

1 研究課題名： テラヘルツ繰り返し高安定外部同期型パルス光源の開発

2 研究者氏名： 高坂 繁弘

研究員： 小関 泰之(研究期間 平成 16 年 4 月～平成 18 年 4 月)

4 研究のねらい：

本研究では、従来のパルス光源に比較しテラヘルツと高い繰り返し周波数を持つ、実用的な外部同期型パルス光源の開発を行う。開発したパルス光源がテラヘルツ領域の科学技術を開拓し得る光源となること期待している。

時間幅がピコ秒からフェムト秒の光パルスが発生する超短パルス光源は、物性測定や光通信、加工などの様々な分野への新しい応用を開拓してきた。しかしながら、主に用いられる繰り返し周波数はキロヘルツからメガヘルツ程度と低いため、超短パルス光の応用は主に単一の光パルスを用いた応用に限られていた。超短パルス光源の繰り返し周波数を著しく高くすることで、応用範囲が従来のパルス光源では困難であった新しい分野に広がると期待される。

本研究では、テラヘルツ繰り返しのパルス光源開発を目指す。繰り返し周波数がテラヘルツとなることで、周期的な励起による新規物性応用や将来の高速光通信用基本光源など新規応用が可能になると期待される。また、開発したパルス光源の高速光通信へ応用するために必要な機能として、高繰り返しであることの他に外部同期できることも重要である。そのため、外部同期技術の開発も本研究の中心課題の一つとして取り組んだ。

4 研究成果

目指すパルス光源を実現する構成として、光パルス圧縮ファイバと外部同期ビート光源を組み合わせる構成(図 1)を採用し、(1) パルス圧縮技術と(2) 同期技術の開発を行った。開発した技術を組み合わせることで、(3) 目指すパルス光源を実現した。

また、パルス光源開発に関する(4) 周辺技術開発として、(4-1) 9-15 GHz 繰り返し周波数可変・波長可

変・出力タイミング制御型パルス光源の開発、(4-2) 簡素で高感度な光パルス特性評価方法の開発、(4-3) 高スペクトル純度のビート光を出力する低消費電力型同期光源の開発を行った。

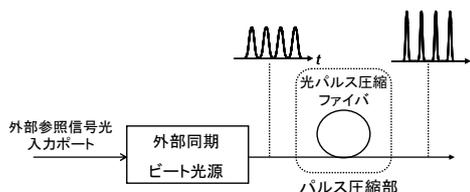


図 1 目指すパルス光源の基本構成。

(1) 光パルス圧縮技術の開発

様々な方式のパルス圧縮ファイバがある中で、我々は CPF(comb-like profiled fiber)の開発を行った。高繰り返しパルス発生に有利、ファイバの短尺性、広帯域波長可変性、製造が容易等様々な優れた特性を有しているためである。ここで、CPF は高非線形ファイバとシングルモードファイバを交互に接続することで構成される。研究開始当初は、実験的な試行錯誤により製作され

た CPF により繰り返し周波数 160 GHz パルス幅 730 fs の高品質な光パルス列の発生が報告されていた。しかしながら、高品質化の理論限界やテラヘルツへの繰り返し周波数のパルス圧縮を可能とする CPF の設計方法が不明であった。

そこで、高品質な光パルス列を発生することを可能とする CPF の長手方向の分散特性(図 2)を非線形シュレディンガー方程式に基づくシミュレーションにより明らかにした。理論的には、パルス成分と雑音成分の比が >60 dB と高品質な光パルス発生が可能であることが判った。

次に、実験的に高品質パルスの発生を検証した。シミュレーションにより明らかになった長手方向の分散特性を模擬するように、CPF を構成する光ファイバ長を決定し(図 3)、1 THz 繰り返し光パルス発生用 CPF を製作した。この CPF を用いて発生した 1 THz 繰り返しパルス幅 97 fs 光パルス列の波形を図 4 に示す。CPF に用いた高非線形ファイバの高次分散の影響でシミュレーション結果から若干ずれているもののパルス成分と雑音成分の比が >10 dB と高品質パルスの発生に成功した。これらから、CPF の設計自由度を活用し、綿密な設計を行うことにより、高品質な高繰り返し光パルス列を発生する技術を確認した。

## (2)同期技術の開発

簡素でテラヘルツ領域で動作する高速性を有する同期光源として図 5 に示す構成の光源を開発した。開発した同期光源性能は、出力ビート光の周波数には無依存であるが、制御帯域が広帯域になるほど良くなるという特性を持つ。ただし、制御帯域の広帯域化は同時に雑音の増大に結びつくため、低雑音な同期動作を得るために電子回路や光信号

の低雑音化を行った。さらに制御帯域が広帯域になるにつれ、タイミング誤差信号が制御ループを一周するのに必要な時間分の遅延が、同期信号の低雑音性を阻害する大きな要因となる。空間光学系を用いて同期光源を小型にモジュール化(図 6)することで遅延時間を 1 ns 以下と小さく

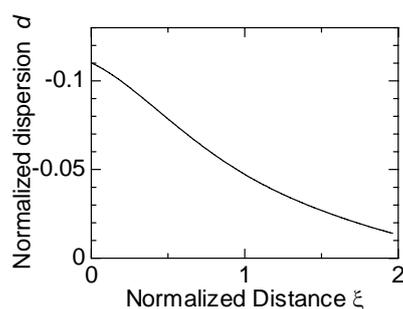


図 2 シミュレーションにより得られた高品質な光パルス列を発生する分散特性

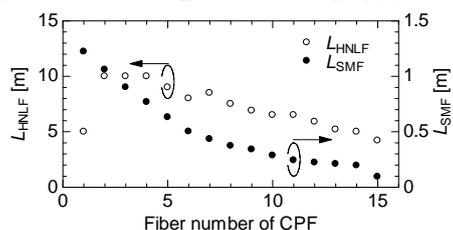


図 3 図 2 の分散特性を模擬するように決定した CPF を構成する各ファイバの長さ。HNLF: highly nonlinear fiber, SMF: single mode fiber.

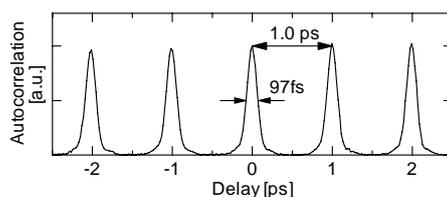


図 4 1 THz 繰り返し光パルス列の自己相関波形。

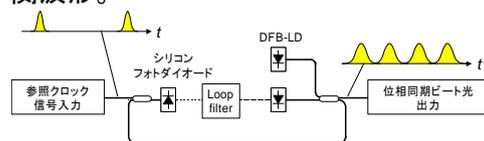


図 5 同期光源の構成概略。DFB-LD: 分布帰還型半導体レーザー。



図 6 小型同期光源モジュール。

し、上記要因を取り除いた。これにより同期動作の低雑音化が可能となった。

図7に1 THz ビート光と参照信号の相互相関信号波形を示す。ビート光が参照信号に対して同期していなければ無相関となるため、1 ps 周期の波形は同期していることを示している。同期性能のひとつであるタイミングジッタは、図8の位相雑音スペクトルを積分することで得られ、27 fsと小さいことがわかった。以上のように、テラヘルツ領域における同期技術を確立した。

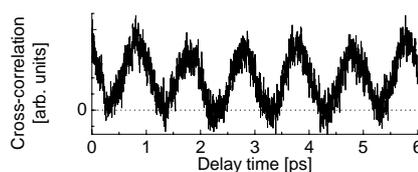


図7 1 THz ビート光と参照信号光の相互相関波形。

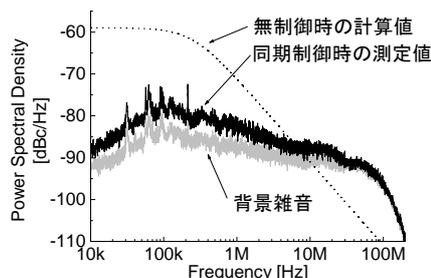


図8 1 THz ビート光の位相雑音スペクトル。

### (3)外部同期型パルス光源の実現

パルス圧縮技術と同期技術を組み合わせることで、目指す光源が実現する。そこで、繰り返し周波数 160 GHz において 160 GHz 繰り返し外部同期型パルス光源の実現を試みた。その結果、図9に示すように 160 GHz 光パルス列と参照信号光の相互相関波形が測定された。光パルス列が参照信号光に対して同期していなければ無相関となるために 6.25 ps 周期の波形は測定できない。この結果は、同期光パルス列の発生を示している。

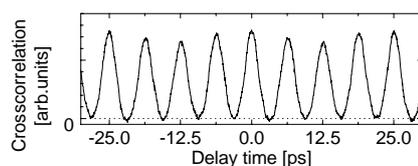


図9 160 GHz 繰り返し光パルス列と参照信号光の相互相関波形。

このように、パルス圧縮技術と同期技術を組み合わせることにより、160 GHz 繰り返し外部同期型パルス光源が実現した。

### (4) パルス光源に関する周辺技術の開発

#### (4-1) 繰り返し周波数可変・波長可変・出力タイミング制御型パルス光源の開発

CPF を用いるパルス光源は、1. 繰り返し周波数を種光パルス光源の繰り返し周波数で自由に設定できる、2. 中心波長を大きく変えても出力パルス特性は一定である、3. CPF が出力する光パルス列のタイミングを種パルス光源が出力光パルスのタイミングにより制御できる、といった応用上有用な特長を持つ。そこで、これらすべての特長を有するパルス光源の実現を試み、9–15GHz 繰り返し周波数可変、1530–1560 nm 波長可変、タイミングが電子的に制御できる、パルス幅がサブピコ秒のパルス光源を実現した(図10)。さらに、この光源を用いて 160 Gbit/s 光信号から 10 Gbit/s 光信号に時分割分離する光通信応用に成功した。

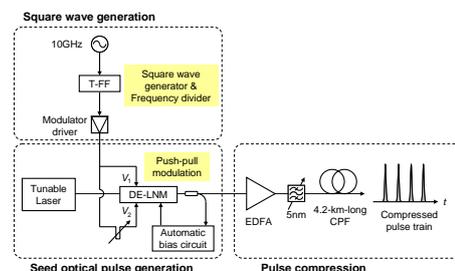


図10 繰り返し周波数可変・波長可変パルス光源の構成。出力タイミング制御

#### (4-2)簡素で高感度な光パルス特性評価方法の開発

パルス光源の開発において、発生した光パルスの位相情報を含めた特性の測定は、設計した光パルスが発生できているかどうかを確認するための重要な測定技術である。マツハチエンダー干渉計を用いた光強度変調器の駆動法を工夫することで、1  $\mu$ W と小さな平均パワーの光パルス列であっても高感度に位相情報を含むパルス波形を測定することができる、簡素な構成の光パルス特性の測定法を開発した(図 11)。

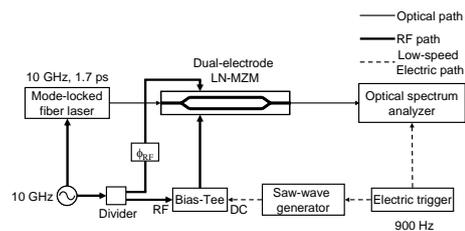


図 11 高感度光パルス特性測定系。

#### (4-3)高スペクトル純度のビート光を出力する低消費電力型同期光源

同期光源を構成する周波数可変ビート光源の線幅を削減することにより、同期動作に必要な光パワーを大きく削減できる可能性がある。

1 THz と高周波数のビート光の発生は困難でかつ構成の簡素さが多少失われるが、光位相変調器と高消光比の光フィルタを用いることで狭線幅と高スペクトル純度を特長とするビート光源を実現できる。このビート光源を用いることにより、総光パワーが 20 mW 以下と小さなパワーで、光信号雑音比が 40 dB 以上の同期 160 GHz ビート光を発生する、より実用的な 160 GHz 同期光源を開発した(図 12)。本同期光源を用いて、データが載ったパルス幅 2 ps の外部参照信号光に対して、タイミングジッタ 67 fs で同期した 160 GHz ビート光を発生に成功した。

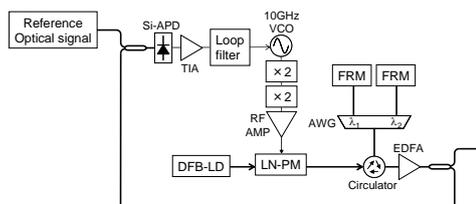


図 12 高スペクトル純度のビート光を出力する低消費電力型同期光源の構成。

## 5 自己評価

本研究の課題は、テラヘルツ繰り返し高安定外部同期型パルス光源の開発であった。この課題に対して、我々は、まずパルス光源を実現する要素技術である低雑音光パルス圧縮技術と低雑音同期技術を確立した。次に、二つの要素技術を組み合わせることで、高繰り返し外部同期型パルス光源を実現した。計画当初の課題は研究期間内に遂行でき、従来のパルス光源に比較し著しく高い繰り返し周波数のパルス光源に関する基盤技術が整った。

しかしながら、開発した光源を用いた応用研究を開始するにはいたっておらず、今後の課題となる。この点に関しては、研究の進め方を改善することでもっと短時間に要素技術開発を終え、応用研究を開始できた可能性が高く、深く反省している。

本研究の推進において、ポスドクの貢献は多大なものであった。また、企業において本研究課題のような基礎的研究を3年間半もの長期期間行うのは非常に難しいが、領域総括の花村先生をはじめとするアドバイザーの先生方が本研究課題をさきがけ研究として採択していただいたため、本研究に没頭することができました。さらに、研究環境を整えてくれた所属グループマネージャや研究所長ら古河電気工業株式会社関係者のさきがけ研究に対する理解と協力無くして、本研究を遂行することが出来ませんでした。協力した下さった皆様に感謝いたします。

## 6 研究総括の見解

テラヘルツ繰り返し高安定外部同期型パルス光源の実現に二つの技術開発が必要であった。第一に、二台の半導体レーザーを用いてテラヘルツ繰り返しビート光を発生し、第二に外部信号光に同期した光信号を発生する技術を開発した。繰り返し周波数1THzのビート光をパルス圧縮するようファイバシステムを設計・作製し、パルス幅の97fsでパルス間隔1.0psのパルス列の発生に成功した。更にビート光の外部同期を試み、ビート光のタイミングジッタを27fsにまで抑え込むことに成功した。

このパルス光源は、将来のテラビット級超高速通信や周波数精度が高い単色テラヘルツパルス波の発生、コヒーレントフォノンの選択励起などの広い分野での応用が期待できる。その実用化まで進展することが待たれる。

## 7 主な論文等:

論文(6件)

1. Y. Ozeki, S. Takasaka, T. Inoue, K. Igarashi, J. Hiroishi, R. Sugizaki, M. Sakano, and S. Namiki, "Nearly exact optical beat-to-soliton train conversion based on comb-like profiled fiber emulating a polynomial dispersion decreasing profile," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 8, pp. 1698-1700, 2005.
2. Y. Ozeki, S. Takasaka, J. Hiroishi, R. Sugizaki, T. Yagi, M. Sakano and S. Namiki, "Generation of 1 THz repetition rate, 97 fs optical pulse train based on comb-like profiled fibre," *IEE Electron. Lett.*, vol. 41, no. 19, pp. 1048-1050, 2005.
3. S. Takasaka, Y. Ozeki, S. Namiki, and M. Sakano, "External Synchronization of 160-GHz Optical Beat Signal by Optical Phase-Locked Loop Technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol.18, no.23, pp.2457-2459 (2006).

他 3 件

特許(国内出願(基本出願)5件、優先権出願 2件、PCT出願 1件)

1. ロック検出装置及び光フェーズロックループシステム (発明者: 高坂繁弘、小関泰之)  
特願 2004-297910、WO2006/0411(PCT 公開).
2. 光パルス圧縮装置、光パルス発生装置および光パルス圧縮方法 (発明者: 小関泰之、五十嵐浩司、井上崇)  
特願 2004-336067、特願 2005-145493(優先権出願).
3. 同期光信号発生装置及び同期信号発生方法 (発明者: 高坂繁弘、小関泰之、坂野操)  
特願 2006-190770.

他 基本出願 2 件

招待講演(1件)

1. 高坂繁弘、小関泰之、並木周、坂野操、「OPLLを用いた超 160 GHz 光パルス列同期技術」、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会、G-17pII-4、宮崎市フェニックスシーガイアリゾート、2007年 1 月.

一般発表(招待講演以外)

国際学会 10 件、国内学会 14 件