)整形された光パルスを圧縮するための分散フラット・分散減少ファイバ(DF-DDF)により構成される。MZMを正弦波RF信号($\sin \omega t$)により式(1)を満足するように駆動すると、入射された λ_0 連続波光は $\Delta \lambda = 2\pi/\omega$ の間隔で各成分が並ぶ光コム信号となる。発生した光コム信号をSMFに入射すると、光コム信号のチャープが補償され、バンド幅に対応した時間幅を持つ光パルス(ピコ秒パルス)が生成される。その光パルスをDF-DDFに入射すると、断熱ソリトン圧縮によりフェムト秒オーダーまでパルス幅が圧縮されて出力される。

図4にフェムト秒光パルス発生の実験構成を示す。MZMを駆動するためのRF信号(周波数 f 、出力16dBm)をシンセサイザにより生成し、二つに分岐した(rf-a、rf-bとする)。rf-aは約29dBmに増幅され、MZMの一方のアームに入力された。rf-bは、機械的遅延器によりrf-aと同相となるよ

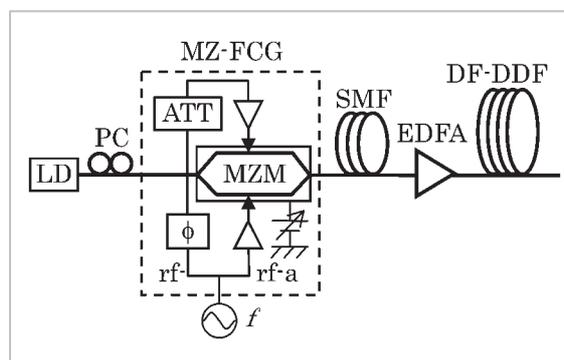


図4 フェムト秒光パルス発生の実験構成

うに位相調整され、減衰器により rf-a との振幅差を与えられ、約 28 dBm に増幅されて MZM のもう一方のアームに入力された。本測定においては、rf-b の減衰率を固定し、式 (1) の光コム平坦化条件を満足するように DC バイアスを調整した。

光コム平坦化条件で駆動された MZ-FCG に単一モード半導体レーザーからの CW 光を入射して光コム信号を発生させ、SMF により周波数チャープ補償することにより、ピコ秒パルスが発生させた。光コム信号のチャープ量は変調信号の周波数により変化するため、最適なパルス幅が得られる SMF の長さは変調信号により変化する。生成されたピコ秒パルスはエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)により約 20 dBm に増幅され、DF-DDF により断熱ソリトン圧縮された。DF-DDF は、入射側分散値 9.1 ps/nm/km、出力側分散値 0.53 ps/nm/km、1550 nm における分散スロープ 0.03 ps/nm/km/nm、長さ 2 km のものを用いた。発生した光パルス時間波形及びスペクトル形状を 2 光子吸収型オートコリレータ及び光ス

ペクトラムアナライザを用いて観測した。

図 5 に SMF 出力端における種パルス光の自己相関波形及びスペクトルを示す。MZM に入力した変調信号の周波数は 10 GHz とした。図 3 (b) に示すように、MZ-FCG の出力において平坦な光コム信号が得られた。光コム信号の間隔は MZM の変調周波数にほぼ一致し、強度が 5 dB の範囲内にあるモード数は 18 であった。この光コム信号を長さ 1.5 km の SMF (総分散値: 22.5 ps/nm) に入射したところ、ピコ秒パルスが得られ (図 2 (a))、 sech^2 波形を仮定した場合のパルス幅 (半値全幅) は約 3.52 ps であった。ペDESTAL 成分は小さく、全体の 19.6% であった。

図 6 に、図 5 で得られたピコ秒パルスを種光パルスとした場合のソリトン圧縮後の光パルスの自己相関波形及びスペクトルを示す。パルス圧縮により、20 dB 帯域で 10 nm 以上の広い波長帯域が得られた。時間波形においては、 sech^2 波形を仮定した場合、約 203.0 fs (半値全幅) の光パルスが得られた。ペDESTAL 成分は全体の 57.2% で

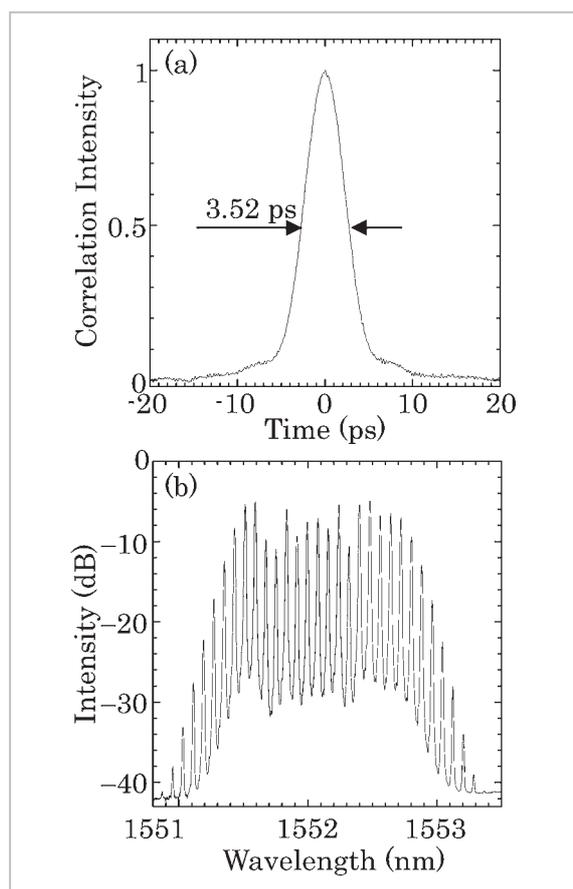


図5 SMF 出力パルスの時間波形及びスペクトル

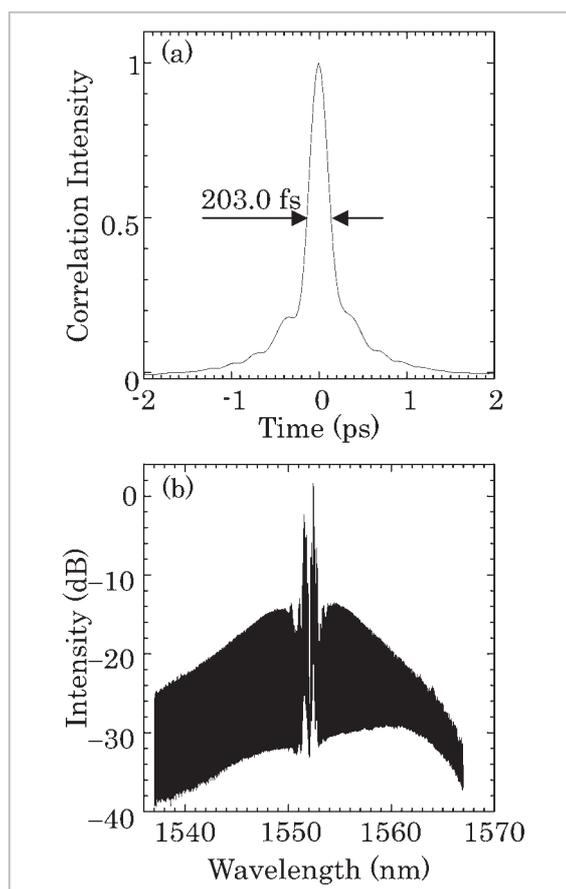


図6 ソリトン圧縮後の出力パルスの時間波形及びスペクトル

あった。

図7にピコ秒種光パルス及び圧縮されたフェムト秒光パルスのパルス幅の変調周波数依存性を示す。ここで、MZMに入力した変調信号の強度は一定にした。種光パルスにおいては、5から17 GHzにおいてピコ秒パルスが得られ、そのパルス幅は周波数の増加に伴い急激に減少した。これは、周波数の増加に伴って光コム信号のモード間隔が増加したことによるスペクトル帯域幅の増加によるものである。変調周波数17 GHzにおいて得られたパルス幅は2.15 psであった。このような広帯域でピコ秒パルスが得られたのは、低駆動電圧MZMを用いたことによる。本測定においては、変調周波数の可変幅はRF増幅器の帯域幅(本測定に用いた高周波増幅器の帯域幅は6.0-18 GHz)により制限されている。したがって、高周波増幅器を代えることにより、他の周波数帯でもパルス光の発生は可能である。一方、圧縮後の光パルスにおいては、変調周波数にかかわらず、

約200 fsのパルス幅が得られた。変調周波数を5 GHzから17 GHzへと増加させたとき、パルスの圧縮率は35から8へと変化した。

図8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。ただし、サンプリングオシロスコープの時間分解能が1.1 psであるため、観測されたフェムト秒パルスのパルス幅は、実際のパルス幅よりも広がっている。本方式により得られる光パルスは均一な形状であり、20 dB以上の良好な消光比が得られた。この結果から、ほぼすべてのパルスエネルギーがSMF及びDF-DDFにおいて圧縮されていることを示している。また、ピークパワーの揺らぎは非常に小さく2.53%であった。これにより、MZ-FCGを用いた光パルス発生法は、安定したピコ秒及びフェムト秒パルスが発生できることが明らかになった。

3 MZ-FCG用いた THz-TDSシステム

MZ-FCGを用いた超短光パルス発生法は、共振器構造がなく、すべて光ファイバ内で行われるため、機械的振動に強い安定した超短光パルスを発生でき、また既存のファイバレーザでは困難であった波長可変性や繰り返し周波数可変性を持つ。したがって、安定した自由度の高いTHz-TDSシステムの構築ができることが期待される。

図9にMZ-FCGを用いたTHz-TDSシステムの構成を示す。MZ-FCGを周波数 f のRF信号で駆動すると、繰り返し周波数 f のフェムト秒光パルス列が発生される。その光パルスをファイバコリメータにより自由空間に放射し、ビームスプリッタにより2分する。一方のビーム(励起光)をエミッタ用光伝導スイッチに照射しテラヘルツ波を

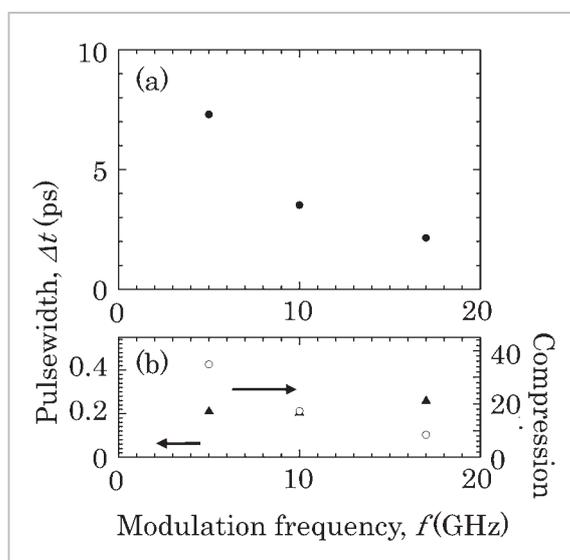


図7 出力パルスのパルス幅のMZM駆動周波数依存性

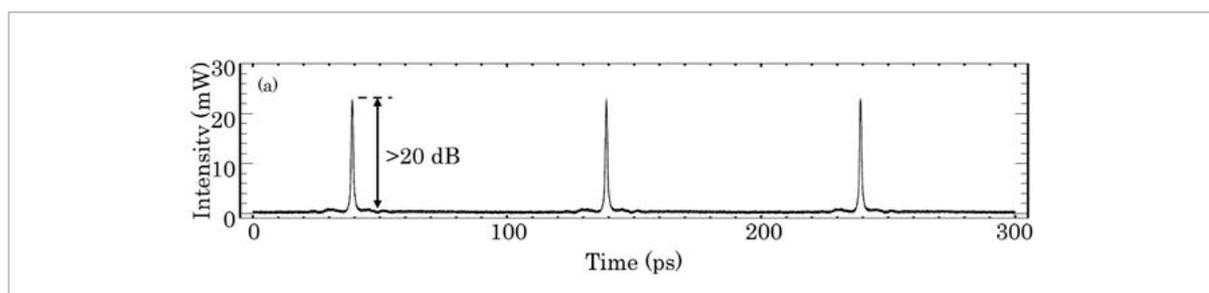


図8 フェムト秒パルス列の光サンプリング波形

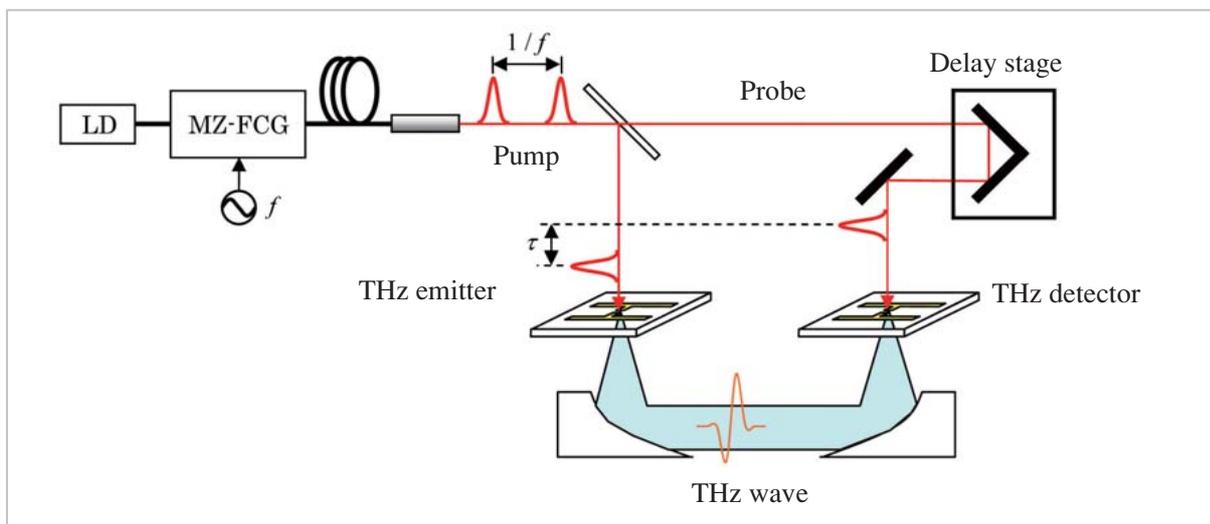


図9 MZ-FCGを用いたTHz-TDSシステムの構成

放射させる。放射されたテラヘルツ波を放物面鏡対で集光し検出用光伝導アンテナに入射する。もう一方のビーム(プローブ光)はステージにより、ポンプ光に対して τ だけ遅延時間が与えられ、検出用光伝導アンテナに照射する。検出用光伝導アンテナの電流を遅延時間に対してプロットすることにより、テラヘルツ波の電場波形が得られる。

MZ-FCGにより発生される超短光パルス列の繰返し周波数は、駆動するRF信号の周波数により変えることができ、また波長はMZ-FCGへ入射するCW光の波長により変えることができる。したがって、測定対象やテラヘルツ波のエミッタ及び検出デバイスの特性に合わせて波長及び繰返し周波数を変えることができる、自由度の高いシステムを構築できる。

4 むすび

マッハツェンダ光変調器型平坦光コム発生器及びソリトン圧縮技術を用いてフェムト秒光パルス発生を行った。光コム発生器により発生させた光コム信号の周波数チャープ補償を行うことにより、5から17GHzの変調周波数において2~7psの光パルスが得られた。発生したピコ秒パルスをDF-DDFを用いてソリトン圧縮することにより約200fsの光パルスが得られた。本方法によるフェムト秒パルス発生は、非常にシンプルな構成であり、パルス幅及び繰返し周波数の広帯域可変性を持つ。この超短パルス光源をTHz-TDSに応用することにより、安定した自由度の高いTHz-TDSシステムの構築ができることが期待される。

参考文献

- 1 D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, Appl. Phys. Lett., Vol.45, pp.274-286, 1984.
- 2 A. Dreyhaupt, S. Winnerl, T. Dekorsy, and M. Helm, Appl. Phys. Lett., Vol.86, p.121114, 2005.
- 3 G. H. Welsh, N. T. Hunt, and K. Wynne, Phys. Rev. Lett., Vol.98, p.026803, 2007.
- 4 H. Shimosato, M. Ashida, T. Itoh, S. Saito, and K. Sakai, Ultrafast Optics V, Springer, Berlin, pp.317-323, 2007.
- 5 H. Ohtake, Y. Suzuki, N. Sarukura, S. Ono, T. Tsukamoto, A. Nakanishi, S. Nishizawa, M. L. Stock, M. Yoshida, and H. Endert, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.40, pp.L1223-L1225, 2001.
- 6 M. Nagai, K. Tanaka, H. Ohtake, T. Bessho, T. Sugiura, T. Hirosumi, and M. Yoshida, Appl. Phys. Lett., Vol.85, pp.3974-3976, 2004.
- 7 M. Suzuki, and M. Tonouchi, Appl. Phys. Lett., Vol.86, p.163504, 2005.

- 8 A. Takazato, M. Kamakura, T. Matsui, J. Kitagawa, and Y. Kadoya, Appl. Phys. Lett., Vol.90, p.101119, 2007.
- 9 M. Nakazawa, E. Yoshida and K. Tamura, Electron. Lett. Vol.33, pp.1318-1320, 1997.
- 10 K. Igarashi, M. Kishi and M. Tsuchiya, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40, pp.6426-6429, 2001.
- 11 T. Inoue, J. Hiroishi, T. Yagi, and Y. Mimura, Opt. Lett. Vol.32, pp.1596-1598, 2007.
- 12 T. Sakamoto, T. Kawanishi, M. Tsuchiya, and M. Izutsu, in 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006), paper WE4.6.2, 2006.
- 13 R. P. Scott, N. K. Fontaine, J. P. Heritage, B. H. Kolner and S. J. B. Yoo, in Optical Fiber Communication Conference (OFC'07), paper OWJ3, 2007.
- 14 T. Sakamoto, T. Kawanishi, and M. Izutsu, Opt. Lett. Vol.32, pp.1515-1517, 2007.



諸橋 功

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ専攻研究員
博士(工学)
光エレクトロニクス



坂本高秀

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ研究員
博士(工学)
高速光変調技術の開発、光通信



齋藤伸吾

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波ICTグループ主任研究員
博士(理学)
テラヘルツ波による分光



外林秀之

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員
博士(工学)
超高速光信号処理フォトニクス、ネットワーク、光デバイス



川西哲也

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ研究マネージャー 博士(工学)
高速光変調技術の開発



関根徳彦

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員
博士(工学)
半導体ナノ構造のテラヘルツ帯物性とそのデバイス応用



賢迫 巖

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ研究マネージャー 博士(理学)
テラヘルツ帯半導体素子とその計測応用



土屋昌弘

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループリーダー
博士(工学)
フォトニクス、エレクトロニクス