

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360173

研究課題名(和文)光周波数同期網のためのCEP制御光周波数コム高コヒーレンス化の研究

研究課題名(英文)Research on achieving higher coherence CEP controlled optical comb towards realizing optical frequency synchronous networks

研究代表者

古賀 正文(Masafumi, Koga)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：60448545

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：半導体レーザー(LD)を種光として25GHz間隔を有するCEP(Carrier-envelope phase offset)制御光コム(Comb)発生を目指している。光コムにおいて25GHzなるコム間隔は、光通信領域では周波数グリッド基準発生として有用であるとともに、様々な信号処理のためのニーズが高まりつつあるが、固体レーザーやファイバレーザーでは実現が現状困難な領域でもある。このような背景の中で我々が提案してきたLDを種光とする変調側波帯方式によるオクターブ光発生まで成功し、自己参照干渉によってCEP制御を行っているところである。干渉に際して大きな雑音が発生しており、その解明中である。

研究成果の概要(英文)：Our goal is to realize 25GHz-spacing CEP (Carrier-envelope offset phase) controlled optical frequency comb seeded by a laser diode (LD). The CW light emitted from LD was modulated by cascaded optical phase modulators, resulted in generating about 20nm spanning optical comb with 25GHz space. This optical comb will play an important role not only in the future optical networks as optical frequency comb reference but also precise optical signal processing technologies. These wide spacing optical comb of over 10GHz cannot be realized by conventional solid-state laser and/or fiber-laser. We have achieved generating octave-spanning optical comb with ultra-short pulse of about 100-fsec, and are now managing to observe a self-referencing interference light. Note that unresolved noise has been observed in the light.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：光周波数コム CEP制御光 光周波数同期網 半導体レーザー マイクロ波変調側波帯 位相変調 パルス圧縮 群速度分散

研究開始当初の背景

(1) 波数利用効率の向上による光ファイバ伝送容量の拡大: 1本の光ファイバによる伝送容量は、デジタルコヒーレント通信技術の導入によってここ数年で大きく進展しており、2010年3月に行なわれた米国国際会議 OFC では 70Tbit/s が発表された。2001年に 10Tbit/s が達成された後、10年間で7倍へ拡大している。7倍の容量拡大の中心的役割を果たしたのが変復調技術である。無線通信で培われた変復調技術を採用したベクトル変調による多値化、ならびに直交周波数分割多重方式 (OFDM) により光周波数利用効率(SE)が飛躍的に高まった。2007年に実用化された RZ-DQPSK 方式 40Gbit/s DWDM 伝送システムでは SE は 0.4bit/s/Hz であったが、直近3年で報告されている SE は表1に示すように一つの偏波に着目したとき 2bit/s/Hz を超えている。多値数を高める研究では、光源の位相雑音を克服するとともに、光 SNR を高めることが課題となる。この課題に対して2つのアプローチが取られている。ひとつは、位相雑音、すなわち光源スペクトル線幅を狭くし光源スペクトル純度を高める、他方は光源位相雑音に対する許容度を緩和する方式研究である。光源スペクトル純度を高める技術は東北大学 中沢等のグループでファイバレーザを中心に進められており、512QAM を達成している。この点、実用上重要な半導体レーザでは研究が進んでおらず光源のコヒーレンス、安定性というコヒーレント通信に重要な性能指数を高める研究開発は、応募者らが知る限り、報告されていない。光源の周波数安定性とコヒーレンスを同時に高め、中継光増幅にも位相同期励起光による低雑音パラメトリック増幅を可能とするネットワーク構成として、我々は光周波数同期による次世代フォトニックネットワークの概念を提案している。

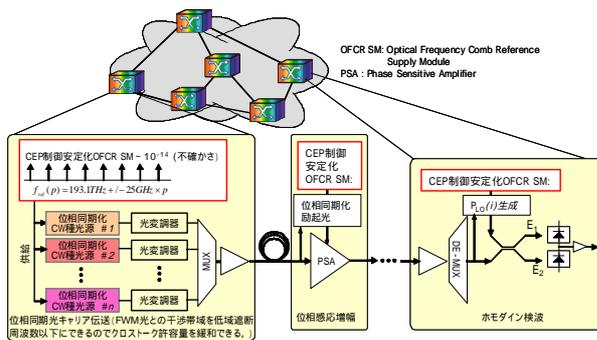


図1. 光周波数同期次世代フォトニックネットワークの概念構成

(2) 光周波数同期次世代フォトニックネットワーク: 本研究で提案する光周波数同期による次世代フォトニックネットワークの概念構成を図1に示す。周波数純度の良好な CEP 制御光を OFCR としてネットワークシステムへ配信することによって、個々の LD 光源の性能を

高めることなく光 PLL によって周波数純度が高く安定性に優れた光キャリア、励起光、局発光が得られるので、新しい機能を実現することができる。例えば位相同期化マルチ光搬送波伝送、位相感応型光増幅、ならびにホモダイン検波が容易に可能となり、実現できれば SNR が 10dB 以上高まる。10 倍の伝達距離拡大に匹敵する。その可能性を検証するために挑戦するのが、高コヒーレンス、かつ高安定化 CEP 制御光である。赤枠で括った CEP 制御安定化 OFCR SM (SM: Supply Module) の高性能化が本研究中での対象となる。

2. 研究の目的

ノードごとにコヒーレンスに優れた光周波数コム基準 (OFCR: Optical Frequency Comb Reference) を配備できると、個々の光搬送波だけでなく、各種励起光や検波用局発光を位相同期させることができるので、フォトニックネットワークの伝達性能を飛躍的に高めることが期待できる。本研究は、10-14 級の光周波数安定化が期待できる Carrier-Envelope offset Phase (CEP) 制御光について、安定性を向上させ、位相雑音を新しい原理に基づいて抑圧するとともに、光通信システムへの実用性に優れた半導体レーザ光のスペクトル線幅を 100Hz を目標に狭線幅化し、高純度 OFCR を生成することを目的としている。

3. 研究の方法

未だ成功例の報告がなされていない LD を種光とする CEP 制御光の生成を目指している。一般には、モード同期による短パルス列の発生法が多く用いられているが、LD を種とするモード同期法では短パルス化に限界がある。本研究では、光位相変調器を用いて変調側帯波光コムを生成し、分散圧縮によって短パルスを発生させる。マイクロ波周波数 25GHz にて変調指数を 20π まで高めると光スペクトルを 17nm ほどまで拡大できる。2THz 近くチャープしていることになる。この状態で分散圧縮を施すと約 300fsec の短パルスを得ることができる。

さらに 250MHz 間隔程度の時間ゲートを施すことによりパルス尖頭値を 100 倍まで高めることができるので、オクターブ光を生成できることになる。

本手法では、マイクロ波発振源における位相雑音が無視できない。高次の変調側帯波では、位相雑音はその次数倍まで増強されるためである。オクターブ光では、仮に変調側帯波と同様の機構によって増強されるとすると、次数が数千に及ぶ。したがって、位相雑音の増加によるコヒーレンスの崩壊、と称されることもある。この問題の克服が本手法の課題となる。

4. 研究成果

4.1 LD 光による短パルス発生

LD 光を種として変調側帯波光コム分散圧縮

によって短パルスの極限を追求した結果、120-fsecの超短パルスの発生に成功した。自己位相変調による非線形圧縮効果も組み込んだ結果である。その結果には、大変関心が持たれ、応用物理学会では招待講演として講演することとなり、OpticsExpress に採用されることとなった。

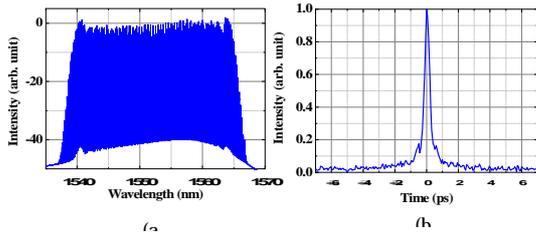


図1. 128-fsec 短パルスとその光スペクトル

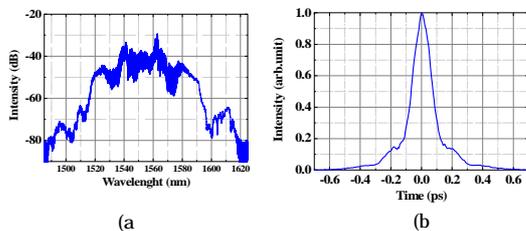


図2. 70-fsec 短パルスとその光スペクトル

以下簡単に成果の概要を記す。なお、実験系の構成は2段組みなる指定された様式の都合上割愛する。詳細は、論文リスト(2)を参照頂きたい。

得られた 128-fsec 短パルスとその光周波数スペクトルの様子を図1に示す。変調による位相変調における変調指数は 20π 、そのとき得られたスペクトル帯域幅は 24-nm であった。

自己位相変調による非線形圧縮を行うとさらにパルスは細くなりサブ f-sec を記録した。その結果を図2に示す。約 70-fsec となっている。

4.2 変調側帯波における位相雑音

変調側帯波による位相雑音増強は、発表論文(4)に詳細に示しており、

$$\theta_k = 2\pi f_s t + k(2\pi f_m t - \Psi(t)) - \phi_k$$

と表わることができる。記号の意味は論文(6)に示しており、ここでは詳細は割愛するが、位相雑音 $\Psi(t)$ がその次数に応じて k 倍されることを示している。理論上 k 倍となることは容易に示すことができるが、実験的には検証されていない。SSB 位相雑音を測定し、次数に応じて位相雑音が高まることを確認した。その結果を図3に示す。

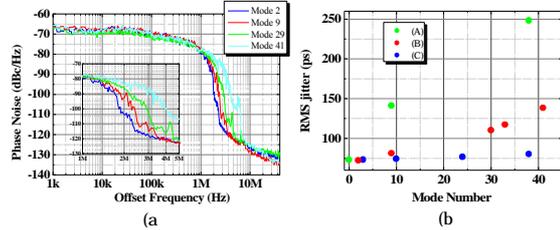


図3. SSB 位相雑音測定結果と RMS jitter 換算値

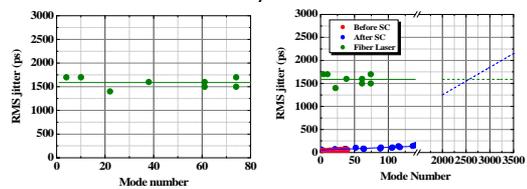
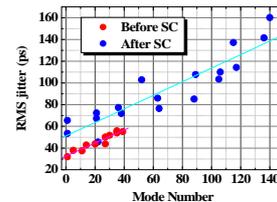


図4. モード次数に対する SC 光発生時 RMS jitter

次数に応じて線形に伸びていく様子が伺える。光ファイバ中でのパラメトリック過程(特に4光波混合光)によってスペクトルが拡散して SuperContinuum(SC)光を発生させて、そのときのモード次数に対する RMS Jitter 値を求めた。その結果を図4に示す。パラメトリック過程を経た後も線形近似に良く一致していることが分かる。参照基準としてファイバレーザにおける値もプロットしている。ファイバレーザでは、輝線スペクトルの位置によらず一定の RMS Jitter 値を示している。変調側帯波による増強に比べても大きな値を示しており、オクターブ光までの拡がりの範囲では、マイクロ波変調側帯波におけるコヒーレンス崩壊までは至らないことが期待できる。

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)

- (1) M.Koga and A.Mizutori, "Decision-Directed Costas Loop Stable Homodyne Detection for 10Gb/s BPSK Signal Transmission", IEEE Photon.Tech.Lett., vol.26, No.4, pp.319-323, 2014.
- (2) 高田 篤、古賀 正文、"位相感応型光増幅器とその光ファイバ通信への適用技術"、2014 レーザ学会
- (3) A.Ishizawa, T.Nishikawa, A.Mizutori, H.Takara, A.Takada, T.Sogawa and M.Koga, "Phase Noise Characterization of a 25-GHz-Spaced Optical Frequency Comb

from a Phase-Modulated Laser”, CLEO 2013 2013/6/11

- (4) 堺 友哉、菅本 真陸、水島 明、高田 篤、古賀 正文、 “ コスタスループ位相制御励起光による12.5Gbit/sBPSK信号位相感応型光増幅幅実験 ”、 電子情報通信学会総合大会 2013/3/19
- (5) A.Ishizawa, T.Nishikawa, A.Mizutori, H.Takara, A.Takada, T.Sogawa and M.Koga, “Phase-noise characteristics of a 25-GHz-spaced optical frequency comb based on a phase-and intensity-modulated laser”, OPTICS EXPRESS, vol.21, pp.29186-29194, 2013.
- (6) 石澤 淳、西川 正、水島 明、高良 秀彦、中野 英俊、寒川 哲臣、高田 篤、古賀 正文、 “ GW半導体レーザーベース高出力高繰返しサブ100fs短パルス光発生 ”、 第72回応用物理学術講演会 2011/8/30.
- (7) 西川 正、石澤 淳、水島 明、高良 秀彦、中野 英俊、寒川 哲臣、高田 篤、古賀 正文、 “ レーザーの位相変調で得られた25HGz高繰返し短パルス光から発生した スーパーコンティニウム光の位相特性半導体 ”、 第72回応用物理学術講演会 2011/6/3
- (8) Masafumi Koga, Atsushi Takada, Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa and Hidehiko Takara, “Proposal of Optical Frequency Synchronized Photonic Network based on Carrier-Envelope Offset Phase Locked Frequency Comb” Korea-Japan Workshop on Beyond 100G 2011/6/3.
- (9) A. Ishizawa, T. Nishikawa, A. Mizutori, H. Takara, H. Nakano, T. Sogawa, A. Takada and M. Koga, “Generation of 120-fs pulses at 1-GHz repetition rate derived from continuous wave laser diode”, Optics Express, vol.19, No.23,pp.22402-22409, 2011.
- (10) A.Ishizawa, T.Nishikawa, A.Mizutori, H.Nakano, T.Sogawa, A.Takada and M.Koga, “Sub-100-fs optical pulse generation at 1-GHz repetition rate with an externally phase-modulated continuous wave laser diode”, Ultrafast Optics VIII, Tu12, 2011.
- (11) A. Mizutori, A. Kodama, and M. Koga, “Phase-synchronous Chain of Two Multi-Carrier Lights Spaced at 25GH by Cancelling Micro-wave Phase Noise,” IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, Singapore, 2011.

〔雑誌論文〕(計 3件)

〔学会発表〕(計 4件)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 短パルス光発生装置および方法
発明者: 石澤淳
権利者: 西川正、高良秀彦、水島明、古賀正文
種類: 特許明細
番号: 特願 2011-162949
出願年月日: 平成 23 年 7 月 26 日
国内外の別: 国内

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等: <http://koga-labs.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 正文 (KOGA MASAFUMI)

大分大学・工学部・電気電子工学科・教授

研究者番号: 60448545

(2) 研究分担者

石澤 淳 (ISHIZAWA ATSUSHI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号: 30393797

(3) 高田 篤 (ATSUSHI TAKADA)

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部・情報ソリューション部門・計算機システム工学・教授

研究者番号: 00548563

(4) 水島 明 (AKIRA MIZUTORI)

大分大学・工学部・電気電子工学科・助教

研究者番号: 10190646

(5) 連携研究者

高良秀彦 (TAKARA HIDEHIKO)

日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究

所・フォトリックトランスポートネットワー
ク研究部・主任研究員