

汎用 THz-TDS のための超短パルス光源の研究開発

Development of ultra short pulse laser source for a general purpose terahertz time domain spectroscopy

住友大阪セメント株式会社¹ ◦原 徳隆、及川 哲、細川洋一、牟禮勝仁
株式会社オプトハブ² 及川正尋、原 敬一、青木周生

¹Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd.

◦Tokutaka Hara, Satoshi Oikawa, Youichi Hosokawa, Masahito Mure

²Optohub Co., Ltd.

Masahiro Oikawa, keiichi Hara, Shusei Aoki

要旨

平成 21 年度から 23 年度において実施した独立法人情報通信研究機構 (National Institute of Communication and Information Technology, NICT) による委託研究「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」の成果について報告する。

本研究開発では、オンサイトでテラヘルツ分光計測を行うための、小型かつ軽量の汎用テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) のための超短パルス光源を開発した。独自に開発した超低電圧 LiNbO₃(LN)光変調器(半波長電圧 2.2V、10GHz 動作時)と Er ドープファイバ増幅器をはじめとする小型かつ信頼性の高い光通信用デバイスを用いることで、装置重量 10kg 以下を実現した。発生される超短パルス光はパルス幅 200fs 以下、ピーク出力 1kW 以上であり、高速分光に適した 1GHz 以上の繰り返し周波数で動作可能である。また、本光源を用いて光伝導アンテナを励起することでテラヘルツ波の発生を確認し、テラヘルツ時間領域分光が実現可能であることを示した。

Abstract

We report the result of the commissioned research by National Institute of Communication and Information Technology(NICT), “Research and Development of ultra short pulse laser for terahertz wave sensor system” studied during 2010 to 2012.

A portable ultra-short-pulse laser that has small size and light weight has been developed for the terahertz on-site spectroscopy in this research and development. The light weight under 10kg in all of the equipment was realized using an LN optical modulator and an EDFA additional to other devices for opto-telecommunication. The pulse duration and peak power of the developed ultra-short pulse laser were under 200fs and over 1kW respectively, and the repetition ratio of the pulse train was over 1GHz suitable for high speed terahertz spectroscopy. The feasibility for terahertz time domain spectroscopy was shown by the generation of terahertz wave using photo conductive antennas pumped by the developed laser.

キーワード テラヘルツ波、超短パルス光、LN 光変調器、光周波数コム、分散補償、EDFA

Keyword Terahertz wave, Ultra-short pulse laser, LN optical modulator, Optical frequency comb, EDFA

1. 序言

近年、テラヘルツ分光分析技術の発展と共に、オンサイトでのテラヘルツ波利用について開発が行われている[1]。具体的には、建築物および構造体の非接触診断や、絵画等の文化財の検査等について検討が進められている。オンサイトでテラヘルツ分光分析を行う場合は、まずはテラヘルツセンサを励起するための超短パ

ルス光源の可搬化が必須となることに加えて、高速分光を行うために超短パルス光の高繰り返し化(>1GHz)が求められる。従来はテラヘルツセンサ励起用の光源として、チタンサファイアレーザーを代表とするフェムト秒レーザーが利用されてきたが、これらは空間光学系を用いるため装置自体が非常に大きく、重量もあり、屋外への移動や移動先での使用が困難であった。この問題を解決する方法として、Er ドープファイバや Yb ドープファイバによるファイバレーザーを用いてテラヘルツセンサを励起する手法が考案されているが、繰り返し周波数が~100MHz程度と低く、ワンショット測定が必要な2次元高速測定等に対しては十分であるとはいえない。従って今回の研究では、装置の小型化と超短パルス光の高繰り返し化を同時に実現するために、通信用LiNbO₃(LN)光変調器を用いた超短パルス光源を開発した。

LN 光変調器はその高速性のために、10GHz 以上の高繰り返しのパルス列を生成することが可能である。加えて光ファイバとの親和性もよく、通信用部品を用いて光学系を構成でき、装置の小型化及び軽量化が可能となる。また、テラヘルツセンサのユーティリティに柔軟性を持たせるためには、超短パルス光波形歪みの少ないゼロ分散ファイバ等でテラヘルツセンサに伝送することが望ましく、そのためには超短パルス光源の波長は1.55um 近傍の通信波長帯でなくてはならないが、この点においても LN 光変調器と光ファイバを含む通信用部品を用いることに利点がある。さらには、LN 光変調器を動作する高周波(Radio frequency, RF)信号の周波数を可変することで発生するパルス間隔を調整することができ、これにより機械遅延系のないテラヘルツ分光システムを構築することも可能となる。このように、LN 光変調器を用いた超短パルス光源は、テラヘルツ分光用光源として多くの利点を有している。

2. 超短パルス光源の開発

図1に開発した超短パルス光源のブロックダイアグラムを示す。超短パルス光源は、短パルス光発生部とパルス圧縮・増幅部に分けられ、~数 ps のパルス幅をもつ短パルス光をシード光としてシングルパスのパルス圧縮やパルス増幅を繰り返し、最終的に~200fs のパルス幅をもつ超短パルス光を発生させる。短パルス光発生部では坂本らによって考案された超平坦光周波数コム発生原理[2]に基づく高速繰り返し短パルス光源を開発した。高速繰り返し短パルス光源は10GHz~25GHzの周期で歪みの少ない短パルス光を発生することが可能であり、繰り返し周波数が可変であるため、機械的可動部のない遅延光学系をTHz-TDS内部に構築することが可能である。また、パルス圧縮部には、オールファイバでの光学系の構成が可能な非線形パルス圧縮器[3]を用いた。このパルス圧縮器を、独自に開発した低波長分散 EDFA と接続してチャープパルス増幅器[4]を構成して超短パルス光の高出力化[5]を実現した。

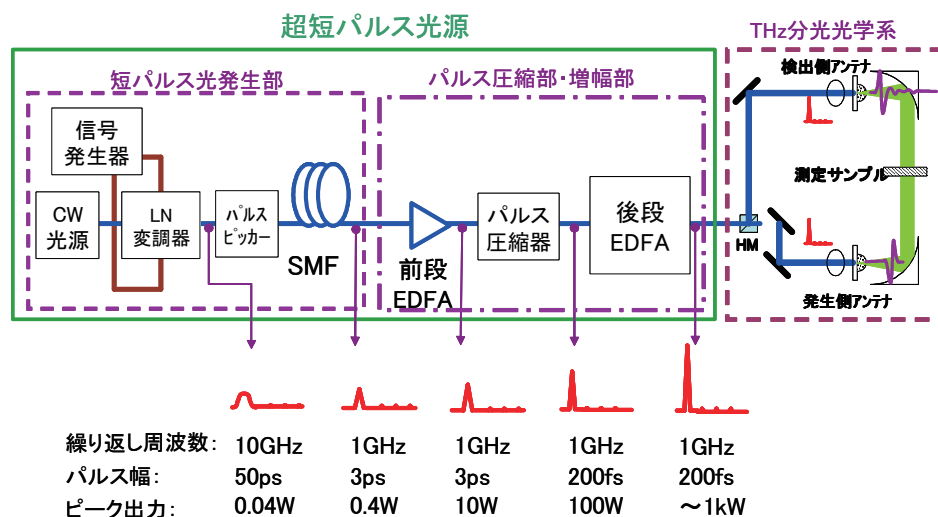


図1: 超短パルス光源とテラヘルツ分光光学系の構成

Fig.1: Schematic diagram of ultra-short-pulse laser and terahertz spectroscopy system

開発した超短パルス光源は、THz-TDS システムにおいてテラヘルツ波を発生・検出の検証を行い、その有効性を確認した。

2-1. 短パルス光発生部

a) 高速繰り返し短パルス光源

超平坦光周波数コムが発生原理を図2に示す。この原理は、1台のマッハツェンダ型 LN 変調器において、2本の作用導波路(アーム)をそれぞれ独立した位相変調器として利用することが特徴である。このとき、各アームにおける位相変調器としての変調度をそれぞれ A_1 、 A_2 とし、また DC バイアスを B_1 、 B_2 とすれば、変調度差 $\Delta A = A_1 - A_2$ とバイアス差 $\Delta \theta = B_1 - B_2$ の間に $\Delta A + \Delta \theta = \pi$ の関係があるときに、スペクトルが平坦な光周波数コムが得られる(平坦光コム条件)。特に、 $\Delta A = \Delta \theta = \pi/2$ のときに、光周波数コムの出力は最大となる。このようにして得られた光周波数コム信号は、時間軸上では正弦波状に繰り返す光強度分布とチャープを持つので、適当な長さの 1.3 μm 帯 SMF 等のファイバを接続し分散補償を行うことで、チャープが補償され、ピコ秒オーダーの短パルス光が得られる。

一方、短パルス光を発生させるためのキーデバイスとなる LN 変調器であるが、時間幅の狭い短パルス光を実現するためには、LN 変調器の駆動電圧を低減し、変調度を可能な限り深くする必要がある。後述するパルス圧縮によって 200fs 台の超短パルス光を得るためには、そのシード光となる短パルス光のパルス幅は 2ps 程度が望ましい。伝送シミュレーターを用いた計算によれば、変調周波数が 10GHz のときパルス幅 2ps 台を達成するためには変調度 5.5π が必要であり、LN 変調器の駆動電圧を 2.5V 以下に抑制する必要がある。またこのとき最適な SMF 長は 1km である。従って、この計算結果をもとに、専用の低駆動電圧 LN 変調器を開発した(図2)。LN 変調器は Z カットの2電極型であり、高変調度に対応するために外部終端型とした。駆動電圧は 10GHz において 2.2V(プッシュ・プル動作時であり)、25GHz 付近まで良好な周波数測定を示している。

上記の設計に基づき、高速短パルス光源を構築した。2 電極 LN 変調器の各電極での変調度を 5π 、 5.5π としたとき、光周波数コムの帯域は -10dB 点の間隔において約 320GHz(図3)であり、コムの深さは 29dB であった[6]。またスペクトル中央部の平坦性は 1dB 以下であった。一方チャープ補償により生成された短パルス光はパルス幅が 2.4ps(図2)であった。この値はフーリエ限界に近く、計算結果と一致する。

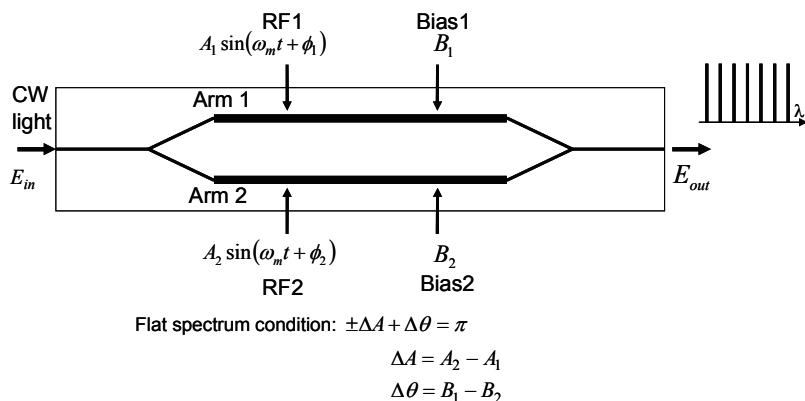


図2: 平坦光周波数コムの発生原理

Fig.2: Principle of ultra-flat optical frequency comb

b) パルスピッキング

短パルス光は繰り返し周波数が高い($\sim 10\text{GHz}$)ため、光増幅器による高ピーク出力化のためには LN 光変調器を用いたパルスピッキング(=パルス列の間引き)によって繰り返し周波数を下げる必要がある。従って、広帯域・高消光比 LN 変調器を開発し、さらには安定な短パルス光を生成するための制御回路を構築することで高品質のパルスピッキングを実現した。

40Gbps 対応の高速 LN 変調器により、10GHz 繰り返しの短パルス光を精度良くピックアップすることに成功した。また単独の LN 変調器構成で消光比 20dB を達成し、2 段タンデム構成では消光比 40dB を達成した。また、光源装置内では光周波数コム用変調器とパルスピックアップ用 LN 変調器を同期制御するために、64Bit パルスパターンジェネレータ(Pulse pattern generator: PPG)の構築し、安定したパルスピックアップを達成した。専用ソフトの開発により、パソコン上でパルスピックアップの形状を設定することが可能となり、任意のパルス列を簡易に発生できる。図6にパルスピックアップのようすを示す。



図3: 2電極型低駆動電圧 LN 変調器

Fig.3: Low-drive-voltage dual electrode type of LN optical modulator

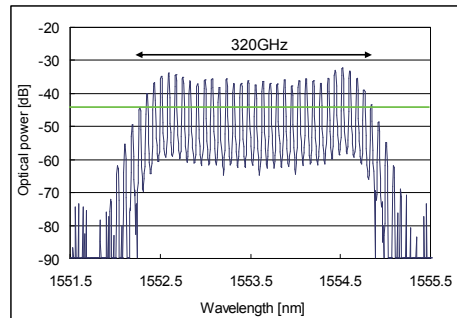


図4: 光周波数コムのスペクトル

Fig.4: Spectrum of optical frequency comb

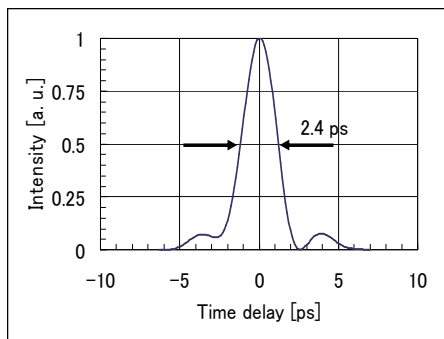


図5: 短パルス種光源におけるパルス波形

Fig.5: Pulse envelope of seeder short pulse

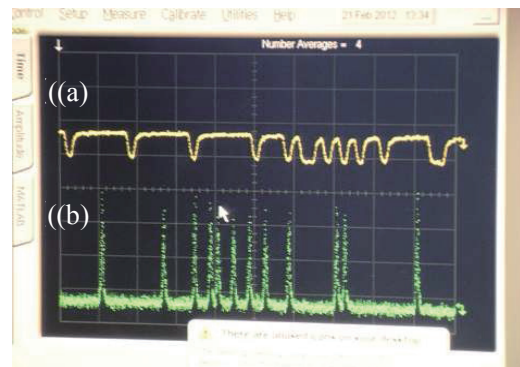


図6: パルスピックアップのようす

Fig.6: Waveform of the arbitrary pulse train

(a) : gate signal of pulse picker

(b) : optical pulse train

2-2. 非線形超短パルス圧縮と高ピーク出力化

a) 非線形パルス圧縮

超短パルス光へのパルス圧縮の方式いくつか存在するが、入手性が高く、オールファイバで構成される DDF(=Dispersion Decreased Fiber)方式[5]と CPF(=Comb liked Profile Fiber)方式[7]の2つに候補を絞り、両者について実験を行った。その結果、入射短パルス光の特性に合わせてパルス圧縮の特性を調整でき、超短パルス光のペDESTALを抑制し易い CPF 方式を採用した。

作製した CPF モジュールは SMF と高非線型ファイバを 6 段タンデムしており、短パルス光に交互に波長分散と非線形効果である自己位相変調を与えることで、擬似的にソリトン断熱圧縮を行う。発生した超短パルス光は時間幅 192fs、平均出力 17.9dBm(図8)であった。また、ピーク出力は 98.6W と推定された。また、パルス圧縮器での非線形効果の発現のためには 5~10W 程度のピーク出力が必要であるため、パルス圧縮機の前には 21dBm のプリゲイン用 EDFA(前段 EDFA)を設置した。

b)高ピーク出力化

超短パルス光を増幅するための高出力EDFA(後段EDFA)の平均光出力は、パルス圧縮・増幅の過程において必要なパルスのピーク出力より算出する。最終的な超短パルス光の幅と繰り返し周波数をそれぞれ 200fs、1.25GHz とすると後段 EDFA に求められる平均出力は 24dBm である。従って、後段 EDFA の平均光出力は、ファイバ中での高次の非線形分散ひずみによる損失等も考慮して 29dBm と設定し、内部の増幅光学系については、前者は励起 LD1段の前方励起のみによる構成とし、後者は LD1 段の前方励起と LD2 段(偏波合成型)の後方励起を併用する構成とした。

また、超短パルス光を波形歪みなく増幅するために、後段 EDFA ではゲインフラット化を行った。超短パルス光のスペクトル帯域は数十 nm にわたるため、EDFA のゲインについて波長依存性を抑制する必要があるが、シミュレーションの結果、波長帯域 20nm において分散量 $<0.1\text{ps/nm}$ が必要であるため、EDF で利得を飽和させてゲインフラットを実現した。

c) チャープパルス増幅のよる高出力化

パルス圧縮器と作製した後段 EDFA を用い、オールファイバによる CPA を実現した。後段 EDFA の前後には分散補償ファイバ(Dispersion compensated fiber: DCF)と SMF を接続し、パルス伸張と再圧縮を行った。DCF と SMF の長さ比調整によってパルス波形を最適化した結果、パルス幅 203fs、ピーク出力は 1.3kW を達成した(図8、9)。

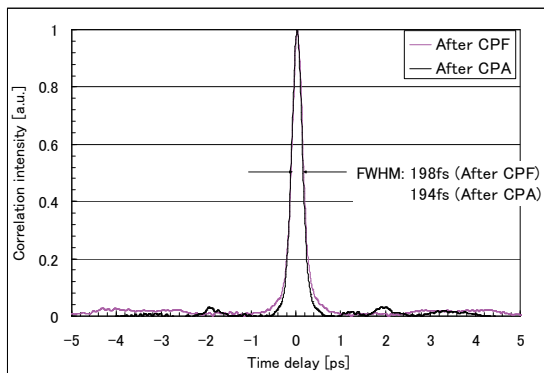


図8: CPA 前後での超短パルス光の時間波形の比較

Fig.8: Comparison of time trace of ultra short pulse train before CPA (black line) and the trace after CPA (red line)

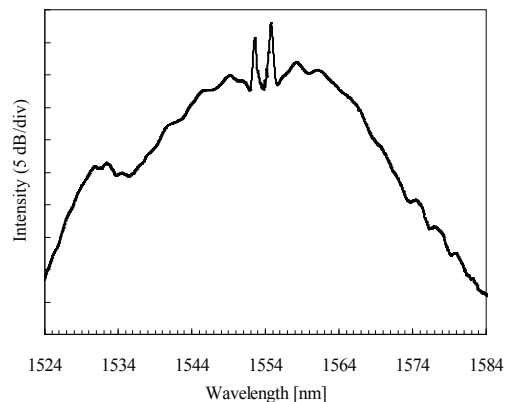


図9: 最適化された超短パルスのスペクトル

Fig.9: Spectrum of ultra short pulse train after CPA

2-3. 光源の可搬装置化

図10に作製した超短パルス光源を示す。オンサイトでの使用を可能とするために、筐体を構成する機械部品の軽量化と、シングルモードファイバ(Single mode fiber: SMF)ポビン、パルス圧縮器、EDFA 等のデバイスの小型を図ることで、W450×D435×H133(19 インチ 3U)、重量 9.9kg を実現した。光出力はファイバ出力であり、テラヘルツセンサまでの超短パルス光のファイバ伝送が可能である。また超短パルス光の特性については、パルス幅 200fs 級、ピーク出力 1kW 以上(繰り返し周波数 1.25GHz 時)を実現した。

上記のゲインフラット化技術を盛り込み、超短パルス光源への組込用の前段 EDFA および後段 EDFA を作製した(図11)。前者は平均光出力 18dBm、寸法 90 x 70 x 12 mm、重量 118g であり、平均光出力 29dBm、寸法 150 x 125 x 25 mm、重量 750g である。

また、パルス圧縮器と後段 EDFA を合わせて CPA モジュールを作成した(図12)。パルス圧縮器の寸法は

125×150×25mm、CPA モジュールの寸法は 300×250×45mm、重量は 1.3kg である。



図10: 可搬型超短パルス光源
Fig.10: Portable ultra-short-pulse laser

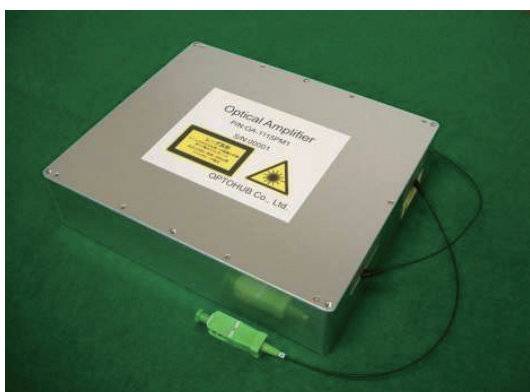


図11: 組込用小型(出力=29dBm)
Fig.11: Built-in type compact EDFA (P=29dBm)

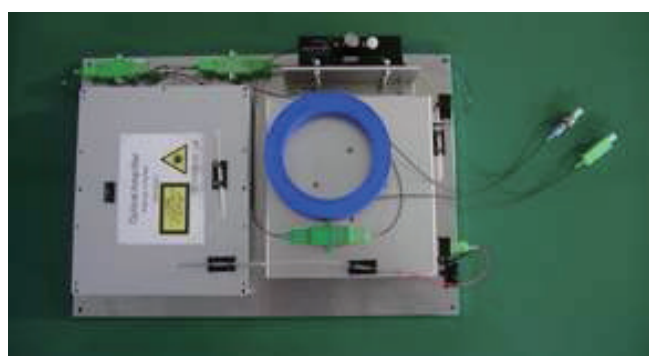


図12: パルス圧縮器と CPA モジュール
Fig.12: Pulse compressor and CPA module

3. テラヘルツ分光分析の検証

テラヘルツ実験光学系 (Terahertz time domain spectroscopy: THz-TDS) を構築し、1.55 μ m 帯用テラヘルツ電磁波発生・検出素子の検討を行うと共に、開発した超短パルス光源によりテラヘルツ波の発生・検出検証を行った。通信波長帯域において励起可能な素子としては InAs アンテナ[8]や低温成長 (Low temperature growth : LTG) InGaAs 光伝導アンテナ[9-10]があるが、本研究では市販のファイバーレーザーによる評価から、最も発生・検出効率の高い InGaAs 光伝導アンテナを用いることとした。

a) 時間領域分光の検証

本光源にHHI社(独)のLTG-InGaAs/InAlAs 光伝導アンテナを使用してTHz-TDSによりテラヘルツ波の発生・検出を検証した。ロックインアンプによる位相検波を行った結果、パルス繰り返し周波数 1.25GHz のとき、発生したテラヘルツ波の周波数帯域は 1.5THz、振幅スペクトル S/N 比は 10dB であった(図13)。現時点の光源のピーク出力が 1kW の場合では周波数分解能が低く十分ではないが、半導体の誘電率測定や透過率測定などの検査装置としての利用が可能であるといえる。

b) 低ノイズ化の検討

LTG-InGaAs アンテナによる THz-TDS は、検出感度は大きいと同時にアンテナの暗電流が多いためノイズが大きく、S/N 比が十分にとれないという欠点がある。そのため、ノイズの低い LTG-GaAs アンテナを用いた 1550nm 帯励起でのテラヘルツ波の検出[11-12]について検討し、このアンテナの欠点である感度不足の改善を行った。その結果、アンテナギャップの間隔を狭帯化することで、最大で 10dB 程度感度を向上させることに

成功した。

アンテナのギャップ間隔およびギャップに照射される励起光(超短パルス光)のビーム径と発生したテラヘルツ波の時間波形の関係を図14に示す。一般的には、ギャップ間隔とビーム径が同等の値となるときテラヘルツ波の検出効率は極大となる。従って、ギャップ間隔が 10 μm 、5.4 μm 、3 μm 、1.5 μm のときの励起ビーム径をそれぞれ 10 μm 、5.4 μm 、5.4 μm 、2.7 μm とした。従来よく使用されたギャップ間隔が 5 μm のアンテナに比べ、ギャップ間隔を 1.5 μm まで狭小化したときはテラヘルツ波の検出感度は約 10dB 向上している。これは、ギャップ間隔の狭小化によって、アンテナ抵抗が低下したことと、励起ビーム径を絞ったことで、励起されるキャリア密度が増加したことに起因する。LTG-GaAs アンテナにおいては、1.55 μm 帯の励起光に対しては2段階吸収により光子がキャリアに吸収されるので、ビーム径が 1/2 になるとキャリア密度は約 4 倍となる。

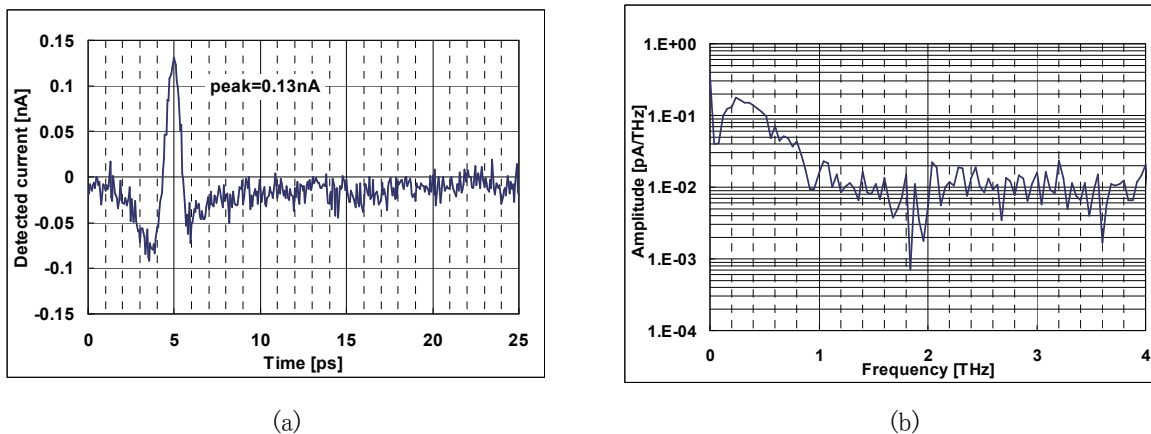


図13: 開発した光源と LTG-InGaAs/InAlAs アンテナによるテラヘルツ波の発生

(a) テラヘルツ波の時間波形 (b)スペクトル

Fig.13: Generation of terahertz wave using the ultra short pulse laser and LTG-InGaAs/InAlAs antenna

(a) Time trace of the terahertz wave (b) Spectrum

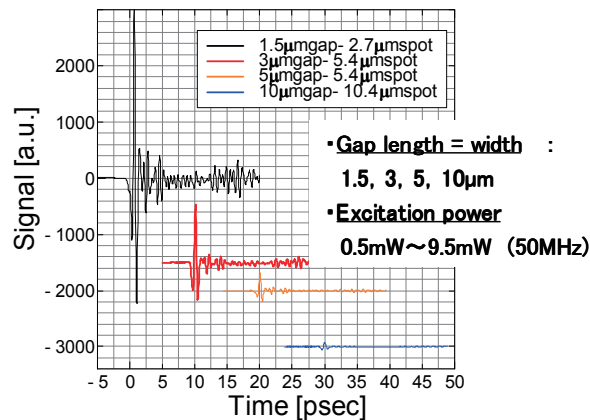


図14: LTG-GaAs アンテナによる THz 波発生

Fig.14: Generation of THz wave with LTG-GaAs antenna

4. 結言

テラヘルツ分光計測を行うための小型かつ軽量の汎用 THz-TDS 用超短パルス光源の開発を行った。低駆動電圧 LN 光変調器による光周波数コムをベースとした超短パルス光発生技術により、超短パルス光の高繰り返し(>1GHz)を実現した。また光学系を構成する部品として光通信用部品を使用し、小型、軽量(<10kg)

かつ高信頼な装置を実現した。

特性面では、EDFAのゲインフラット化により、パルス幅 200fs、ピーク出力 1kW 級の超短パルス光を実現し、光伝導アンテナの利用によりテラヘルツ波の発生と時間領域分光が可能であることを示した。

今後は、光特性の自動安定化、周波数掃引帯域の拡張及びコストダウン等を図り、ユーザーが扱いやすいテラヘルツ分光用光源へと改良を行ってゆく。

参考文献

- [1] K.Fukunaga, M.Yasui, I.Hosako, APMP2012, ThA-4, 2012
- [2] T. Sakamoto, et al., Opt. Lett., 33, pp. 890-892, 2008
- [3] G.P.アグラワール「非線形ファイバ光学原著第2版、吉岡書店、2004年
- [4] M.L.Stock,et.al.,Optics Communications, 106, pp. 249-252, 1994
- [5] 諸橋他,IEICE technical report. OPE 109 (159), pp. 171-174, 2009
- [6] 須藤他、電子情報通信学会 2010年ソサイエティ大会 C-4-22
- [7] 小栗他、古河電工時報第 116号、p.37、2005年
- [8] T. Kondo, M. Sakamoto, M. Tonouchi and M. Hangyo, Jpn. J. Appl. Phys.**38**, 1035-1037 (1999)
- [9] M. Suzuki and M. Tonouchi, Appl. Phys. Lett. **86**, 051104 (2005)
- [10] A. Takazato, M. Kamakura, T. Matsui, J. Kitagawa, and Kadoya Appl. Phys. Lett. **90**, 101119 (2007)
- [11] M. Tani, KWang-Su Lee and X.-C. Zhang, Appl. Phys. Lett. **77**,1396-1398 (2000)
- [12] T.Kataoka, K.Kajikawa, J.Kitagawa, Y.Kadoya and Y.Takemura, Appl. Phys. Lett. **97**,201110(2010)