

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2015

課題番号：26706016

研究課題名(和文)コヒーレント光通信用狭線幅周波数安定化レーザの開発

研究課題名(英文)Study on a narrow linewidth frequency-stabilized laser for coherent optical communication

研究代表者

葛西 恵介 (KASAI, KEISUKE)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80534495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超多値コヒーレント伝送への応用を目指し、高い光S/N、狭線幅、低振幅雑音特性を有する波長1.5 μm 帯周波数安定化レーザの研究開発に取り組んだ。周波数基準として低熱膨張水晶複合体を用いた線幅60 MHzの小型エタロンを作製した。光源としては相対強度雑音-120 dB/Hz以下、線幅5 kHz、出力295 mWの単一周波数ファイバレーザ及び、線幅8 kHz、相対強度雑音-130 dB/Hz以下のLDを開発した。これらの周波数をエタロンの共振ピークに安定化し、 $1\text{E}-12$ の周波数安定度を有するコヒーレントレーザを実現した。また本光源をコヒーレント光伝送に応用しその有用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：With the aim of applying to next generation ultra-multilevel coherent optical communication, I have developed a 1.5 μm frequency-stabilized laser with a high optical signal-to-noise ratio, a narrow linewidth, and low intensity noise characteristics. As an optical frequency standard, I have developed a compact and stable Fabry-Perot etalon with a linewidth as narrow as 60 MHz, which was made of a low expansion complex material based on crystal. As a coherent laser for frequency stabilization, I have constructed a 295 mW output, single frequency fiber laser with a linewidth of 5 kHz, relative intensity noise (RIN) of less than -120 dB/Hz. Furthermore, a laser diode with a linewidth of 8 kHz and a RIN of -130 dB/Hz has been developed. By stabilizing their frequency to the peak of etalon, I have successfully realized a low noise coherent laser with a frequency stability of $1\text{E}-12$. In addition, I have applied these lasers to coherent optical transmission and demonstrated their usefulness.

研究分野：光通信工学

キーワード：レーザー 周波数安定化 ファブリーペロー共振器 コヒーレント光通信

1. 研究開始当初の背景

最近の光通信では光信号の振幅と位相に同時に情報を乗せる多値コヒーレント光伝送に高い関心が寄せられ、国内外で盛んに研究が進められている。特に直交振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)方式は多値度の高い変調が可能であり、シャノン限界に最も近い高効率な変調方式として大変注目されている。このようなコヒーレントQAM光伝送においては、高い光 S/N、狭線幅及び低振幅雑音特性を有する周波数安定化光源が重要な役割を果たす。

これまで光通信波長 1.5 μm 帯においてはアセチレン分子の線形または飽和吸収線に発振周波数を安定化した半導体レーザーやファイバレーザが報告されている。線形吸収線を用いた周波数安定化レーザは構成が簡便であるものの、安定度を決定する吸収線幅が数 100 MHz と広く、周波数安定度が 10^{-10} ~ 10^{-11} 程度に制限されている。数 MHz の線幅を有する飽和吸収線を用いた周波数安定化レーザは 10^{-12} 程度の安定度が実現できるものの、飽和吸収線を観測するために高出力の光増幅器が必須であり、レーザ構成が大型化してしまう問題があった。

一方光度量衡の分野では単一 Ca^+ イオン時計のクロックレーザとしてゼロ熱膨張特性を有するガラス複合材を用いた線幅数十 KHz の Fabry-Perot 共振器を光周波数基準とした 730 nm の周波数安定化半導体レーザの開発が進んでいる。しかし本レーザは、狭線幅かつ高い周波数安定度を実現するために長さ 10 cm 以上の Fabry-Perot 共振器を真空チャンバに収納して動作させる必要があり、システムが大型化してしまうという問題がある。そのため、本方式による周波数安定化レーザの光通信への応用はこれまで実現できていなかった。

2. 研究の目的

本研究では極めて小さい線膨張特性を示す複合材を用いて小型で狭線幅な Fabry-Perot 共振器を開発してこれを温調することで高安定な 1.5 μm 帯光周波数基準とし、この共振ピークに高光 S/N、狭線幅、低振幅雑音特性を有するコヒーレントレーザの周波数を安定化し、従来にはない超多値コヒーレント光伝送用の周波数安定化レーザを実現する。

3. 研究の方法

(1) 小型で高安定なファブリーペローエタロン共振器の開発

極めて小さい線膨張特性を有する長さ数 mm の水晶複合体の素子の両端に高反射率ミラーを蒸着し、線幅が数 MHz~数 10 MHz、FSR(Free Spectral Range)が 50 GHz のファブリーペローエタロン共振器を作製する。これを用いて両端光ファイバ結合型のモジュールを作製し、温調を施すことによって狭線幅・高安定な光周波数基準を実現する。

(2) 高出力低振幅雑音エルビウムファイバレーザの開発

一般的なエルビウムファイバレーザは共振器長が数 m と長いので、狭線幅特性を容易に実現できるものの、高い励起パワーの条件下では複数の Fabry-Perot モードが同時に発振する問題が生じる。そこで 4 ポートサーキュレータを用いた短共振器構造を適用し、数 100 mW の出力強度で安定な単一モード発振を実現する。また、エルビウムイオンの緩和振動によって生じる数%の強度揺らぎを負帰還制御によって抑制することで、振幅雑音の小さい狭線幅・高出力ファイバレーザを実現する。

(3) 狭線幅半導体レーザの開発

半導体レーザは振幅揺らぎが非常に小さいことが特徴である一方、線幅が 100 kHz 以上と広いことが欠点であった。本研究では数 10 mm の比較的長い外部共振器と線幅の狭い光フィルタを組み合わせることにより、数 kHz の狭線幅特性を有する半導体レーザを実現する。

(4) 高い光 S/N、狭線幅及び低振幅雑音特性を有する周波数安定化レーザの開発

小型・高安定な光周波数基準および低雑音レーザと外部変調方式による周波数安定化技術とを組み合わせることにより、線幅数 kHz、相対強度雑音-120 dB/Hz 以下、周波数安定度 10^{-12} 、70 dB 以上の光 S/N を有するコヒーレントレーザを実現する。

4. 研究成果

(1) 小型で高安定なファブリーペローエタロン共振器の開発

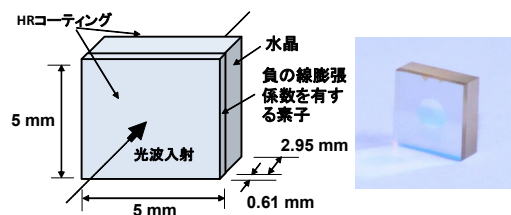


図 1. エタロン共振器の構造

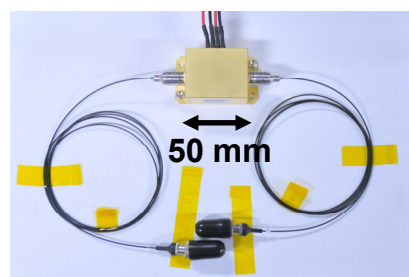


図 2. 光周波数基準モジュールの外観

図 1 に作製したファブリーペローエタロン共振器の構造を示す。本共振器は正の線膨張

係数を有する 5 mm 角の水晶(厚さ 2.95 mm)と負の線膨張係数を有する素子を(厚さ 0.61 mm)から成る^[1]。両素子を原子拡散法にて接合し、両端に反射率およそ 99.4 %の高反射率ミラーを蒸着することでファブリーペローエタロン共振器を作製した。本共振器を両端光ファイバ結合型の小型気密ケースに収納し、共振器を 0.05°Cの精度で温調することで、高安定な光周波数基準モジュールを実現した(図2)。

図3(a)はASE光源と光スペクトルアナライザで測定した(測定分解能 0.02 nm:2.5 GHz)本エタロン共振器の透過特性である。また図3(b)は波長可変狭線幅レーザ、光検出器、オシロスコープを用い、レーザの波長をエタロン透過ピーク付近で掃引させて測定した詳細なエタロン透過スペクトル波形である。本エタロンの free spectral range (FSR)は 25 GHz であり、透過スペクトルの-3 dB 線幅はおよそ 70 MHzであった。また、本モジュールの挿入損失(ファイバファイバ間)はおよそ 10 dBであった。

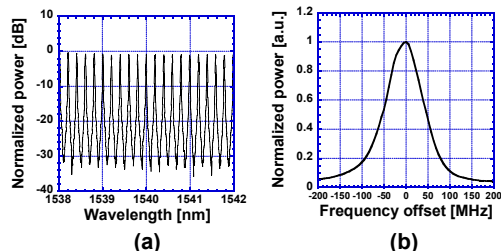


図3. (a)エタロンの透過スペクトル, (b)詳細な透過スペクトル(1539 nm)

(2) 高出力・低振幅雑音エルビウムファイバレーザの開発

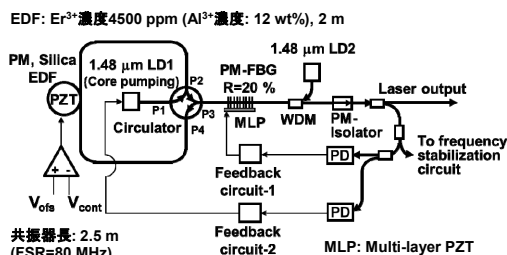


図4. 単一周波数エルビウムファイバレーザの構成

図4に周波数安定化に用いる単一周波数エルビウムファイバレーザの構成を示す。本レーザは2台の1.48 μm 励起 LD と長さ 2 m の偏波保持 (PM: Polarization-Maintained) EDF、4ポート PM サーキュレータ、帯域 1.6 GHz の PM-FBG (Fiber Bragg Grating)、PM アイソレータ、WDM (Wavelength Division Multiplexing) カプラ及び2つのフィードバック回路から成る。レーザ出力はFBGの片端より取り出している。EDFを巻きつけた円筒型 PZT (Piezo Electric

Transducer)と FBG を設置した積層型 PZT (MLP: Multi-Layer PZT)に電圧を印加することで共振器長とグレーティング間隔を可変し、レーザ周波数を連続的に掃引している。フィードバック回路1はFBGの反射ピークと発振縦モードを一致させるトラッキング制御を行っており、これによりモードホップを抑制している。またフィードバック回路2は励起光強度の負帰還制御を行っており、エルビウムイオンの緩和振動による強度揺らぎを抑制している。

図5(a)~(d)はそれぞれ本レーザの出力強度特性、光スペクトル、自己遅延ヘテロダインスペクトル、相対強度雑音スペクトルである。本レーザは励起光強度 980 mW 時に 295 mW の出力が得られる。光 S/N は 82 dB、線幅は 5 kHz であった。励起強度の制御を行うことで緩和振動成分(425 kHz)をおよそ 28 dB 抑制することができており、相対強度雑音は-120 dB/Hz 以下に低減されていることがわかる。

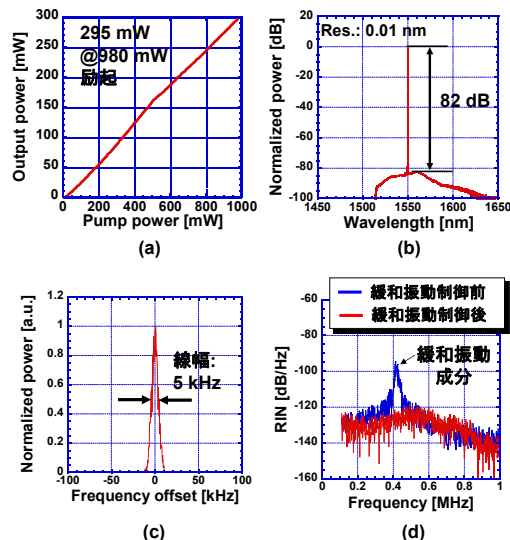


図5. (a)出力電力特性, (b)光スペクトル, (c)自己遅延ヘテロダインスペクトル, (d)相対強度雑音スペクトル

(3) 狭線幅半導体レーザの開発

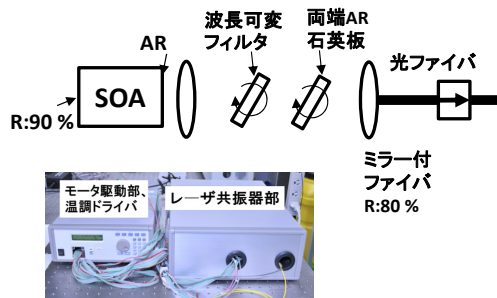


図6. 狭線幅半導体レーザの構成

図6はレーザの構成を示した模式図である。本レーザはSOA、半値全幅 0.55 nm の波長可

変誘電体多層膜フィルタ、80%反射率のミラー付光ファイバ、両面 AR コートされたシリカ板、アイソレータから成る。SOA は両端にそれぞれ 90%の反射膜と AR コートが施されており、この片端とミラー間で外部共振器(外部共振器長は 60 mm)の構成となっている。誘電体多層膜フィルタおよびシリカ板は回転ステージに固定されており、これらを回転させて光波の入射角度を変えることで透過中心波長と光パス長をそれぞれ調整し、発振波長を可変している。また、SOA へ注入する電流値を変えることで連続的に発振周波数を可変することができる。

図 7(a)~(c)はそれぞれ本レーザの光スペクトル、自己遅延ヘテロダインスペクトル、相対強度雑音スペクトルである。光 S/N は 70 dB、線幅は 8 kHz、相対強度雑音は -130 dB/Hz 以下であった。

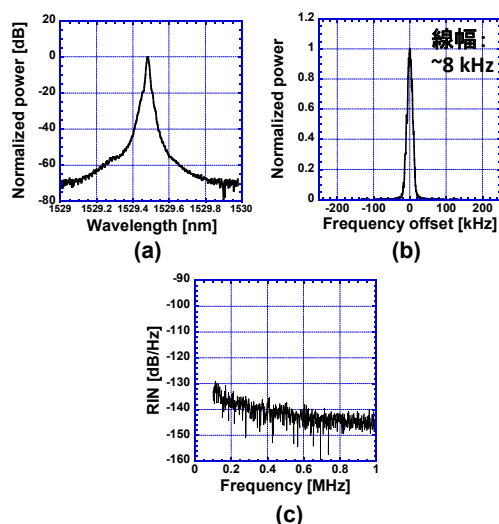


図 7. (a)光スペクトル, (b)自己遅延ヘテロダインスペクトル, (c)相対強度雑音スペクトル

(4) 高い光 S/N、狭線幅及び低振幅雑音特性を有する周波数安定化レーザの開発

高安定ファブリーペローエタロンの共振ピークの一つ(1539 nm)にファイバレーザまたは半導体レーザの発振周波数を安定化した。図 8 は周波数安定化レーザの構成である。位相敏感検波回路を用いてレーザ周波数のエタロン共振ピークからのずれを誤差電圧信号として検出しており、これをレーザの周波数調整機構に負帰還することで発振周波数の安定化を行った。本実験においてはファイバレーザでは円筒型 PZT に、半導体レーザでは SOA 注入電流に誤差電圧信号を負帰還した。なお、エタロンは素子温度を 50 °C に安定化して用いた (温調ドライバの安定性 ± 0.01 °C)。位相敏感検波における変調周波数は 10 MHz とした。図 9 はエタロン透過スペクトルと位相敏感検波回路より得られたその一次微分曲線である。本安定化回ではこの

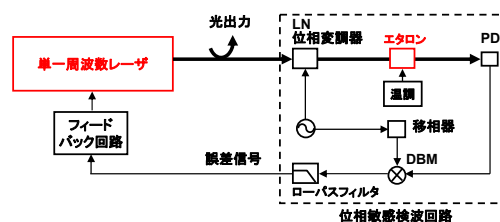


図 8. 周波数安定化レーザの構成

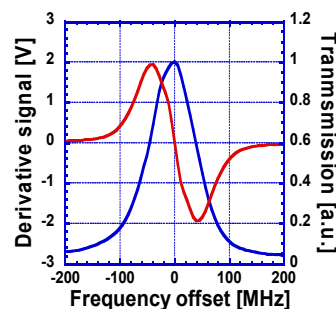


図 9. エタロン透過スペクトルとその一次微分信号

微分信号が常に 0 V となるように制御を行っている。

レーザ周波数の安定度は 2 台の周波数安定化レーザのヘテロダイニート周波数の時間変動を測定し、そのアラン偏差によって評価した。図の 10 は周波数安定化レーザのアラン偏差である。積分時間 1 s 及び 100 s におけるアラン偏差はファイバレーザ型の場合、それぞれ 9.9×10^{-12} 、 4.8×10^{-12} であった。また半導体レーザ型の場合では、 1.4×10^{-11} 、 6.1×10^{-12} であった。いずれのレーザでも 10^{-12} の安定度が得られている。ただし、長期的な(積分時間の大きい範囲)周波数安定度には劣化が見られる。これはエタロンの温調の精度の限界に起因するものと考えられる。今後エタロンを高精度に温調することでさらなる安定度の向上が期待できる。

このような高出力、高光 S/N、狭線幅、低振幅雑音特性を同時に満足する周波数安定化レーザはこれまで実現された例はなく、本研究においてこれを初めて実現した。

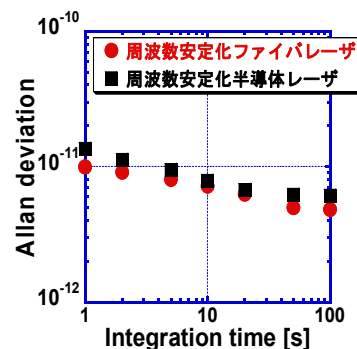


図 10. 周波数安定化レーザのアラン偏差

(5) 周波数安定化レーザを用いた単一チャネル 552 Gbit/s, 46 Gbaud-64QAM コヒーレント伝送実験

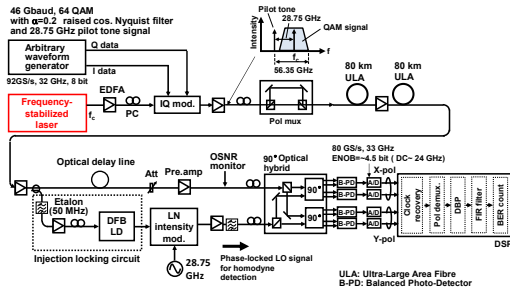


図 11. 伝送実験系

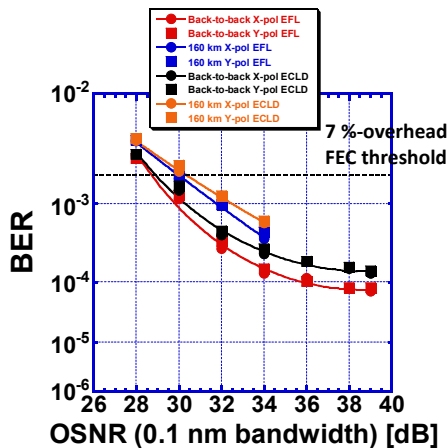


図 12. BER 特性

(4)で述べた周波数安定化レーザの有用性を実証するため、本研究では発展課題としてこれを用いたデジタルコヒーレント伝送に取り組んだ。図 11 に伝送実験系を示す。送信光源には前述した周波数安定化ファイバレーザまたは周波数安定化半導体レーザを、LOとしてはDFB-LD array(NEL製)を用い、光位相同期法として注入同期を用いた伝送系となっている。送信部においては周波数安定化レーザの出力光をIQ変調し、46 Gbaud 64 QAM信号及びキャリアより28.75 GHz低周波数側にシフトしたpilot tone (PT)信号を生成している。偏波多重した552 Gbit/sデータ信号とPT信号を5 dBmのパワーで1スパン80 kmのULAファイバ伝送路を2スパン、合計160 km伝送させて受信部に送る。伝送損失はEDFAによって補償している。受信部ではまず、フィルタで抽出したPT信号をLOに注入している。PTに注入同期したLOの出力光はLN強度変調器と光フィルタで構成する光周波数シフタに入力され、PT信号から28.75 GHz周波数アップシフトした成分が抽出される。本信号とデータ信号を90°光ハイブリッドへ入射し、差動光検出することでホモダイン検波を行っている。検波後のデータはA/D変換されDSPを用いて復調される。

図 12 は BER 特性である。160 km 伝送後には 1.5 dB のペナルティはあるものの

7 %-overhead の FEC 閾値(2×10^{-3})以下の BER 特性を実現している。本実験では 552 Gbit/s のデータ信号を 56.35 GHz の帯域で伝送しており、周波数利用効率は 9.2 bit/s/Hz に達する。

以上のように本研究で開発した周波数安定化レーザを用いることによって単一チャネルで 500 Gbit/s を越える高速多値 QAM 信号を 9.2 bit/s/Hz と非常に高い周波数利用効率で伝送することができている。本結果から、今後さらなる高速化、多値化が可能であると考えられ、本研究結果が将来光通信の高度に大きく貢献することが期待される。

<引用文献>

[1] 京セラ ニュースリリース, http://www.kyocera.co.jp/news/2009/0904_fjtm.html, (2009. 9.).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

[1] Keisuke Kasai, Masato Yoshida, and Masataka Nakazawa, “295 mW output, frequency-stabilized erbium silica fiber laser with a linewidth of 5 kHz and a RIN of -120 dB/Hz,” *Optics Express*, 査読有, vol. 24, no. 3, 2016, pp. 2737-2748. DOI: 10.1364/OE.24.002737

[2] 葛西 恵介, 中沢 正隆, “狭線幅レーザと OPLL(Optical Phase-Locked Loop)及び光注入同期を用いた超多値デジタルコヒーレント伝送, レーザー学会誌 レーザー研究, 査読有, vol. 44, no. 2, 2016, pp. 106-110.

[学会発表] (計 3 件)

[1] Keisuke Kasai, Masato Yoshida, and Masataka Nakazawa, “A 295 mW output, HCN frequency-stabilized CW erbium silica fiber laser with a linewidth of 5 kHz and a RIN of -120 dB/Hz,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 23 March, 2016, Anaheim, USA.

[2] 葛西 恵介, 吉田 真人, 中沢 正隆, “295 mW 出力, HCN 周波数安定化 CW エルビウムファイバリングレーザ,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月16日, 九州大学, 福岡県福岡市

[3] Keisuke Kasai, Akira Fujisaki, Masato Yoshida, Toshihiko Hirooka, and Masataka Nakazawa, “A 160 mW output, 5 kHz linewidth frequency-stabilized erbium silica fiber laser with a short cavity configuration,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 11 June, 2014, San Jose, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛西 恵介 (KASAI, Keisuke)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80534495