

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21226002

研究課題名(和文) 繰り返しと光周波数を同時安定化したGHz帯モード同期パルスレーザの実現とその応用

研究課題名(英文) GHz mode-locked pulse laser with simultaneously stabilized optical frequency and repetition rate and its applications

研究代表者

中沢 正隆 (NAKAZAWA, MASATAKA)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：80333889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 145,800,000円、(間接経費) 43,740,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、繰り返し周波数をCs原子共鳴線に、光周波数をアセチレン分子吸収線に同時安定化した波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯モード同期パルスレーザを世界で初めて実現した。また、可飽和吸収体によるパルス狭窄化効果を併用することで繰り返し 9.19GHz で 440fs の短パルスを生成することに成功した。さらに、周波数安定化CWレーザをベースにして開発したパルス光源のコヒーレントパルス伝送への応用研究を展開し、64値のQAM多値変調による 1.92Tbit/s データの単一チャネル伝送に初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated for the first time a mode-locked pulse laser with simultaneously stabilized optical frequency and repetition rate by using a Cs atomic resonance and an acetylene molecular absorption line, respectively. We also successfully demonstrated a 440fs short pulse generation by employing a saturable absorber in the laser cavity for narrowing the pulse width. Furthermore, we applied a pulse source based on a frequency stabilized CW laser to coherent optical pulse transmission, and we have successfully demonstrated for the first time a 1.92Tbit/s single channel transmission with 64 QAM signal.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー 光標準・計測 コヒーレント伝送

1. 研究開始当初の背景

繰り返し周波数が 10~40 GHz の波長 1.5 μm 帯超短光パルス光源は、超高速光通信、光信号処理、ならびに光 metrology などの分野において幅広く利用されている。このようなパルスレーザの光周波数標準・光計測ならびにコヒーレント光通信への応用においては、その繰り返し周波数だけでなく光周波数をも同時に制御する技術が大変重要となる。これにより例えば、超高速コヒーレントパルス伝送のような新しい分野を切り開くことができる。

これまでに数十~数百 MHz の低繰り返しフェムト秒光源である Ti:Sapphire レーザにおいては、1 オクターブ法を用いてキャリアエンベロープオフセット周波数を検出することにより光周波数を絶対安定化する技術が実現されている。しかし、繰り返し周波数を制御するためには、レーザ共振器長を変化させる必要がある。この共振器長の変化に伴い光周波数も同時に変化するため、繰り返しと光周波数を独立にかつ同時に制御することは容易ではなかった。さらに、Ti:Sapphire レーザは波長 800 nm 帯で発振するパルス光源であり、またその繰り返しが低速であることから、波長 1.5 μm 帯の光通信やマイクロ波への応用については明確ではなかった。

2. 研究の目的

本研究では、光通信波長 1.5 μm 帯において、繰り返し周波数をセシウム(Cs)共鳴線(9.1926 GHz)に安定化し、光周波数をアセチレン(C_2H_2)分子吸収線(1538 nm)に同時安定化したパルス光源を世界で初めて実現することを目的とする。さらに本パルス光源の超高速コヒーレント光通信への応用展開を図る。

3. 研究の方法

本研究で開発する2種類の周波数同時安定化パルス光源を図1に示す。(1)は、繰り返し周波数をCs共鳴線に安定化した再生モード同期パルスレーザ(Cs光時計)の出力スペクトルから縦モード1本を抽出し、その周波数を C_2H_2 分子に安定化することにより、同時安定化を実現する方法である。一方(2)は、 C_2H_2 周波数安定化CWレーザの光出力を、超高安定なCs原子発振器を基準とする変調周波

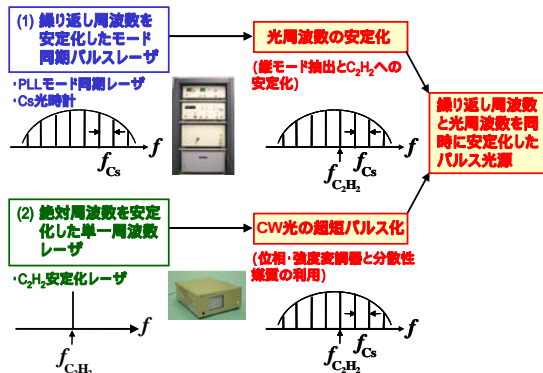


図1 本研究で開発する同時安定化パルス光源

数によりパルス化する方法である。以下に各パルス光源の研究課題について述べる。

(1)再生モード同期パルスレーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の開発

パルスレーザの出力スペクトルから縦モード1本を抽出し、その周波数を位相敏感検波法により C_2H_2 分子に安定化する。この方法は短パルス光を高いS/Nで得られる利点を有する。一方で、本レーザでは発振縦モードのホップによる離散的な光周波数変動が生じるため、そのモードホップを抑制し、光周波数の連続掃引制御を実現することが課題となる。

(2)周波数安定化CWレーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の開発

C_2H_2 周波数安定化CWレーザの出力スペクトルから超高速位相変調器によりサイドバンドを生成し、それを分散補償して短パルス化する。変調周波数には超高安定なCs原子発振器を基準とする。この方法では簡便な構成で高安定なパルスが得られるといった利点を有する。一方で、パルス幅の狭窄化と光S/Nの増大が課題である。

(1)と(2)のパルス光源の利害得失を詳細に評価・検討し、最終的には本パルス光源の次世代コヒーレントパルス伝送への応用を展開し、その有用性を明確にする。

4. 研究成果

(1)再生モード同期パルスレーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の開発

再生モード同期パルスレーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の構成を図2に示す。本光源は、利得媒質としてエルビウム添加ファイバ(EDF)を用いた1.5 μm 帯再生モード同期パルスレーザ部とCsガスセルを用いた繰り返し周波数安定化回路ならびに C_2H_2 セルを用いた光周波数安定化回路より構成されている。ここで、Cs共鳴線からの繰り返し周波数の誤差信号を再生モード同期電気帰還ループを介してマイクロ波の位相に帰還している点が特徴である。これにより、光周波数とは独立に繰り返し周波数の制御を実現している。

再生モード同期レーザ部において、繰り返し周波数(9.19 GHz)と等しいFSRを有するエタロン素子を共振器内へ挿入し、エタロン

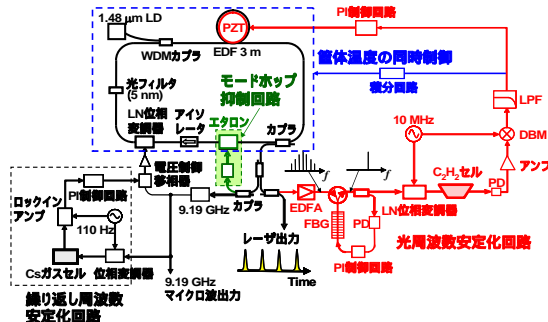


図2 再生モード同期パルスレーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の構成

素子の透過中心波長がレーザの発振波長に常に一致するよう負帰還制御を行なうことによりモードホップを抑制した。また、レーザ共振器内の EDF を円筒型 PZT 素子に巻き付け、PZT 素子への印加電圧により共振器長を変化させることにより、レーザの光周波数を 1 GHz 以上にわたり連続掃引させることに成功した。これによりレーザ発振周波数の C_2H_2 分子吸収線への安定化を可能とし、研究目的の最も重要な項目である繰り返しと光周波数を同時安定化した Cs 光原子時計を世界で初めて実現した。ここで、光周波数安定化回路において、 C_2H_2 分子吸収線からの光周波数の誤差信号を共振器長へ負帰還すると同時に、その誤差信号の一部（低速成分）をレーザ筐体温度にも負帰還するよう制御回路を改良した。これにより温度ドリフトに伴う長期的な光周波数の変動を抑制し、光周波数の長期安定度を大幅に改善した。

図 3 に本パルス光源の出力特性を示す。図 (a) に示す光スペクトル波形において、その中心縦モード (1538.8 nm) を C_2H_2 分子吸収線 (P(10)) に安定化している。そのスペクトル幅は 129 GHz であり、45 dB の高い光 S/N が得られていることがわかる。また、図 (b) に示す自己相関波形より、パルス幅は 3.5 ps であり、その時間バンド幅積は 0.45 であった。このことから本レーザよりトランスフォームリミットなガウス型パルスが出力されていることがわかる。図 (c) にレーザ筐体温度制御の適用前後における光周波数安定度の評価結果をそれぞれ赤および青のプロット点で示す。ここで、比較のために測定に用いた参照光源（周波数安定化 CW レーザ）の安定度も黒のプロット点で示している。筐体温度制御の適用により積分時間 100 秒における光周波数安定度を 2.2×10^{-11} から 7.2×10^{-12} に改善することに成功した。この周波数安定度は参照光源と同等の値であることより、本パルスレーザの光周波数を CW レーザと同様に高い精度で制御できていることがわかる。一方、繰り返し周波数の安定度を評価した結果を図 (d) に示す。図において繰り返し

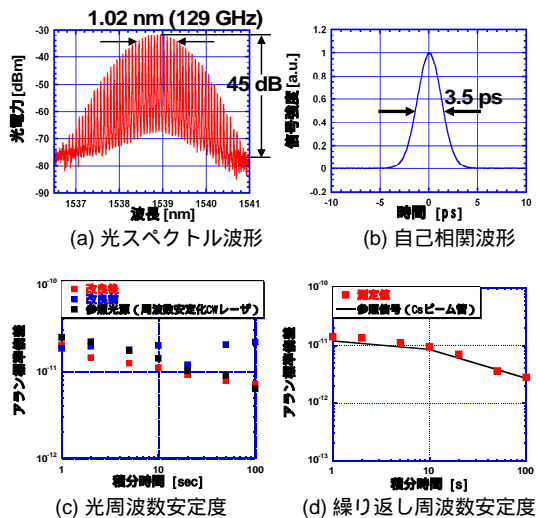


図 3 パルス光源の出力特性

返し周波数安定度の測定値が参照信号として用いた Cs ビーム管の安定度と重なっていることがわかる。このことより、繰り返し周波数の安定度は参照信号の安定度以上であるといえる。

上述した周波数安定化モード同期パルスレーザを周波数・時間基準広帯域信号源と応用する上で、そのレーザ出力光のスペクトル幅を拡大（短パルス化）することが重要な課題となる。そこで本研究では、図 2 に示した LN 位相変調器を用いた能動モード同期レーザ共振器内に、受動モード同期レーザで使用する半導体可飽和吸収体鏡を挿入したハイブリッドモード同期レーザを新たに構築し、レーザ出力パルスの狭窄化を図った。その際、レーザ共振器を構成する光ファイバの分散ならびに非線形光学係数を最適に設計し、ソリトン効果によるパルス圧縮効果を併用することで可飽和吸収効果を効率よく引き出すよう工夫を施した。得られたレーザ出力パルスの光スペクトルおよび自己相関波形をそれぞれ図 4(a), (b) に示す。これらの図に示すようにスペクトル幅は 5.8 nm (720 GHz)、時間幅は 440 fs、それらの時間バンド幅積は 0.32 であり、sech 型のソリトンパルスが得られた。また、図 (a) に示すように 44 dB の高い光 S/N が得られた。可飽和吸収体を併用することで 3.5 ps であったパルス幅を 440 fs と大幅に短くすることに成功した。

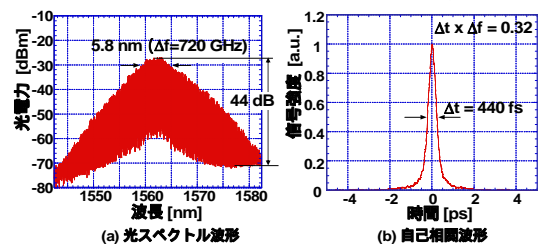


図 4 ハイブリッドモード同期レーザの出力パルス特性

(2) 周波数安定化 CW レーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の開発

C_2H_2 周波数安定化 CW ファイバレーザをベースにした周波数同時安定化パルス光源の構成を図 5 に示す。まず、デュアルドライブ型 LN 変調器を光コム発生器として使用し、CW レーザ出力光の周りに 9.95328 GHz (約 10 GHz) の光サイドバンドを生成した。左下の挿入図に示すように、スペクトル帯域が 560 GHz、光 S/N が 35 dB の光コム信号が生成されている様子が見える。ここで、変調器を駆動するシンセサイザのクロックを Cs 原子時計に同期させることにより、光周波数とコム間隔（繰り返し周波数）をそれぞれ C_2H_2 分子と Cs 原子の共鳴線に同時安定化した光コムを生成している。この光コム信号を光フィルタおよび異常分散媒質（単一モードファイバ：SMF）へ入力し、スペクトル波形の整形およびチャープ補償を施した。これにより右下の挿入図に示す、時間幅が 2.4 ps のトランスフォームリミットなガウス型光パルス

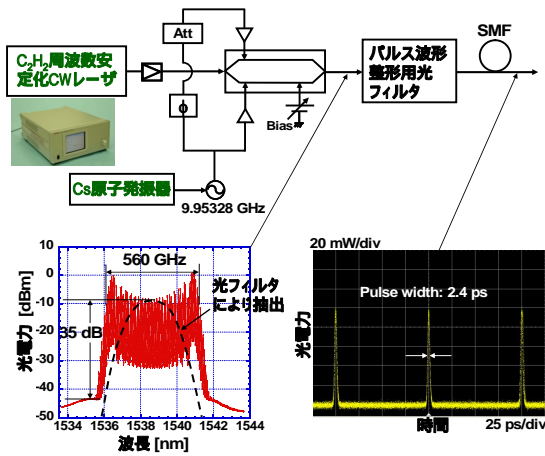


図5 CWレーザをベースとした周波数同時安定化パルス光源の構成

が得られた。

利得媒質にエルビウム添加ファイバを用いたCWファイバレーザの出力光は、緩和振動に起因した数100kHz成分の強度雑音を含む。そこで、本研究では周波数安定化CWレーザの低強度雑音化に取り組んだ。具体的には、ファイバレーザの狭線幅特性と半導体レーザの低強度雑音特性という2つの特徴を兼ね備えた光源として、ファイバリング型の外部共振器を設けた1/4シフトDFB半導体レーザを考案し、 C_2H_2 吸収線を用いた周波数安定化リング型DFBレーザを開発した。作製したレーザの出力特性を図6に示す。図(a)は自己遅延ヘテロダイン検波法によるレーザ線幅の測定結果を示している。その線幅は2.6kHzであり、CWファイバレーザと遜色のない狭線幅特性が得られていることがわかる。また、図(b)に示す相対強度雑音特性において、数100kHz帯に緩和振動に起因する固有の強度雑音成分は観測されず、-135dB/Hz以下の低強度雑音特性が得られている。レーザの光周波数安定度の測定結果を図(c)に示しているが、積分時間100秒において 1.3×10^{-11} の高い安定度が得られている。このように狭線幅かつ低強度雑音特性を有する周波数安

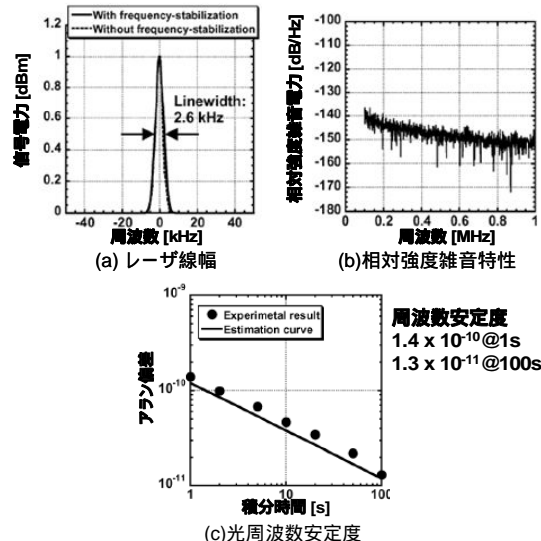


図6 1/4シフトDFBレーザの出力特性

定化CWレーザを実現することに成功した。

以上で述べた(1)と(2)の2種類のパルス光源の特徴をまとめる。(1)のパルス光源は、レーザより直接光パルスを出力できるため45dBの高い光S/Nが得られ、また可飽和吸収体を併用するなどの工夫により1ps以下の短パルスを出力できるといった利点がある。一方で、共振器内のエタロン素子、光周波数、繰り返し周波数の3つの負帰還制御機構を要するため、レーザの構成が複雑であるデメリットがある。これに対し(2)のパルス光源は、レーザ外部に配置した高電力光増幅器から出力される自然放光雑音の影響により、光S/Nが35dBまで低下し、(1)と比較して10dB低い値となる。また、パルス幅は光コム発生器で発生する変調サイドバンドの帯域により2.4psに制限される。一方、負帰還制御はCWレーザの光周波数安定化機構のみでよいことから、その構成が簡便であるといった利点がある。

つぎに、パルス光源を用いた超高速コヒーレントパルス伝送への応用研究の成果について述べる。パルス信号を用いたコヒーレント伝送技術を新たに開発する上で、パルス伝送に伴う波形歪みの影響を考慮し、信号多値度の達成目標値を64値に定めた。この64QAM信号を前方誤り訂正符号(FEC)を用いてエラーフリー受信(2×10^{-3} 以下の誤り率を実現)するために必要な光S/Nは23dBである。これに対し、(1)と(2)のいずれのパルス光源も十分なS/Nを有しているといえる。そこで、レーザ構成が簡便である(2)のパルス光源を用いてコヒーレントパルス伝送への応用研究に取り組んだ。

最初の伝送実験として、QAM信号の多値度を32値、基本シンボルレートを10Gsymbol/s、時分割多重(OTDM)回路の多重度を4とした、偏波多重40Gsymbol/s、32QAM(400Gbit/s)信号の225km伝送を実施した。そのコヒーレントパルス伝送系の構成を図7に示す。図(a)に示す送信部において、CWレーザと光コム発生器を用いて発生した光コム信号が2分岐され、一方の経路では10Gsymbol/s、32QAMコヒーレントパルス信号が生成される。

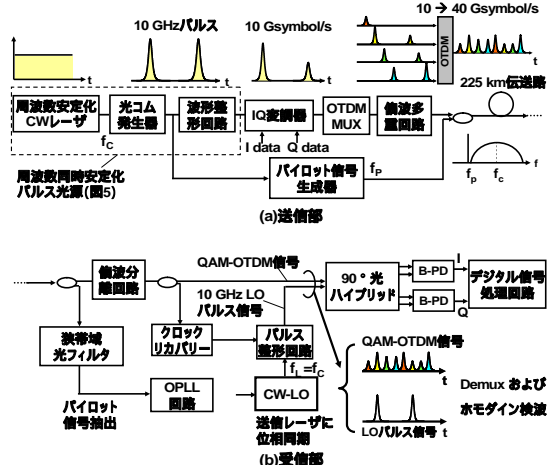


図7 コヒーレントパルス伝送系の構成

その後、本信号は光時分割多重回路によって4 逓倍され、最後に偏波多重回路を介して 10 Gsymbol/s × 4-OTDM × 2 pol, 32QAM (5 bit/symbol)= 400 Gbit/s のデータ信号が生成される。もう一方の経路においては光コム信号の高調波の一本をパイロットトン (PT)信号として抽出している。これらの信号を合波し、225 km 光伝送路(75 km/span)を伝搬させる。

一方、図(b)に示す受信部において、受信された QAM-OTDM 信号は偏波分離された後に 90°ハイブリッド回路へ入力される。そこでは PT 信号を介してデータ信号に位相同期された 10 GHz LO パルス信号とのホモダイン検波信号が検出され、同時に 40 Gsymbol/s OTDM 信号が 10 Gsymbol/s データに多重分離される。最後にデジタル信号処理回路によってオフライン処理によりデータが復調される。

図7に示す伝送系を用いて、32 値の多値度による 400 Gbit/s の単一チャンネル伝送を世界で初めて実現し、提案するコヒーレントパルス伝送の有効性を実証した。しかしながら、QAM-OTDM 信号のスペクトル帯域が受信部における光検出器の帯域と比べ1桁以上広い関係にあるため、受信した電気信号の S/N が大幅に劣化し、このことが伝送性能を制限する主要因となった。この問題を解決するために、伝送した RZ データを受信部で CW データに変換し、光検出器で受信可能な帯域内の信号レベルを増大させる RZ-CW 変換技術を新たに考案した。40 Gsymbol/s, 32 QAM 信号に RZ-CW 変換を適用前後における光スペクトルおよびその復調特性を図 8(a)および(b)に示す。RZ-CW 変換を適用することでデータ信号の光 S/N が 5 dB 向上し、その結果、符号誤り率 (BER) が 1×10^{-4} におけるパワーペナルティを 5.5 dB 改善することに成功した。さらに、この RZ-CW 変換法を用いることにより、OTDM 伝送の多重度を 4 から 16 に拡大した偏波多重 160 symbol/s, 32 QAM(1.6 Tbit/s) 信号の 150 km 伝送に成功した。

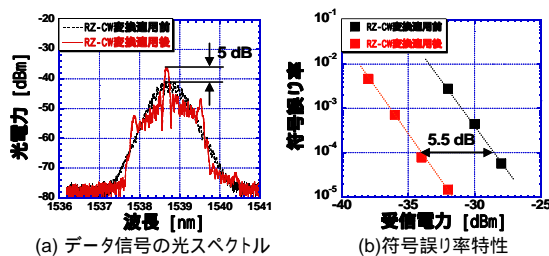


図 8 RZ-CW 変換適用による復調特性の改善効果

さらなる伝送特性の改善に向け、伝送システムを構成する各種デバイスの周波数依存性に伴う波形歪みに対する補償精度の向上を図った。FIR フィルタを用いた時間領域等化法の代わりに FFT 演算を用いた周波数領域等化法を採用し、歪み補償の周波数分解能を 100 MHz から 2.4 MHz に高めた。この改良前後における 160 Gsymbol/s, 64 QAM (1.92

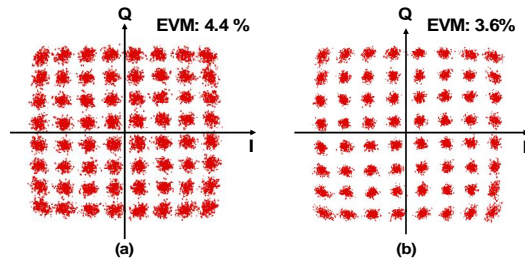


図 9 時間領域等化法(a)と周波数領域等化法(b)を用いた場合の復調特性の比較

Tbit/s)信号の Back-to-back 受信時の復調特性を図 9(a)および(b)に示す。周波数領域等化法を用いることでエラー・ベクトル振幅 (EVM) 値を 4.4 %から 3.6 %に低減し、1.92 Tbit/s 信号の 150 km 伝送に成功した。

これまでのガウス型光パルスを用いたコヒーレント伝送はスペクトル帯域を広く占有してしまうため、周波数利用効率は 3.2 bit/s/Hz に留まっており、これを向上することは困難であった。この問題を解決するために、広いパルス幅(狭い信号帯域)であっても符号間干渉を抑えることが可能な光ナイキストパルスを提案し、それを用いたコヒーレント光ナイキスト OTDM 伝送技術を新たに実現した。送信部において波形整形用光フィルタを用いて Raised Cosine 形状の光ナイキストパルスを生成し、本パルスを用いて偏波多重 160 Gsymbol/s, 64 QAM (1.92 Tbit/s) 信号の 150 km 伝送実験を行った。図 10(a), (b)にそれぞれ伝送に用いたナイキストパルス信号の光スペクトル波形および時間波形を示す。本伝送方式を用いることで 1.92 Tbit/s のデータをわずか 240 GHz の信号帯域で 150 km 伝送するとに成功した。このときの周波数利用効率は、7 %の FEC のオーバーヘッドを考慮しても、 $1920/240/1.07 = 7.5$ bit/s/Hz であり、ガウス型パルスを用いた場合と比べその値を 2 倍以上に増大することに成功した。

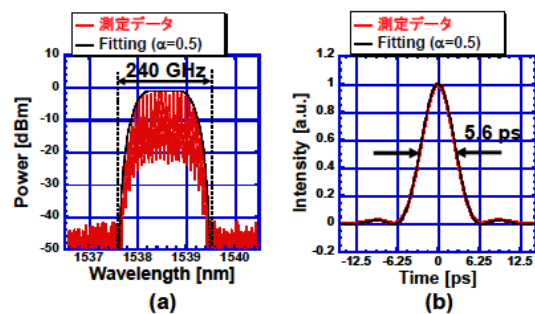


図 10 コヒーレントナイキストパルス信号の光スペクトル(a)と時間波形(b)

以上のように、(1)のモード同期レーザをベースにしたパルス光源の研究開発では、繰り返し周波数を Cs 時間標準に、光周波数を C₂H₂ 光周波数標準に安定化したモード同期レーザを世界で初めて実現した。本レーザの実現により、標準信号を光パルスにのせ光ファイバを介して世界中に遠隔供給する“標準信

号の光ネットワーク配信”が可能となり、計測・標準の分野において大きな波及効果が期待される。一方、(2)のCWレーザをベースにしたパルス光源の研究開発では、開発したパルス光源のコヒーレントパルス伝送への応用研究を展開した。64 値の多値変調による 1.92 Tbit/s データの単一チャネル伝送に世界で初めて成功し、さらに 7.5 bit/s/Hz という高い周波数利用効率を達成した。本研究で開発したパルス光源のコヒーレントパルス伝送への有用性を実証した。今後、短パルスかつ高光 S/N を有する(1)のパルス光源を用いてコヒーレントパルス伝送の伝送速度と多値度の増大を図り、伝送性能のさらなる改善を目指し研究を継続して推進する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

- [1] D. O. Otuya, K. Kasai, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “A single-channel 1.92 Tbit/s, 64 QAM coherent optical pulse transmission over 150 km using frequency-domain equalization,” *Opt. Express*, vol. 21, pp. 22808-22816 (2013) 査読有. DOI:10.1364/OE.21.022808
- [2] K. Tokuhira, F. Suzuki, M. Yoshida and M. Nakazawa, “A Cesium optical atomic clock with high optical frequency stability”, *IEICE Electronics Express*, Vol. 9, pp. 1496-1503 (2012) 査読有. DOI: 10.1587/elex.9.1496
- [3] K. Kasai, D. O. Otuya, M. Yoshida, T. Hirooka, M. Nakazawa, “Single-carrier 800-Gb/s 32 RZ/QAM coherent transmission over 225 km employing a novel RZ-CW conversion technique,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 416-418 (2012) 査読有. DOI: 10.1109/LPT.2011.2180373
- [4] M. Nakazawa, T. Hirooka, M. Yoshida, and K. Kasai, “Ultrafast coherent optical transmission,” *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 363-376 (2012) 査読有. DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2125781
- [5] M. Nakazawa, K. Kasai, M. Yoshida, and T. Hirooka, “Novel RZ-CW conversion scheme for ultra multi-level, high-speed coherent OTDM transmission,” *Opt. Express*, vol. 19, pp. B574-B580 (2011) 査読有. DOI: 10.1364/OE.19.00B574
- [6] K. Kasai, A. Mori, and M. Nakazawa, “1.5- μm frequency-stabilized $\pi/4$ -shifted DFB LD employing an external fiber ring cavity with a linewidth of 2.6 kHz and an RIN of -135 dB/Hz,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, pp. 1046-1048 (2011) 査読有. DOI: 10.1109/LPT.2011.2150211
- [7] T. Morisaki, M. Yoshida, and M. Nakazawa, “Optical frequency-tunable Cs atomic clock with a 9.19 GHz mode-hop-free fiber laser,” *IEICE Electron. Express*, vol. 7, pp. 1652-1658 (2010) 査読有. DOI:10.1587/elex.7.1652
- [8] 中沢正隆, “レーザーによる情報通信技術の発展,” *応用物理*, vol. 79, pp. 508-516 (2010) 査読有. <https://www.jsap.or.jp/ap/2010/06/index-e.xml>
- [9] K. Kasai, T. Omiya, P. Guan, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “Single-channel 400-Gb/s OTDM-32 RZ/QAM coherent transmission over 225 km using an optical phase-locked loop technique,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 562-564 (2010) 査読有. DOI: 10.1109/LPT.2010.2042708
- [10] M. Nakazawa, “Recent progress on ultrafast/ultrashort/frequency-stabilized erbium-doped fiber lasers and their applications,” *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, pp. 38-44 (2010) 査読有. DOI: 10.1007/s12200-009-0085-x
- [11] K. Kasai and M. Nakazawa, “FM-eliminated C_2H_2 frequency-stabilized laser diode with an RIN of -135 dB/Hz and a linewidth of 4 kHz,” *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 2225-2227 (2009) 査読有. DOI: 10.1364/OL.34.002225

[学会発表](計 46 件)

- [1] D. O. Otuya, K. Kasai, T. Hirooka, M. Yoshida, and M. Nakazawa, “1.92 Tbit/s, 64 QAM coherent Nyquist pulse transmission over 150 km with a spectral efficiency of 7.5 bit/s/Hz,” *OFC2014, W1A.4*, San Francisco, USA, 9-13 March 2014.

[産業財産権]

出願状況(計 3 件)

- [1] 名称: コヒーレント光時分割多重信号の復調方式, 発明者: 中沢正隆, 葛西恵介, 廣岡俊彦, 吉田真人, 権利者: 同上, 種類: 特許, 番号: 特願 2010-247011, 出願年月日: 平成 2010 年 11 月 4 日, 国内外の別: 国内
- [2] 名称: コヒーレント光時分割多重伝送方式, 発明者: 中沢正隆, 葛西恵介, 廣岡俊彦, 吉田真人, 権利者: 同上, 種類: 特許, 番号: 特願 2010-176273, 出願年月日: 平成 2010 年 8 月 5 日, 国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

[その他]

東北大学電気通信研究所中沢研究室 HP
<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中沢 正隆 (NAKAZAWA, MASATAKA)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号: 80333889

(2)研究分担者

吉田 真人 (YOSHIDA, MASATO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号: 10333890